



STEFÂNIA LIMA OLIVEIRA

**INTERAÇÃO DA ESPÉCIE DE MADEIRA E DO
TIPO DE ADESIVO NA QUALIDADE DA
MADEIRA LAMINADA COLADA**

LAVRAS - MG

2016

STEFÂNIA LIMA OLIVEIRA

**INTERAÇÃO DA ESPÉCIE DE MADEIRA E DO TIPO DE ADESIVO
NA QUALIDADE DA MADEIRA LAMINADA COLADA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Lourival Marin Mendes

Coorientadora

Luciana Barbosa de Abreu

LAVRAS - MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha
Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados
informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Stefânia Lima.

Interação da espécie de madeira e do tipo de adesivo na qualidade da madeira laminada colada / Stefânia Lima Oliveira. – Lavras : UFLA, 2016.

123 p. : il.

Tese(doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador(a): Lourival Marin Mendes.

Bibliografia.

1. Construção civil. 2. Novas madeiras. 3. Colagem. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

STEFÂNIA LIMA OLIVEIRA

**INTERAÇÃO DA ESPÉCIE DE MADEIRA E DO TIPO DE ADESIVO
NA QUALIDADE DA MADEIRA LAMINADA COLADA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2016.

| | |
|----------------------------------------|------|
| Dr. Juliano Fiorelli | USP |
| Dra. Jaqueline de Oliveira Castro | UFLA |
| Dra. Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz | UFLA |
| Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli | UFLA |

Dr. Lourival Marin Mendes
Orientador

Dr. Luciana Barbosa de Abreu
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2016**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por proteger e guiar os meus passos.

Aos meus queridos e amados pais, Cássia e Robson, pelo apoio, incentivo e amor de sempre.

Ao meu irmão Sávio, pelo carinho e amizade.

Ao meu namorado Bráulio, pelo apoio na reta final do doutorado e pelo carinho e amor de sempre.

A minha mãe-avó Elza, pelo amor incondicional e proteção.

Às minhas grandes amigas, Cris, Débora e Bruna, pela amizade incondicional e incentivo.

Ao professor e orientador Dr. Lourival Marin Mendes, pelos ensinamentos, orientação, compreensão e amizade.

À professora do comitê de orientação, Dra. Luciana Barbosa de Abreu, pelos ensinamentos e amizade.

Ao professor Dr. Antônio Nazareno Guimarães Mendes, pela ajuda e incentivo.

Às empresas Cequil Central de Industrialização e Desenvolvimento de Polímeros Ltda. e Hexion Química Indústria e Comércio Ltda. pela doação dos adesivos poliuretano à base de mamona e resorcinol Cascophen.

Aos meus amigos da UEPAM, pela ajuda e companheirismo.

Ao meu amigo professor Dr. Rafael Farinassi Mendes, pelos ensinamentos, amizade, incentivo, paciência e confiança nos trabalhos realizados.

Ao meu amigo Wilson Melão, pela ajuda, esforço e amizade.

Ao técnico de laboratório Arlei, pela ajuda nos trabalhos.

À Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade concedida.

Aos professores do programa em Ciência e Tecnologia da Madeira,
pelos ensinamentos transmitidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
(CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho com bons
conselhos, incentivo e ajuda.

RESUMO

A madeira laminada colada é considerada como um bom material para uso estrutural. Esta técnica baseia-se no uso racional da madeira de baixa e média densidade, com aproveitamento das peças de menor dimensão. Além da escolha adequada do adesivo, o conhecimento das propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômicas da madeira permite uma melhor utilização desta como material estrutural. Sendo assim, o objetivo neste trabalho foi avaliar o uso de novas espécies de madeira para confecção de madeira laminada colada e a interação madeira/adesivo. Foram utilizadas quatro espécies de madeira: *Cedrelinga catenaeformis* (Cedrao), *Eucalyptus grandis* (Eucalipto), *Castilla ulei* Warb. (Caucho) e *Acrocarpus fraxinifolius* (Cedro Indiano); e dois tipos de adesivo: resorcinol e poliuretano à base de óleo de mamona. Essas madeiras foram preparadas e classificadas através do método não destrutivo, e passaram por caracterização física, mecânica, química e anatômica. Posteriormente à classificação foi confeccionada a madeira laminada colada, utilizando adesivos poliuretano à base de óleo de mamona e resorcinol, na gramatura de 350 g/m², pressão de prensagem de 1 MPa e tempo de prensagem de 24h. Foram realizados ensaios físicos e mecânicos, bem como ensaio de delaminação e ensaio não destrutivo. Houve interação significativa entre o tipo de adesivo e o tipo de madeira quando avaliadas as propriedades compressão e módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática das vigas. Em ambas as propriedades a madeira de Eucalipto obteve os melhores resultados, seguida pela madeira de Cedro Indiano, a qual apresentou a melhor colagem. O tipo de adesivo afetou apenas a propriedade de cisalhamento pós-fervura das vigas, sendo o adesivo resorcinol o mais resistente. De forma geral, os adesivos resorcinol e poliuretano à base de mamona podem ser utilizados para produção de vigas de madeira laminada colada com as madeiras de Eucalipto, Cedro Indiano, Caucho e Cedrao. Sendo em alguns casos, necessários ajustes de processo.

Palavras-chave: Construção civil. Novas madeiras. Colagem.

ABSTRACT

The glued laminated timber is considered as a good material for structural use. This technique is based on the rational use of low and medium density wood, with using of smaller parts. In addition to the appropriate adhesive selection, the knowledge of the physical, mechanical, chemical and anatomical of wood allows better use of this as a structural material. Thus, the objective in this study was to evaluate the use of new wood species for glued laminated timber production and interaction wood/adhesive. Four wood species were used: *Cedrelinga catenaeformis* (Cedrao), *Eucalyptus grandis* (Eucalipto), *Castilla ulei* Warb. (Caucho) and *Acrocarpus fraxinifolius* (Cedro Indiano); and two adhesive types: resorcinol and polyurethane on castor oil base. These woods were prepared and classified using the non-destructive method and passed for physical, mechanical, chemical and anatomical characterization. Subsequently the classification was made glued laminated timber using polyurethane adhesive on castor oil base and resorcinol, the weight 350 g/m², pressing pressure of 1 MPa and 24h pressing time. Tests physical and mechanical, as well as delamination and non-destructive assay were carried out. There was a significant interaction between the adhesive and the wood type when measured the properties compression and elasticity and rupture modulus to static bending the beams. In both properties, *Eucalipto* wood obtained the best results, followed by the *Cedro Indiano* wood, which presented the best glue. The adhesive type affects only the post-boil shear property of beams, the resorcinol adhesive was the most resistant. Overall, the resorcinol and polyurethane adhesives on castor oil base can be used for beams production of glued laminated timber with *Eucalipto*, *Cedro Indiano*, Caucho and Cedrao woods. As in some cases necessary process adjustments.

Keywords: Construction. New wood. Collage.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 | Madeira Laminada Colada | 17 |
| Figura 2 | Emendas transversais e longitudinais..... | 18 |
| Figura 3 | Interface madeira-adesivo. a) Fotomicrografia da interface madeira-adesivo nos planos longitudinal e transversal da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> colada com resorcinol. b) Zonas de encaixe da união de acordo com o modelo Marra | 23 |
| Figura 4 | Planos de corte da madeira de Caucho a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm)..... | 52 |
| Figura 5 | Planos de corte da madeira de Cedrão. a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm)..... | 54 |
| Figura 6 | Planos de corte da madeira de Cedro Indiano. a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm)..... | 55 |
| Figura 7 | Planos de corte da madeira de Eucalipto. a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm) | 57 |
| Figura 8 | Relação entre o MOE à flexão estática e o MOEd..... | 75 |
| Figura 9 | Relação entre o MOR à flexão estática e o MOEd | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | Delineamento experimental..... | 48 |
| Tabela 2 | Densidade aparente, densidade básica e umidade dos diferentes tipos de madeiras | 57 |
| Tabela 3 | Retrações tangencial e radial até 12% e de 12 a 0% para os quatro tipos de madeira | 61 |
| Tabela 4 | Retrações tangencial e radial totais para os quatro tipos de madeira | 62 |
| Tabela 5 | Índice de anisotropia para os quatro tipos de madeira | 63 |
| Tabela 6 | Valores médios de porosidade para os quatro tipos de madeira..... | 65 |
| Tabela 7 | Módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática para os quatro tipos de madeira | 66 |
| Tabela 8 | Valores médios de compressão para os quatro tipos de madeira | 68 |
| Tabela 9 | Caracterização química dos quatro tipos de madeira | 69 |
| Tabela 10 | Teor de sólidos, pH e viscosidade dos adesivos resorcinol e poliuretano..... | 71 |
| Tabela 11 | Valores médios de pH da madeira para as espécies de Caucho, Cedrão, Cedro Indiano e Eucalipto | 74 |
| Tabela 12 | Valores médios de cisalhamento seco e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função das espécies utilizadas | 78 |
| Tabela 13 | Valores médios de cisalhamento seco e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos dois tipos de adesivos | 80 |
| Tabela 14 | Valores médios de cisalhamento úmido e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos tipos de espécies utilizadas..... | 81 |
| Tabela 15 | Valores médios de cisalhamento úmido e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos dois tipos de adesivos | 82 |
| Tabela 16 | Valores médios de cisalhamento pós-fervura e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos tipos de madeiras..... | 84 |
| Tabela 17 | Valores médios de cisalhamento pós-fervura e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos dois tipos de adesivos..... | 85 |
| Tabela 18 | Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática para a madeira laminada colada (MLC) em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo | 86 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 19 | Valores médios do módulo de ruptura (MOR) à flexão estática para a madeira laminada colada (MLC) em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo | 87 |
| Tabela 20 | Valores médios de compressão (MPa) para a madeira laminada colada (MLC) em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo.. | 91 |
| Tabela 21 | Valores médios de delaminação (%) para a madeira laminada colada (MLC) avaliando o tipo de madeira..... | 93 |
| Tabela 22 | Valores médios de delaminação (%) para a madeira laminada colada (MLC) avaliando o adesivo | 94 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 | Objetivos específicos..... | 16 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1 | Madeira laminada colada | 17 |
| 3.2 | Fatores que afetam a qualidade da madeira laminada colada | 20 |
| 3.2.1 | Adesão e adesivos..... | 21 |
| 3.2.2 | Propriedades físico-químicas do adesivo | 24 |
| 3.2.2.1 | Tipos de adesivos utilizados | 26 |
| 3.2.2.1.1 | Resorcinol..... | 26 |
| 3.2.2.1.2 | Poliuretano à base de óleo de mamona | 28 |
| 3.2.3 | Espécies..... | 29 |
| 3.2.3.1 | <i>Cedrelinga catenaeformis</i> (Cedrao) | 30 |
| 3.2.3.2 | <i>Eucalyptus grandis</i> (Eucalipto) | 30 |
| 3.2.3.3 | <i>Castilla ulei</i> Warb. (Caucho)..... | 31 |
| 3.2.3.4 | <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> (Cedro Indiano)..... | 32 |
| 3.2.4 | Propriedades físicas..... | 33 |
| 3.2.4.1 | Densidade | 33 |
| 3.2.4.2 | Umidade..... | 34 |
| 3.2.5 | Propriedades anatômicas | 36 |
| 3.2.5.1 | Lenho inicial e lenho tardio | 36 |
| 3.2.5.2 | Cerne e alburno | 37 |
| 3.2.5.3 | Madeira juvenil e madeira adulta | 38 |
| 3.2.5.4 | Porosidade | 38 |
| 3.2.5.5 | Grã | 39 |
| 3.2.5.6 | Lenho de reação | 40 |
| 3.2.6 | Propriedades químicas | 40 |
| 3.2.6.1 | Extrativos e pH | 41 |
| 3.2.7 | Propriedades mecânicas..... | 41 |
| 3.3 | Caracterização da madeira laminada colada..... | 42 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS | 44 |
| 4.1 | Preparo e classificação da madeira | 44 |
| 4.2 | Caracterização do adesivo | 44 |
| 4.3 | Caracterização das propriedades das madeiras | 45 |
| 4.3.1 | Caracterização física | 45 |
| 4.3.2 | Caracterização química | 45 |
| 4.3.3 | Caracterização anatômica | 46 |
| 4.3.4 | Caracterização mecânica | 46 |
| 4.3.5 | Porosidade | 47 |

| | | |
|---------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.6 | Determinação do pH da madeira | 47 |
| 4.4 | Confecção da madeira laminada colada | 47 |
| 4.5 | Caracterização da madeira laminada colada | 48 |
| 4.5.1 | Avaliação não destrutiva | 48 |
| 4.5.2 | Caracterização mecânica | 49 |
| 4.5.3 | Ensaio de delaminação | 49 |
| 4.6 | Análise estatística | 50 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 51 |
| 5.1 | Caracterização da madeira | 51 |
| 5.1.2 | Caracterização anatômica | 51 |
| 5.1.2.1 | Descrição microscópica da madeira <i>Castilla ulei</i> Warb. | 51 |
| 5.1.2.2 | Descrição microscópica da madeira <i>Cedrelinga catenaeformis</i> | 52 |
| 5.1.2.3 | Descrição microscópica da madeira <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> | 54 |
| 5.1.2.4 | Descrição microscópica da madeira <i>Eucalyptus grandis</i> | 55 |
| 5.1.3 | Caracterização física | 57 |
| 5.1.4 | Caracterização mecânica | 66 |
| 5.1.5 | Caracterização química | 69 |
| 5.1.6 | Caracterização do adesivo | 71 |
| 5.1.7 | pH da madeira | 74 |
| 5.2 | Caracterização da madeira laminada colada | 75 |
| 5.2.1 | Relação entre o MOE e o MOR à flexão estática e o MOEd | 75 |
| 5.2.2 | Caracterização mecânica | 77 |
| 5.2.2.1 | Resistência ao cisalhamento seco na linha de cola | 77 |
| 5.2.2.2 | Resistência ao cisalhamento úmido na linha de cola | 81 |
| 5.2.2.3 | Resistência ao cisalhamento pós-fervura na linha de cola | 84 |
| 5.2.2.4 | Flexão estática | 86 |
| 5.2.2.5 | Resistência à compressão paralela às fibras | 91 |
| 5.2.2.6 | Ensaio de delaminação | 93 |
| 6 | CONCLUSÕES | 96 |
| | REFERÊNCIAS | 98 |
| | ANEXOS | 114 |

1 INTRODUÇÃO

Em função da disponibilidade e características físico-mecânicas, a madeira foi um dos primeiros materiais a ser utilizado pela humanidade. Mesmo após o aparecimento de materiais sintéticos ela continua a ser empregada como matéria-prima para inúmeros fins (JUVENAL; MATTOS, 2002).

Entre os diversos produtos obtidos da madeira é possível citar os produtos reconstituídos, sejam eles de partículas orientadas (OSB), de fibras de média densidade (MDF) ou os painéis de lâminas paralelas (LVL). Além desses materiais industrializados à base de madeira, a madeira laminada colada (MLC) deve ser observada com atenção especial, devido às suas propriedades extremamente favoráveis na execução de uma construção racionalizada e sustentável (GRANATO, 2011).

A MLC consiste na união de duas ou mais camadas de madeira pelo uso de um adesivo. As lâminas de madeira são selecionadas previamente e preparadas com suas fibras em direção paralela, no sentido de seu comprimento. A espessura máxima permitida das lâminas é de até 5 cm, podendo ser unidas por topo-base, borda-borda e face-face (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 1999).

Segundo Natterer (1991), uma das características da MLC é a versatilidade na obtenção de formas geométricas para elementos estruturais. Atualmente, como o setor de construção civil encontra-se em franca expansão, alguns elementos construtivos estão ganhando destaque. A MLC é um bom exemplo disso, sendo cada vez mais utilizada por apresentar, entre outras vantagens, boa resistência mecânica, possibilidade de ser produzida em grandes dimensões, excelente estética dada ao ambiente, redução de rachaduras e outros defeitos típicos de peças maciças de madeira, possibilidade de emprego de peças

de qualidade inferior em zonas menos solicitadas, a baixa relação peso/resistência e o bom desempenho sob a ação do fogo.

As estruturas geradas através das técnicas de colagem de madeira laminada dependem de diversos parâmetros, como o tipo e a quantidade apropriada de adesivo, a escolha apropriada da espécie de madeira (levando em conta densidade e propriedades mecânicas), a direção paralela das fibras das lâminas para a montagem da MLC e da umidade da madeira no momento da colagem (SANTOS; DEL MENEZZI, 2010).

Com relação ao tipo e quantidade apropriada de adesivo, os custos do adesivo tradicional equivalem a aproximadamente 30% do custo final da peça (PETRAUSKI, 2012). Segundo este autor, pode ser introduzido no mercado brasileiro, novos e mais baratos adesivos, a fim de diminuir os custos das estruturas de madeira e torná-las mais acessíveis a várias aplicações.

Para a confecção da madeira laminada colada, o adesivo resorcinol é o mais utilizado, porém há a busca por novos produtos que satisfaçam as exigências e que mantenha a qualidade final do produto.

As pesquisas atualmente estão direcionadas para a busca de adesivos naturais e renováveis, obtendo produtos que não sejam de origem petrolífera e que apresentem boa competitividade no mercado. Nesse contexto, alguns adesivos vêm sendo produzidos com o intuito de atender a esses aspectos e ao mesmo tempo manter a qualidade final do produto. Dentre esses adesivos, o poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona vem sendo considerado uma excelente alternativa, podendo atender às exigências para este produto.

Azambuja e Dias (2006) e Zangiácomo (2003) avaliaram a qualidade do adesivo à base de óleo de mamona na colagem de madeira laminada colada, obtendo bons resultados para as propriedades de rigidez, concluindo que este adesivo pode ser utilizado para manufatura de elementos estruturais.

Além da escolha adequada do adesivo, o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira permite uma melhor utilização desta como material estrutural, aplicando-a de maneira racional e correta nas edificações. No Brasil a diversidade de espécies de madeiras é significativa, demonstrando um forte potencial madeireiro a ser explorado (TELES, 2009). Ultimamente, as pesquisas a fim de elucidar as propriedades da madeira estão aumentando, porém, ainda há muito a se descobrir (APRILANTI, 2010; MORALES, 2005).

Sendo assim, a avaliação do tipo de adesivo e sua interação com as propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas de cada tipo de madeira, visa a adequar o processo produtivo para que o comportamento final da viga seja adequado para as diferentes condições as quais possam ser submetidas. O uso de espécies alternativas de madeira para a confecção da MLC implica na necessidade de estudos para o entendimento e a busca de processos adequados de produção para a obtenção de um produto final de qualidade.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral neste trabalho foi avaliar o uso de novas espécies de madeira para confecção de madeira laminada colada e a interação madeira/adesivo, utilizando resorcinol e poliuretano à base de óleo de mamona.

2.1 Objetivos específicos

Avaliar o efeito da anatomia e química da madeira sobre a colagem.

Avaliar o impacto das propriedades mecânicas da madeira nas propriedades da madeira laminada colada.

Avaliar o efeito do tipo de adesivo (resorcinol e poliuretano à base de óleo de mamona) na colagem e resistência da madeira laminada colada.

Avaliar o efeito da interação madeira-adesivo na qualidade final da madeira laminada colada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Madeira laminada colada

O termo madeira laminada colada (MLC), quando aplicada a elementos estruturais, refere-se ao material obtido a partir da colagem de topo e/ou de face de peças de madeira, na forma reta ou curva, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao eixo da peça, conforme Figura 1. As lâminas, de comprimento suficientemente grande, são obtidas por meio de emendas longitudinais de tábuas e podem ser coladas face a face e borda a borda para a obtenção da altura e largura desejada. Todos estes fatores oferecem uma grande variedade de escolhas no projeto, sujeitos somente a restrições econômicas envolvidas na produção e/ou uso (FIORELLI; DIAS, 2005).

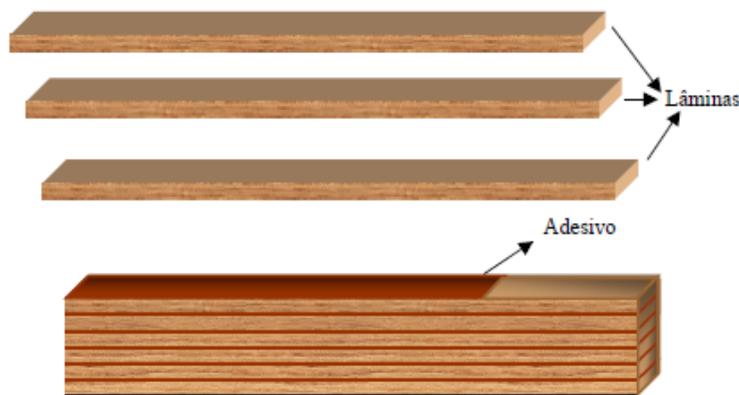


Figura 1 Madeira Laminada Colada
Fonte: Zangiácomo (2003)

As lamelas podem ser dispostas perpendicularmente ou paralelamente ao carregamento da viga, formando respectivamente as vigas laminadas horizontais

ou verticais. Cada lâmina pode conter emendas longitudinais e transversais utilizadas para obter maiores comprimentos e larguras (APRILANTI, 2010).

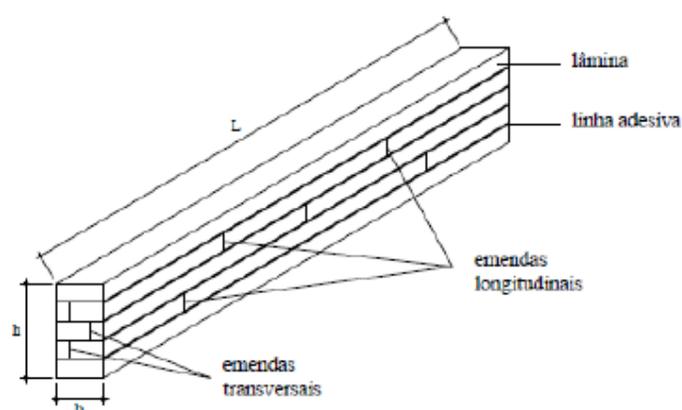


Figura 2 Emendas transversais e longitudinais
Fonte: Aprilanti (2010)

Segundo a The Engineered Wood Association – APA (2011), para a fabricação da MLC devem ser utilizadas peças individuais de alta resistência, baixa umidade, elevada resistência ao fogo, eficiência térmica e estabilidade dimensional. Este produto 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).

A madeira laminada colada tem seus usos mais frequentes em estruturas de cobertura, elementos estruturais principais para pontes, torres de transmissão, edifícios, embarcações, entre outros. Isso se deve ao fato de adaptar-se a uma significativa variedade de formas e apresentar alta resistência a solicitações mecânicas, em função de seu peso próprio relativamente baixo (ZANGIÁCOMO; LAHR, 2007).

Segundo Natterer (1991), a versatilidade da madeira laminada colada para obtenção das mais variadas formas geométricas para elementos estruturais,

é uma das características mais marcantes deste material. O autor cita as principais vantagens:

- a) facilidade na construção de grandes estruturas a partir de peças de dimensões comerciais;
- b) redução de rachaduras e outros defeitos típicos de peças maciças de madeira, com grandes dimensões;
- c) possibilidade de emprego de peças de qualidade inferior em zonas menos solicitadas, e de peças de melhor qualidade em zonas mais solicitadas, podendo-se combinar, assim, espécies distintas, desde que mantenham índices de retração distintos;
- d) possibilidade de aplicação de contraflechas durante o processo de fabricação;
- e) baixa relação peso/ resistência, não exigindo equipamentos potentes para içamento, bem como conduzindo a fundações com ações de menores intensidades;
- f) bom desempenho sob a ação do fogo, em razão de seções transversais avantajadas, e elevada resistência aos agentes corrosivos.

O princípio do processo de fabricação da MLC tem como objetivo melhorar as características das propriedades físicas e mecânicas dos elementos estruturais. Os processos são: 1) separação e classificação das lâminas; 2) secagem e acondicionamento; 3) união das emendas; 4) dimensionamento das lâminas; 5) aplicação do adesivo; 6) prensagem; 7) dimensionamento da viga; 8) teste de resistência da linha de cola; 8) aplainamento; 9) acabamento da viga (TELES, 2009).

A madeira laminada colada (MLC) é um produto industrializado que necessita ser testado em condições laboratoriais com a finalidade de avaliar a

qualidade da sua produção, dessa forma assegura-se que as propriedades da MLC (resistências à flexão, compressão, ao cisalhamento etc.) sejam adequadas com as propriedades mecânicas especificadas no projeto estrutural (DEGIOVANI; SEGUNDINHO; CALIL JÚNIOR, 2012).

O sucesso do uso das vigas laminadas coladas está intimamente ligado ao adesivo empregado na sua construção e a classificação das peças que serão distribuídas na estrutura. O adesivo deve possuir características de uma união resistente, estável e durável, mas não se devendo esquecer que essas características relacionam-se diretamente com as propriedades da madeira (CUNHA; MATOS, 2011b).

3.2 Fatores que afetam a qualidade da madeira laminada colada

A madeira é um material biológico altamente variável. Sua estrutura anatômica, propriedades físicas, químicas e mecânicas variam entre espécies, e até mesmo dentro de uma mesma árvore (IWAKIRI, 2005). Devido à natureza de sua fisiologia, segundo Dinwoodie (1981), a madeira é um material anisotrópico e higroscópico. Por ser um material anisotrópico, suas propriedades mecânicas dependem da direção de aplicação do esforço em relação às suas fibras e, por ser um material higroscópico, suas propriedades são muito influenciadas pela variação de seu teor de umidade.

Azambuja et al. (2004) relatam que, para a produção da MLC, devem ser empregadas espécies com densidade aparente compreendida entre 0,40 e 0,75g/cm³, e com umidade de 12%. Porém, para madeiras com esta umidade e com densidade superior a 0,75g/cm³, uma avaliação criteriosa do comportamento das juntas coladas deve ser feita. Os autores destacam ainda que deve ser evitada a composição com espécies diferentes, ou que apresentem diferentes coeficientes de retração.

Santos e Del Menezzi (2010) afirmam que a boa qualidade da MLC depende do tipo e da quantidade apropriada de adesivo, da espécie de madeira (levando em conta densidade e propriedades mecânicas), da direção paralela das fibras das lâminas para sua montagem e da umidade da madeira no momento da colagem.

3.2.1 Adesão e adesivos

A colagem é uma etapa fundamental para a moderna indústria de produtos da madeira, promovendo um aproveitamento mais racional da matéria-prima e que ultimamente vem se tornando uma necessidade, tanto pela tecnologia desenvolvida quanto pela escassez de madeira sólida (LIMA et al., 2008).

A adesão é um fator importante para a utilização dos recursos madeireiros e depende de fatores físicos, químicos e anatômicos da madeira, os quais controlam a habilidade do adesivo de aderir às suas superfícies. Entre os fatores que afetam a qualidade de adesão da madeira, podemos citar a densidade, a porosidade, o teor de umidade, composição química e o teor de extrativos (FOLLRICH et al., 2007).

Além das características da madeira, a qualidade de adesão também pode ser afetada pelo tipo de adesivo e outros fatores relacionados ao processo (tempo de cura, pressão de colagem, viscosidade, etc.) e condições de uso do produto colado (IWAKIRI, 2005; NASCIMENTO; GARCIA; DELLA LUCIA, 2013).

A adesão é a força por unidade de área com a qual o adesivo se liga à superfície, ou seja, é a força de união entre o adesivo e o substrato. A coesão é a força atrativa que surge entre moléculas do mesmo tipo, ou seja, é a interação entre moléculas que as mantêm unidas (CARNEIRO, 2010).

A adesão é um fenômeno físico-químico que provê um mecanismo de interação entre superfícies sólidas e uma segunda fase, que consiste de partículas individuais como moléculas, pequenas gotas, pó, etc., ou ainda de uma película contínua, líquida ou sólida (IWAKIRI, 2005). Oliveira (1998) menciona que a formação da ligação adesiva só pode ser desenvolvida quando as moléculas estão muito próximas de si. Por essa razão, aplica-se pressão sobre as superfícies das juntas a serem coladas, tanto para a colagem a frio como para a colagem a quente.

Segundo Carneiro, Vital e Pereira (2007), a formação de uma junta colada depende das ligações químicas e físicas desenvolvidas na linha de cola, conforme Figura 3. Watai (1987) cita que as principais teorias de adesão são classificadas como teoria mecânica, teoria da difusão de polímeros e teoria da adesão química.

A teoria da adesão mecânica se baseia no ancoramento do adesivo dentro de cavidades, poros e asperezas da superfície para ser o principal fator determinante da resistência adesiva. Na maioria dos casos, o aumento da adesão pela ligação mecânica pode ser atribuído simplesmente ao aumento da área interfacial devido à rugosidade da superfície e, no quanto as características do substrato irão permitir a penetração do adesivo nos poros e cavidades (SCHULTZ; NARDIN, 1994).

Iwakiri (1998) relata que na teoria de adesão de polímeros, a adesão ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros, a nível molecular. Na teoria de adesão química, a adesão ocorre pelas ligações primárias (iônicas ou covalentes) e/ou forças secundárias intermoleculares (IWAKIRI, 1998).

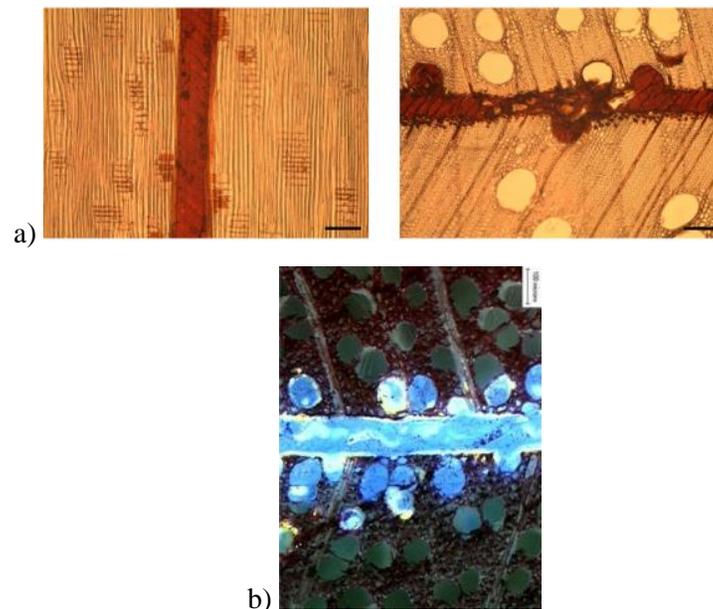


Figura 3 Interface madeira-adesivo. a) Fotomicrografia da interface madeira-adesivo nos planos longitudinal e transversal da madeira de *Eucalyptus grandis* colada com resorcinol. b) Zonas de encaixe da união de acordo com o modelo Marra

Fonte: a) Parra Serrano (2013); b) Frihart (2005)

Ferreira, Carrasco e Hellmeister (1988) afirmam que o adesivo é uma substância com capacidade de aderir fortemente dois substratos, fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo assim, a distância entre elas, gerando interações entre o adesivo e o substrato. Segundo Haubrich, Gonçalves e Tonet (2007), para que o resultado final da colagem seja eficiente e resistente, o adesivo deve ter capacidade de transferir tensões de um substrato para o outro sem, contudo, perder sua coesão.

A atual revolução tecnológica alcançada pelo setor moveleiro e madeireiro proporciona uma diversificação nas opções de uso de adesivos através da abertura de múltiplas possibilidades de eficácia e produtividade, que somadas ao crescente número de usos específicos, exigem conhecimento

altamente especializado para a escolha dos produtos e processos mais adequados às operações de colagem (HAUBRICH; GONÇALVES; TONET, 2007).

Os adesivos utilizados para colagem da madeira devem ser escolhidos de acordo com as condições climáticas de utilização da MLC. As classes de utilização são: I (uso interior); II (uso exterior coberta); III (uso exterior) (CALIL NETO, 2011; DIAS; AZAMBUJA; OLIVEIRA JÚNIOR, 2006).

Quanto ao tipo de adesivo, o resorcinol-formaldeído (RF) é o mais empregado para colagem de produtos de madeira que requerem alta resistência mecânica associada à sua durabilidade em ambientes externos (MARRA, 1992). Em razão do alto custo deste adesivo, chegando a 30% do valor total da madeira laminada colada (PETRAUSKI, 2012), alguns tipos de adesivos alternativos formulados, como por exemplo, a poliuretana à base de óleo de mamona que tem sido testada na produção de madeiras laminadas coladas. Este adesivo tem como vantagens a manipulação em temperatura ambiente, resistência à ação de água e de raios ultravioleta, resistência mecânica e de ser oriundo de um recurso natural e renovável, facilmente encontrado na maior parte do território nacional (JESUS, 2000).

3.2.2 Propriedades físico-químicas do adesivo

Algumas propriedades físico-químicas do adesivo afetam a colagem, tais como viscosidade, teor de sólidos e pH. Iwakiri (2005) define viscosidade como a resistência ao fluxo livre entre as camadas de uma matéria ou a grandeza que caracteriza a existência de atrito entre as moléculas de um fluido e que se manifesta através do escoamento. Assim, pode-se relacionar a fluidez de um líquido com a sua viscosidade. Altos valores de viscosidade não são desejáveis, uma vez que prejudica a qualidade da colagem por não conseguir distribuir uniformemente o adesivo sobre a madeira, causando penetração insuficiente na

sua estrutura, inutilizando a umectação e dando origem a uma linha de cola espessa. Porém, há uma maior penetração e absorção pela madeira ao utilizar adesivos com baixa viscosidade, sendo importante verificar estes valores extremos, o que pode resultar em linha de cola faminta ou absorção excessiva pela madeira (ALMEIDA, 2009).

Segundo Iwakiri (2005), o teor de sólidos é definido como a quantidade de sólidos que contêm no adesivo, também composto por uma porção líquida volátil, constituída por solventes orgânicos. O autor menciona que o conteúdo de sólidos atua no adesivo após a cura, na formação da linha de cola, que é responsável pela transferência de tensões através do sistema madeira-linha de cola-madeira, e da ligação entre os substratos. A velocidade com que ocorre a formação da película adesiva está relacionada com o teor de sólidos do adesivo (GARCIA; RECH, 2011), estando este na forma líquida para facilitar a aplicação e penetração na estrutura anatômica da madeira.

O pH do adesivo tem influência sobre a colagem, podendo reduzir a resistência da linha de cola (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975). Iwakiri, Keinert Júnior e Mendes (2005) atestam que o adesivo não deve ultrapassar os limites no mínimo 2,5 e de no máximo 11, o que poderia degradar as fibras da madeira. O pH da madeira pode também entrar em conflito com o pH do adesivo, no caso de apresentarem diferenças significativas, prejudicando assim a cura do adesivo. Outro efeito é a descoloração da madeira causada pela alcalinidade de alguns adesivos (MARRA, 1992). O controle do pH durante a produção do adesivo é uma das importantes funções do controle de qualidade, pois ele determina a velocidade e o grau das reações e as configurações das moléculas. O pH também determina a validade dos adesivos (MARRA, 1992).

A fim de manter um produto final de qualidade, Iwakiri (2005) relata que, além das características físico-químicas do adesivo, a formulação e quantidade de adesivo a ser aplicado em função da espécie, espessura da lâmina

e área superficial específica da madeira também tem importância fundamental no processo de colagem.

3.2.2.1 Tipos de adesivos utilizados

Dentro dos tipos de adesivos, o resorcinol já é comumente utilizado, enquanto que o poliuretano à base de óleo de mamona surge como uma alternativa promissora.

3.2.2.1.1 Resorcinol

O adesivo resorcinol é considerado de cura a frio (temperatura ambiente) e é usado principalmente na fabricação de laminados colados estruturais, emendas denteadas e outras estruturas para uso exterior feitas em madeira. Ele produz não só ligações de altas resistências mecânicas, mas também é resistente a água e a variações climáticas (PIZZI, 1994).

Sua comercialização é feita na forma líquida e o agente endurecedor deve ser adicionado pouco antes do seu uso, evitando o endurecimento rápido e a perda do material (CARNEIRO, 2010).

O resorcinol reage rapidamente com o formaldeído para produzir um adesivo do tipo novolak, o qual endurece em temperatura ambiente quando o formaldeído é adicionado (PIZZI, 1994). A hidroxila adicional no resorcinol faz com que a reação com o formaldeído seja mais rápida e apresente uma ligação melhor do que o fenol-formaldeído, esta ligação faz com que o resorcinol formaldeído tenha uma alta durabilidade a ambientes externos (DRESSLER, 1994).

Motta, Oliveira e Alves (2013) avaliaram a influência da umidade nas propriedades de adesão de duas espécies comerciais de eucalipto representadas

pelo híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e *Corymbia citriodora*. Foram utilizados os adesivos resorcinol e acetato de polivinila – PVA. As juntas unidas com o adesivo à base de resorcinol-formaldeído e acetato polivinila, tanto para a madeira do híbrido clonal *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, quanto para as juntas de madeira de *Corymbia citriodora*, apresentaram boa resistência ao cisalhamento.

Iwakiri et al. (2014) avaliaram a influência do tipo de adesivo, das gramaturas e dos tempos de prensagem sobre as propriedades mecânicas de vigas laminadas coladas, confeccionadas com madeira de teca (*Tectona grandis*). Foram utilizados adesivo à base de resorcina-fenol-formaldeído (RFF), com gramaturas de 350 e 450 g.m⁻², e tempos de prensagem de 5 e 8 horas; e adesivo à base de emulsão polimérica de isocianato (EPI), com gramaturas de 180 e 220 g.m⁻², e tempos de prensagem de 3 e 4 horas. O adesivo EPI, com gramatura de 180 g.m⁻², com o aumento no tempo de prensagem, resultou em maior resistência da linha de cola, porém o adesivo RFF apresentou, de forma geral, maior resistência da linha de cola em comparação ao adesivo EPI.

Almeida et al. (2014) estudaram a resistência ao cisalhamento de combinações de espécies-adesivo, utilizando madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) e *Lyptus*. Foram utilizados dois adesivos, bicomponente resorcinol e bicomponente melamina-ureia (MUF). A madeira de *Lyptus* apresentou maior resistência na linha de cola, tanto no tratamento seco, como úmido e à prova-d'água, quando comparada à madeira de Paricá. Para esta mesma madeira, *Lyptus*, o adesivo MUF apresentou valores superiores de resistência na linha de cola quando comparado ao adesivo resorcinol. A madeira de Paricá com adesivo MUF, de forma geral, não sofreu delaminação, enquanto que a madeira *Lyptus* apresentou valores de 3,86 cm e 2,30 cm, para os adesivos resorcinol e MUF, respectivamente.

3.2.2.1.2 Poliuretano à base de óleo de mamona

A mamona (*Ricinus communis*) é uma planta de clima tropical de grande potencial oleoquímico que pode fornecer polióis a partir de seus ácidos graxos (OHARA; KOJIMA; ROSSI, 1995). Sua utilização não se restringe apenas à produção de biodiesel, mas também a lubrificantes e fluidos aeronáuticos, farmacêuticos, fabricação de isolantes e tintas, entre outros (LOPES et al., 2011).

Dependendo da tecnologia empregada, a produtividade varia entre 850 e 4.000 kg/ha. O percentual de óleo está entre 40 e 50% e o rendimento entre 0,5 a 1 t/ha (OLIVEIRA, 2012). Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2015), na safra 2013/14, a produção nacional, foi estimada em 58.300 toneladas, com uma área colhida de 101.300 hectares.

Segundo Vilar (1993), o desenvolvimento dos poliuretanos derivados do óleo de mamona teve origem nos primeiros trabalhos propostos na década de 40. O óleo de mamona obtido da semente da planta é muito abundante no Brasil e é um líquido viscoso, obtido pela compressão das sementes ou por extração com solvente.

A partir do óleo de mamona é possível sintetizar polióis e pré-polímeros com diferentes características que quando misturados dão origem a um poliuretano (PUR). Esta mistura poliól e pré-polímero (à base de mamona), leva à reação de polimerização da mistura. Esta reação conduz à formação da poliuretana, podendo-se variar a porcentagem de poliól, bem como o emprego de catalisador adequado a fim de aumentar a velocidade da reação (DIAS, 2005).

O PUR na linha de cola tem como características a alta resistência mecânica à alta umidade e temperatura; o produto não agride o meio ambiente, pois é livre de solventes e exige menor consumo de água; e atende às normas internacionais de qualidade e resistência (CUNHA; MATOS, 2011a). Segundo

Garcia e Rech (2011), o adesivo PUR (Poliuretano Reativo à Umidade) apresenta alta eficiência na colagem de grandes peças de madeira, tais como: pontes, coberturas, vigas, portas, janelas, entre outras.

A competitividade do adesivo PUR em relação a outros polímeros existentes reside no fato de ser originário de matéria-prima natural e renovável, e por não ser agressivo ao homem e ao ambiente (DIAS et al., 2005).

A reação química do PUR durante o processo de colagem ocorre em duas fases. Inicialmente, ocorre uma mudança de estado físico de líquido para sólido e o adesivo assume comportamento termoplástico. Posteriormente, o grupo químico isocianato presente no adesivo reage com o grupo hidroxílico (OH) da madeira e com umidade do ar e da madeira e, assim produz uma estrutura reticular. Nesta segunda fase, o adesivo assume alta resistência a calor, frio e solventes (GARCIA; RECH, 2011). Sua capacidade de formar pontes de hidrogênio do grupo uretano e a polaridade dá aos adesivos de poliuretanos melhora a aderência a várias superfícies (GARCIA; RECH (2011).

Azambuja (2002) e Jesus (2000) obtiveram bons resultados ao avaliar a colagem de madeira laminada colada com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, indicando viabilidade de aplicação em materiais que necessitam de bom desempenho estrutural.

3.2.3 Espécies

A escolha das espécies para confecção da madeira laminada colada levou em consideração o potencial estrutural das madeiras e a ocorrência destas pelas regiões do Brasil.

3.2.3.1 *Cedrelinga catenaeformis* (Cedrao)

A *Cedrelinga catenaeformis* Ducke está entre as principais espécies da família *Fabaceae* (*Leguminosae Mimosoideae*) encontradas no Mato Grosso. Tem elevada importância comercial e são utilizadas na fabricação de compensados, móveis e adornos.

A espécie pode atingir até 40 m de altura e 2 m de diâmetro, com madeira leve a medianamente pesada, 0,47 g/cm³, cerne marrom-avermelhado ou cinza rosado, pouco destacado do alburno, que é mais claro (GONÇALEZ; GONÇALVEZ, 2001). Caracteriza-se por ser uma árvore de grande porte, fuste retilíneo, casca sulcada com 1,5 a 2 cm de espessura. É popularmente conhecida como cedro-mara, cedro-marítimo, cedrorana, cedro-alagoano, entre outros (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA, 1991). Apresenta grã quase sempre direita, mas a presença de grã entrecruzada não é incomum (GONÇALEZ; GONÇALVEZ, 2001).

De acordo com Loureiro, Silva e Alencar (1979), a madeira pode ser utilizada na construção civil, construção naval, setor de celulose e papel, setor moveleiro, produção de caixas, marcenaria e carpintaria.

3.2.3.2 *Eucalyptus grandis* (Eucalipto)

Os plantios de eucalipto no Brasil estão em franca expansão e o mercado para a produção florestal é cada vez mais promissor. Entre as principais espécies plantadas para fins comerciais, estão o *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. saligna*, *E. camaldulensis*, *E. globulus*, *E. dunnii* e *E. nitens* (CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA NO BRASIL, 2011).

O *Eucalyptus grandis* é utilizado para produção de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerado, combustível industrial e doméstico e produtos de

serraria (SOARES; CARVALHO; VALE, 2003). A área plantada de *Eucalyptus* no Brasil no ano de 2014 foi de 5,5 milhões (ha) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2015). Uma espécie que se desenvolve melhor em solos com boa retenção de água, profundos e argilosos. Destaca-se pelo rápido crescimento, apresentando insuperável crescimento volumétrico, com boa forma de fuste, pequena quantidade de casca e elevado percentual de cerne (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS - IBF, 2014),

De acordo com o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF (2014), o *Eucalyptus grandis* é pertencente à classe das dicotiledôneas e família *Myrtaceae*, com árvore muito alta (45 a 55m) e com 1,2 a 2m de diâmetro. Geralmente apresenta fuste liso, com a grã muitas vezes intercalada e textura fina a média. É uma madeira leve e de fácil trabalhabilidade, muito utilizada na Austrália e na República Sul Africana como madeira de construção.

3.2.3.3 *Castilla ulei* Warb. (Caucho)

Popularmente conhecida como caucho, caucho-negro, cálcio, borracheira, mulatinga, *black rubber* e *castilla ruber*, a espécie *Castilla ulei* Warb. pertence à família *Moraceae*, e sua maior ocorrência é no Brasil, principalmente nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia, além de poder ser encontrada em outros países, como Colômbia, Equador, México, Peru e Venezuela (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA, 2007 apud PSCHIEDT, 2007). Dessa madeira se extrai um látex utilizado para se fabricar borracha de qualidade inferior (FERREIRA, 1986).

Apresenta características gerais como madeira leve, cerne e albúrnio distintos, cor branca, anéis de crescimento distintos, grã reversa, textura média,

brilho moderado e cheiro imperceptível. A massa específica aparente é de 0,47 g/cm³ ((IBAMA, 2007 apud PSCHEIDT, 2007).

Com relação a sua durabilidade, é uma madeira que apresenta baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos) (IBAMA, 2007 apud PSCHEIDT, 2007).

3.2.3.4 *Acrocarpus fraxinifolius* (Cedro Indiano)

O *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. pertencente à família *Fabaceae*, subfamília *Caesalpinioideae*, tem como sinonímia botânica *Acrocarpus combretiflorus* Teysm. & Binn. e é popularmente conhecido por acrocarpo, mundane, árvore de ripa (LORENZI et al., 2003), cedro rosado e lazcar.

O *Acrocarpus fraxinifolius* produz madeira dura, de cerne avermelhado, utilizada em construção, mobiliário e produção de celulose (LORENZI et al., 2003). Apresenta rápido crescimento, sendo muito promissora para reflorestamentos (RAÍ, 1976). A árvore adulta é reta e atinge, em média, 15 a 20 m de altura e 30 a 50 cm de diâmetro. É candidata à produção de madeira de curta rotação (MAGHEMBE; PRINS, 1994), além de possuir requisitos fundamentais para o desenvolvimento de projetos financeiramente viáveis (MARTÍNEZ; GARCÍA, 2004). Em termos de produtividade, plantios experimentais no Brasil apresentaram um incremento médio de 14 a 45 m³/ha/ano, onde as regiões mais recomendadas para seu plantio são o norte do Paraná, sudeste e centro-oeste (CARVALHO, 1998).

A massa específica desta madeira apresenta variações de acordo com a idade, o local e a procedência, podendo-se encontrar valores, segundo a literatura, de 0,44 a 0,68 g/cm³ (CARVALHO, 1998; HONORATO et al., 2005; PRADO et al., 2003; SIMPSON, 1996; TRIANOSKI, 2010; WHITMORE;

OTAROLA, 1976), baixa estabilidade dimensional e boa resistência mecânica (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR, 2009). Apresenta fácil processamento e boa colagem (HONORATO et al., 2005).

3.2.4 Propriedades físicas

Dentre as propriedades físicas, a densidade e a umidade são os fatores que mais afetam a adesão (NASCIMENTO et al., 2002; PINCELLI; BRITO; CORRENTE, 2002; PROPERZI; PIZZI; UZIELLI, 2003; VAN RENSBURG, 1987; ZANGIÁCOMO, 2003).

3.2.4.1 Densidade

A densidade da madeira indica a quantidade aproximada de espaços vazios disponíveis para receber líquidos, como por exemplo, adesivos. Assim, quanto menor a densidade, maior será a permeabilidade de sua estrutura (HUNT, 1962). Também está diretamente relacionada com a sua porosidade, influenciando assim o grau de rugosidade e as funções de mobilidade, fatores determinantes na formação da ligação entre adesivo e substrato (CARNEIRO, 2010).

Desta forma, madeiras de massa específica elevada possuem um maior grau de dificuldade de adesão. Uma das razões é que este tipo de madeira possui menos espaços vazios (poros), e isto dificulta a penetração do adesivo no interior da madeira, diminuindo assim o ancoramento feito pelo adesivo e gerando um pequeno percentual da adesão mecânica (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). Quanto maior a dificuldade de penetração do adesivo na madeira, menor é adesão mecânica neste substrato (VICK, 1999).

Segundo Marra (1992) a densidade influencia a colagem sob dois aspectos. O primeiro é quanto à estabilidade dimensional da madeira. Quanto maior a sua densidade, maior será a sua alteração dimensional devido às mudanças na umidade e com isso aumentando a tensão exercida na linha de cola. A segunda influência é a quantidade de espaços vazios em função da densidade. Quanto maior a densidade, mais espessas as paredes das células e menor a quantidade de espaços vazios na madeira.

Nascimento, Garcia e Della Lúcia (2013) determinaram o efeito da densidade da madeira, do tipo de adesivo e da pressão de colagem na resistência ao cisalhamento de juntas coladas de quatorze espécies de madeira. As madeiras foram classificadas em três classes de densidade (Classe 1: menor que $0,55 \text{ g cm}^{-3}$; Classe 2: entre $0,55$ e $0,75 \text{ g cm}^{-3}$; e Classe 3: maior que $0,75 \text{ g cm}^{-3}$) e as juntas foram coladas com dois adesivos: acetato de polivinila (PVA) e ureia-formaldeído (UF), sob duas diferentes pressões de colagem: 6 e 12 kgf cm^{-2} . Os autores observaram que somente as madeiras das Classes 1 e 2 atingiram os valores requeridos pela norma ASTM 3110 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1994). A pressão de colagem de 12 kgf cm^{-2} foi a mais eficiente para as madeiras da Classe 3.

Segundo Shimoyama (1990), a densidade está relacionada a muitas propriedades e características tecnológicas fundamentais para a produção e utilização da madeira, sendo um dos parâmetros mais importantes entre as suas diversas propriedades físicas, pois afeta grande parte das suas demais propriedades.

3.2.4.2 Umidade

O teor de umidade é um importante fator para a colagem de madeira para todos os tipos de adesivos aplicados na indústria madeireira e móveis, como

os adesivos resorcinol, PVAc e poliuretanas, que reagem distintamente em relação ao conteúdo de umidade (LOPES, 2008).

O conteúdo de umidade da madeira e a umidade relativa do ambiente, em que está sendo processada a colagem, influencia na ligação madeira/adesivo (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; VICK, 1999). De acordo com Nock e Richter (1978), o adesivo tende a perder umidade mais rapidamente em contato com madeiras com baixa umidade, pois o adesivo tende a penetrar mais na madeira e se afastar da linha de cola. A influência da proporção de umidade da madeira na formação da ligação adesiva está relacionada com a quantidade e o ritmo de adsorção do adesivo líquido pela madeira. Quanto menor o conteúdo de umidade da madeira, maior será a taxa de absorção, velocidade de cura e solidificação do adesivo (IWAKIRI, 2005).

Marra (1992) relata que mudanças na umidade sempre causam alteração dimensional e conseqüentemente tensões na linha de cola. Silva et al. (1998) relatam que a maioria dos adesivos para madeira não forma uma linha de cola satisfatória em teores de umidade acima de 20%.

Segundo Azambuja et al. (2004) para a secagem das tábuas, deve-se tentar homogeneizar o teor de umidade das mesmas, evitando a ocorrência de defeitos que possam reduzir a qualidade da colagem. Os autores alertam que, no momento da colagem as tábuas adjacentes não devem possuir variação superior a 5% de umidade.

Segundo Tienne (2006), a faixa de umidade que proporciona melhor adesão é entre 6-14%. Uma formulação específica do adesivo deve ser feita quando os valores estão abaixo do valor mínimo. Os adesivos poliuretanos se comportam de maneira diferente, o teor mínimo de umidade da madeira recomendado para a colagem é 8%.

3.2.5 Propriedades anatômicas

As propriedades anatômicas da madeira possuem uma significativa influência na colagem, a exemplo da variabilidade na densidade e porosidade que ocorre em lenhos inicial e tardio, cerne e alburno, e lenho juvenil e adulto (IWAKIRI, 1998). A influência da anatomia da madeira no processo de colagem está relacionada à sua estrutura no que se refere às diferenças de dimensões dos elementos celulares, tamanho, disposição e frequência das cavidades celulares (MARRA, 1992; PIZZI, 1994).

A maior penetração do adesivo na madeira se dá, principalmente, por meio dos elementos estruturais que desempenham, primordialmente, a função de condução no lenho. Nesses, aspectos anatômicos como tamanho, abundância, distribuição dos poros e a presença ou não de substâncias obstrutoras (gomos resinas, óleos, tilos) influenciam no grau de permeabilidade, podendo dificultar o processo de colagem (BURGER; RICHTER, 1991).

3.2.5.1 Lenho inicial e lenho tardio

Cada árvore apresenta um padrão de crescimento, o que resulta nas diferenças entre as espécies. Durante a estação de crescimento, formam-se diferentes tipos e tamanhos de células, dependendo da demanda geneticamente conduzida, que sofre alterações ao longo do tempo. Então, são formados anéis de crescimento, onde células com paredes mais finas são encontradas no lenho inicial, e células com paredes mais espessas no lenho tardio. Estes anéis resultantes devem ser largos ou estreitos, além de possuir diferentes proporções entre lenho tardio e inicial, dependendo das condições de crescimento, tais como: água; temperatura; nutrientes; idade; insetos; sol; vento e competição (MARRA, 1992).

Segundo Magalhães (2004), a permeabilidade depende da posição no tronco da árvore, assim como se a madeira é de lenho inicial ou lenho tardio. Nas coníferas, o lenho inicial geralmente é mais permeável do que o lenho tardio, por apresentar células de maior diâmetro e paredes mais delgadas (AMARAL, 1967). Nas folhosas, a permeabilidade depende do número de poros por unidade de área, da sua distribuição e da ocorrência ou não de tiloses (TSOUMIS, 1991).

A estrutura diferenciada dos anéis de crescimento pode ocasionar problemas relativos à penetração de adesivos à linha de cola “faminta” ou “espessa”, o que é contornável pela alteração na formulação do adesivo (IWAKIRI, 2005). Franklin Adhesives (2003) menciona que quanto maior a viscosidade, maior a dificuldade de espalhamento, menor as propriedades de umectação e menor a penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira, resultando numa linha de cola mais espessa. Com relação a menor viscosidade, ocorre maior penetração do adesivo e absorção pela madeira, resultando em uma linha de cola faminta.

3.2.5.2 Cerne e alburno

O alburno é a parte da árvore que apresentam as células ainda com funções fisiológicas. Depois que morrem, as células que já foram alburno, se transformam em cerne, e ficam impregnadas com materiais estranhos como óleos, ceras e compostos fenólicos derivados do decorrer de sua função vital. Estes materiais mudam a coloração da madeira, a permeabilidade, sua umidade de equilíbrio, sua contração e inchamento, sua massa específica e conseqüentemente as propriedades de colagem (MARRA, 1992).

O cerne, em relação ao alburno, é menos permeável, possuindo maiores dificuldades na secagem e na absorção de produtos, como adesivos (BURGER;

RICHTER, 1991). De acordo com Selbo (1975), o cerne apresenta maior densidade, porosidade e concentração de extrativos que o alburno, podendo ser prejudicial à colagem. Com relação ao pH e extrativos presentes na madeira, Marra (1992) afirma que esses parâmetros podem ter influência direta na cura do adesivo, e que madeiras com elevados teores de extrativos apresentam dificuldades de colagem.

3.2.5.3 Madeira juvenil e madeira adulta

A madeira juvenil ocorre na região central da árvore e apresenta a forma de um cilindro, com diâmetro quase uniforme, desde a base até o topo da árvore (EVANS et al., 2000; MEGRAN, 1985).

A presença de madeira juvenil, por sua menor densidade, menor porcentagem de lenho tardio e elementos fibrosos de menor comprimento com paredes mais finas, com menor conteúdo de celulose, também pode interferir no processo de adesão (VITAL; MACIEL; DELLA LUCIA, 2006). Marra (1992) relata que a madeira juvenil apresenta facilidade para processar a colagem, devido à sua baixa densidade e estrutura porosa.

A madeira juvenil é formada por anéis de crescimento mais largos, com menor resistência mecânica e contração e inchamento mais pronunciados no sentido longitudinal, em comparação com a madeira normal, e podem gerar tensões na linha de cola. Essas variações podem afetar a mobilidade do adesivo e influenciar a sua cura (VITAL; MACIEL; DELLA LUCIA, 2006).

3.2.5.4 Porosidade

A porosidade se relaciona com a densidade que influencia na penetração dos adesivos na madeira (IWAKIRI, 1998).

A porosidade e a permeabilidade afetam grandemente a adesão. A adesão mecânica depende principalmente da disposição de espaços vazios para que haja uma penetração do adesivo dentro da madeira e que estes espaços estejam desbloqueados, permitindo assim, depois da cura, uma fixação do adesivo por ancoramento. Penetração excessiva em maiores profundidades pode gerar uma ligação fraca (TIENNE, 2006).

Zangiácomo (2003) ressalta que é necessário avaliar a compatibilidade entre a madeira e o adesivo a ser utilizado, relacionando a porosidade da espécie aos adesivos. Segundo Santos e Del Menezzi (2010), ao melhorar a compatibilidade entre as madeiras e o adesivo, pode aumentar os valores de resistência ao cisalhamento e falha na madeira, permitindo diferentes aplicações para o produto final.

3.2.5.5 Grã

De acordo com Albuquerque e Latorraca (2005), os efeitos de grã na formação adesiva envolvem, principalmente, a porosidade que ocorre em diferentes planos de corte. Grãs muito irregulares provocam excessiva penetração do adesivo, ao contrário, madeiras com estrutura muito fechada e superfícies lisas provocam uma deficiência na penetração do adesivo. Em ambos os casos a ligação adesiva com o substrato será comprometida.

Matos (1997) relata que a inclinação excessivamente alta é indesejável, pois a madeira se torna mais frágil e tem uma maior tendência para distorção, além de que o efeito da inclinação da grã sobre as propriedades de resistência é maior em membros estruturais do que em pequenos corpos de prova.

Segundo River (1994), o desvio da grã afeta a resistência ao cisalhamento da junta de cola. Se a direção da grã apresentar a mesma direção da força aplicada, esta resistência será maior. Este efeito é devido à disparidade

entre as forças de tração e compressão da madeira e à penetração do adesivo. A penetração do adesivo na madeira de forma profunda é mais provável quando a direção da grã não é paralela à superfície.

Em madeiras de grã cruzada pode ocorrer linha de cola “faminta” e a grã diagonal apresenta alterações dimensionais difusas que afetará a qualidade final do produto (PINTO, 2011).

3.2.5.6 Lenho de reação

O lenho de reação é um tipo de lenho diferenciado, que se forma nos lados inferiores dos ramos e nos troncos tortuosos inclinados das coníferas ou nos lados superiores de estruturas semelhantes de folhosas (ESAU, 1974).

O lenho de reação das folhosas, chamado de lenho de tração, caracteriza-se por alto conteúdo de celulose e baixo conteúdo de lignina, quando comparado com o lenho normal (BAILLÉRES et al., 1997). Já o lenho de reação das coníferas é chamado lenho de compressão, formando anéis de crescimento excêntricos, que parecem conter uma proporção maior de lenho tardio na região de crescimento rápido (PANSIN; DE ZEEUW, 1980).

Segundo Albuquerque e Latorraca (2005), este tipo de madeira não apresenta dificuldade na colagem, mas sua instabilidade é uma fonte de tensões nos produtos colados, produzindo efeitos adversos em sua estabilidade.

3.2.6 Propriedades químicas

Dentro das propriedades químicas, os extrativos e pH podem interferir no processo de colagem.

3.2.6.1 Extrativos e pH

Quanto aos extrativos da madeira, sua presença, quantidade e tipo afetam a adesão. Pesquisas têm mostrado que os extrativos na superfície da madeira são os principais contribuidores da inativação da superfície, gerando assim um pobre umedecimento do adesivo, especialmente em espécies resinosas como, por exemplo, o Pinus. Durante o processo da cura ou secagem, que utiliza temperaturas elevadas, os extrativos tendem a migrar para a superfície onde eles se concentram e fisicamente bloqueiam o contato do adesivo com a madeira. Isto evita o ancoramento do adesivo após a cura, gerando uma fraca ligação mecânica. Além disso, resinas e exudados oleosos são hidrofóbicos, ou seja, repelem a água (TIENNE, 2006). Os adesivos utilizados em madeira, na sua maioria, usam a água como carregador, gerando assim problemas de umedecimento, fluxo e penetração na superfície coberta pelo extrativo (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; SKEIST, 1990).

Outra influência do extrativo se dá na alteração do pH da superfície da madeira. Quando os extrativos depositados na superfície são de caráter ácido estes podem interferir na cura de um adesivo alcalino, acelerando assim uma polimerização prematura e reduzindo o umedecimento, fluxo e penetração do adesivo (TIENNE, 2006), conseqüentemente afetando a qualidade da MLC.

3.2.7 Propriedades mecânicas

Como já mencionado, a madeira é um material biológico altamente variável. Sua estrutura e suas propriedades físicas, químicas e mecânicas variam entre espécies, e até mesmo dentro de uma mesma árvore (IWAKIRI, 2005).

Segundo Albuquerque e Latorraca (2000), vários fatores influenciam a qualidade da MLC como, por exemplo, a variabilidade anatômica da madeira.

Esta característica associada à densidade e à porosidade, também relacionada à frequência de vasos, promove maior penetração do adesivo, formando uma ligação adesivo-substrato mais forte (SCHULTZ; NARDIN, 1994), influenciando as propriedades mecânicas, podendo diminuir os valores obtidos para os módulos de elasticidade e ruptura à flexão estática.

Outro fato importante, mencionado por Zangiácomo (2003), é que a escolha das lâminas influencia diretamente nas propriedades de rigidez das vigas. O autor menciona que vigas com distribuição não aleatória apresentarão propriedades de rigidez superiores em relação àquelas vigas distribuídas aleatoriamente.

3.3 Caracterização da madeira laminada colada

A utilização de novas espécies e a possibilidade de inserção em novos produtos favorece a realização de ensaios específicos para cada tipo de material. Esses testes, submetendo os corpos de prova a experiências que simulem esforços extremos em condições reais, possibilitam o conhecimento das propriedades do material, que poderá torná-lo adequado ou não ao uso, gerando um padrão de qualidade superior. A utilização eficiente de estruturas de qualquer material depende, principalmente, da compreensão do seu comportamento mecânico. Assim, a determinação das propriedades mecânicas na madeira, como elasticidade e resistência, deve ser feita de forma criteriosa, pois se trata de um material heterogêneo (KRETSCHMANN, 2010).

Os ensaios realizados, a princípio na matéria-prima e, posteriormente no produto acabado, são a base para a obtenção de um produto de qualidade e dentro das normas pré-estabelecidas. Porém, há uma escassez de trabalhos e pesquisas que simulam sua utilização em MLC, quando utilizadas novas espécies.

Neste trabalho, a caracterização da madeira e do produto final, foi conduzida de forma a submetê-los a diversos ensaios que simulem sua utilização estrutural.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Preparo e classificação da madeira

Para a confecção da MLC foram utilizadas as espécies *Castilla ulei* Warb. (Caucho), *Cedrelinga catenaeformis* (Cedrão), *Acrocarpus fraxinifolius* (Cedro Indiano) e *Eucalyptus grandis* (Eucalipto), e as madeiras foram levadas para a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM), localizada na Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras - Minas Gerais, onde foram aplainadas e posteriormente foram retiradas lâminas de 1200 mm de comprimento, 65 mm de largura e 20 mm de espessura.

Estas lâminas passaram por classificação visual para descarte de peças com nós ou falhas, segundo as recomendações da norma ASTM D245 (ASTM, 2006). Passaram também por classificação mecânica por meio da avaliação da frequência de vibração, mediante a utilização do equipamento *Sonelastic*, para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd). Os valores obtidos para o MOEd foram utilizados para classificar e distribuir as lâminas para posterior colagem. As lâminas com os maiores módulos de elasticidade dinâmicos foram dispostas nas faces, enquanto as lâminas com menores valores foram utilizadas no miolo. Segundo Natterer (1991), peças de qualidade inferior podem ser utilizadas em zonas menos solicitadas.

4.2 Caracterização do adesivo

Foram utilizados os adesivos resorcinol Cascophen RS 216-M, doado pela empresa Hexion Química Indústria e Comércio Ltda., situada na cidade de Curitiba/PR, e o poliuretano à base de óleo de mamona, doado pela empresa Cequil Central de Industrialização e Desenvolvimento de Polímeros Ltda.,

situada na cidade de Araraquara/SP, para a colagem das lâminas e confecção da MLC.

Estes adesivos foram caracterizados quanto ao teor de sólidos e pH, de acordo com a norma ASTM D1582 (ASTM, 1998), e viscosidade (Copo Ford nº 8).

4.3 Caracterização das propriedades das madeiras

Para avaliar as madeiras foram realizadas caracterizações física, química, anatômica, mecânica, porosidade e determinação do pH.

4.3.1 Caracterização física

Para a caracterização física das espécies utilizadas foram determinadas a densidade aparente, densidade básica, umidade, retração tangencial e radial até 12%, de 12% a 0% e total, e coeficiente de anisotropia, segundo especificações da norma NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997).

4.3.2 Caracterização química

Para a análise dos constituintes químicos da madeira foi utilizada a serragem obtida pelo processamento da madeira em um moinho Willy. O material utilizado foi aquele que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh. Após o material ser acondicionado na temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 5 % foram determinados os seus teores de lignina - NBR 7989 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2010), extrativos totais - NBR 14853 (ABNT, 2010), cinzas - NBR 13999

(ABNT, 2003) e holocelulose (obtida pela diferença $H (\%) = 100 - \% \text{ lignina} - \% \text{ Extrativos totais} - \% \text{ cinzas}$).

4.3.3 Caracterização anatômica

De cada espécie foram retirados corpos de prova nas dimensões de 30 x 20 x 20 mm (nos planos longitudinal, radial e tangencial, respectivamente), sendo, posteriormente realizado o preparo dos cortes histológicos em micrótomo para a confecção de lâminas permanentes. Para a dissociação de seus elementos anatômicos foi realizado o processo de maceração. O preparo das lâminas seguiu a metodologia descrita por Burger e Richter (1991).

A projeção dos cortes nas seções transversal, tangencial e radial foi estudada pela análise direta no microscópio e com o auxílio de um projetor de imagens para observação dos elementos anatômicos, como vasos, raios, fibras e parênquima. Esta caracterização anatômica microscópica de cada espécie foi analisada seguindo os procedimentos descritos por Dadswell (1972) e pelas normas da Comissão Panamericana de Normas Técnicas – COPANT (1974) e *International Association of Wood Anatomists* – IAWA (1989).

4.3.4 Caracterização mecânica

Foi avaliada a caracterização mecânica de cada espécie por meio da realização dos ensaios de compressão paralela às fibras, cisalhamento, módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática. Todos os ensaios foram realizados segundo especificações da norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.3.5 Porosidade

A porosidade da madeira foi calculada por meio da fórmula proposta por Mac Lean (1952), a qual estabelece que a porosidade está em função da densidade e do teor de umidade da madeira, conforme equação 1.

$$P_m = 1 - \text{DENS}_{fv} (0,667 + 0,01 * \text{TU}_{fv}) * 100 \quad (1)$$

Em que:

P_m : porosidade da madeira (%);

DENS_{fv} : densidade aparente da madeira (g/cm^3);

TU_{fv} : teor de umidade da madeira.

4.3.6 Determinação do pH da madeira

O pH das madeiras foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Lelis (1995). O material foi fragmentado em palitos de madeira, moído em um moinho de facas e seco em estufa a 102 ± 2 °C durante 24 h.

A partir do material seco, 5 gramas de madeira foram pesados e imersos em água destilada por 24 h. Em seguida, o material foi filtrado, obtendo-se uma solução na qual determinou-se o pH. Foram realizadas 3 repetições para cada amostra de cada tratamento.

4.4 Confeção da madeira laminada colada

Para a produção da madeira laminada colada foram utilizadas três lâminas de 1200 mm de comprimento, 65 mm de largura e 20 mm de espessura, classificadas de acordo com o valor do MOEd. Lâminas com valores superiores

foram utilizadas nas faces e lâminas com valores inferiores no miolo. Para cada tratamento, conforme Tabela 1, foram confeccionadas três vigas. Os adesivos, na gramatura de 350 g/m², foram aplicados manualmente em cada lâmina e, para a fase de cura do adesivo, cada MLC foi prensada em uma prensa manual, com auxílio de um torquímetro, com pressão de 1 MPa por um período de 24 h.

Tabela 1 Delineamento experimental

| Tratamento | Madeira | Adesivo |
|-------------------|----------------|----------------|
| CR | Cedão | Resorcinol |
| CP | | Poliuretano |
| ER | Eucalipto | Resorcinol |
| EP | | Poliuretano |
| CHR | Caucho | Resorcinol |
| CHP | | Poliuretano |
| CIR | Cedro Indiano | Resorcinol |
| CIP | | Poliuretano |

4.5 Caracterização da madeira laminada colada

Para avaliar a madeira laminada colada foram realizadas as avaliação não destrutiva, caracterização mecânica e ensaio de delaminação.

4.5.1 Avaliação não destrutiva

Após a confecção da madeira laminada colada, foi realizada a avaliação não destrutiva de cada viga de cada tratamento. Este ensaio foi realizado por meio da avaliação da frequência de vibração, mediante a utilização do equipamento *Sonelastic* para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico

(MOEd), que foi confrontado com os valores do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) obtidos pelo ensaio de flexão estática.

4.5.2 Caracterização mecânica

Para a avaliação da madeira laminada colada foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática, compressão paralela às fibras e cisalhamento seco, úmido e pós-fervura, de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.5.3 Ensaio de delaminação

A delaminação é o descolamento das lamelas, coladas lateralmente ou face a face. Este teste mostra o comportamento da cola com as espécies de madeira utilizadas.

O ensaio de delaminação é descrito, segundo as recomendações da Norma American Institute Of Timber Construction 110 – AITC (2007), como a avaliação de adesivos para uso estrutural de produtos de madeira expostos ao ambiente exterior.

Não foi possível seguir as recomendações da norma AITC 110 (2007) para o ensaio de delaminação, pois ao realizar os procedimentos para efetuar os testes de cisalhamento úmido e pós-fervura, foi observado um descolamento das lâminas de algumas espécies e adesivos. Sendo assim, foi desenvolvida uma metodologia para avaliação deste ensaio.

O ensaio foi realizado em três ciclos, sendo que, em cada ciclo as amostras permaneceram 8 horas imersas em água e, posteriormente 16 horas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C. Após a realização do ensaio, foi verificado o comportamento da MLC exposta ao exterior, avaliando a

porcentagem de delaminação, que foi obtida nas duas faces de topo dos corpos de prova. Para a verificação da porcentagem, foi obtido o comprimento de cada linha de cola em que ocorreu delaminação e, este será dividido pelo comprimento total da linha de cola, conforme equação 2.

$$\text{Del} = (\text{CompDel} / \text{CompTotal}) * 100 \quad (2)$$

Em que:

Del = Delaminação (%);

CompDel = Comprimento em que ocorreu a delaminação (cm);

CompTotal = Comprimento total da linha de cola (cm).

4.6 Análise estatística

As propriedades foram avaliadas em um delineamento inteiramente casualizado. Para a avaliação das propriedades dos adesivos, físicas, mecânicas, anatômicas e química, foi realizada uma análise de variância e teste de média Scott-Knott, ambos a 5% de significância. Para a avaliação das propriedades das vigas (propriedades mecânicas e ensaio de delaminação), os dados foram arranjados em esquema fatorial 4x2 (quatro tipos de madeira – Cedrão, Eucalipto, Caucho e Cedro Indiano; e dois tipos de adesivos – Resorcinol-formaldeído e poliuretano), sendo realizada análise de variância e teste de Scott-Knott, ambos a 5% de significância. Para o teste não destrutivo das vigas foi realizada análise de variância e regressão a 5% de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da madeira

Os resultados obtidos para a caracterização da madeira estão dispostos abaixo.

5.1.2 Caracterização anatômica

Para a caracterização anatômica foi realizada a descrição microscópica das madeiras de Caucho, Cedrão, Cedro Indiano e Eucalipto, que estão a seguir.

5.1.2.1 Descrição microscópica da madeira *Castilla ulei* Warb.

Camadas de crescimento: distintas devido ao espessamento da parede das fibras. **Vasos:** porosidade difusa, dispostos em arranjo radial; agrupamento dos vasos predominam os vasos múltiplos com 64,29%, sendo que 27,86% são germinados, 13,93% múltiplos de 3, 17,14% múltiplos de 4 e 5,36% múltiplos de 5, ocorrendo também solitários com 35,71%. Frequência apresenta valores de 4,0 mm² a 13,00 mm², com uma média de 9,33 mm² e desvio padrão de 2,14 mm²; diâmetro tangencial do lúmen variando de pequeno 172,47 µm a médios 368,31 µm, com predominância de médios 239,32 µm, e desvio padrão de 38,86 µm; contorno arredondado; comprimento variando de 365,95µm a 576,99µm, média de 476,79 µm, e desvio padrão de 64,70 µm; placa de perfuração simples e apêndice presente em uma das extremidades dos vasos, podendo também ser encontrada em ambas as extremidades; vasos desobstruídos; pontuações intervasculares e raiovasculares em disposição alterna, podendo ocorrer também escalariformes, de formato arredondado. **Parênquima axial paratraqueal:**

vasicêntrico. **Parênquima axial apotraqueal:** difuso. **Fibras:** comprimento variando de 1004,39 μm a 1871,27 μm , média muito curta 1469,23 μm e desvio padrão de 231,56 μm ; fibras com paredes delgadas a espessas, média de 3,11 μm variando de 2,03 μm a 6,25 μm e desvio padrão 0,96 μm ; diâmetro do lúmen média de 15,64 μm variando de 10,59 a 29,78 a μm , e desvio padrão de 3,70 μm . **Raios:** parênquima radial heterogêneo do tipo II, corpo do raio composto de células procumbentes e uma camada de células marginais e laterais quadradas; raios multisseriados estreitos com (65,51 μm) de espessura, variando de 36,14 a 102,45 μm , desvio padrão de (15,15 μm); comprimento extremamente baixo com altura média de (0,74 mm), sendo extremamente baixos, mínimo de 0,43mm, máximo 1,48 mm e desvio padrão de 0,20 mm; e raios mais largos, variando de 4 a 10 células de largura; frequência de 3,00 a 8,00 raio por mm/linear, média de 5,43 mm e desvio padrão de 1,19mm.

Na Figura 4 estão ilustrados os planos de corte da madeira de Caucho obtidos após a preparação das lâminas permanentes.



Figura 4 Planos de corte da madeira de Caucho a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm)

5.1.2.2 Descrição microscópica da madeira *Cedrelinga catenaeformis*

Camadas de crescimento: indistintas. **Vasos:** porosidade difusa, dispondo em arranjo tangencial; agrupamento dos vasos predominam os vasos

múltiplos com 62,28%, sendo que 31,72% são germinados, 18,57% múltiplos de 3, 6,19% múltiplos de 4 e 5,80% múltiplos de 5, ocorrendo também solitários com 37,72%. Frequência apresenta valores de 10,0 mm² a 32,00 mm², com uma média de 17,23 mm² e desvio padrão de 4,06 mm²; diâmetro tangencial do lúmen variando de pequeno 112,77 µm a médios 203,57 µm, com predominância de médios 155,25 µm, e desvio padrão de 20,47 µm; contorno arredondado; comprimento variando de 242,27µm a 462,53µm, média de 329,69 µm, e desvio padrão de 71,05 µm; placa de perfuração simples e apêndice presente em uma das extremidades dos vasos, podendo também ser encontrada em ambas as extremidades; vasos desobstruídos; pontuações intervasculares e raiovasculares em disposição alterna. **Parênquima em faixas:** estreitas ou linhas com até três células de largura. **Parênquima axial com células tipo/*strand length*:** 3 a 4 células por *strand* de parênquima. **Fibras:** comprimento variando de 1222,86 µm a 2002,92 µm, média muito curta 1670,86 µm e desvio padrão de 229,31 µm; fibras com paredes delgadas a espessas, média de 2,44 µm variando de 1,36 µm a 4,03 µm e desvio padrão 0,74 µm; diâmetro do lúmen média de 15,49 µm variando de 9,02 a 20,12 µm, e desvio padrão de 2,81 µm. **Raios:** parênquima radial heterogêneo, corpo do raio composto de células procumbentes e uma camada de células marginais e laterais quadradas; devido ao grande tamanho do raio, não foi possível mensurar seu comprimento e largura; altura do raio maior que 1mm; raios de dois tamanhos distintos; largura dos raios menores com 1 a 3 células; raios maiores com porção multisseriada tão longa quanto a unisseriada; frequência de 0,00 a 5,00 raio por mm/ linear, média de 1,73 mm e desvio padrão de 1,11mm.

Na Figura 5 estão ilustrados os planos de corte da madeira de Cedrão obtidos após a preparação das lâminas permanentes.

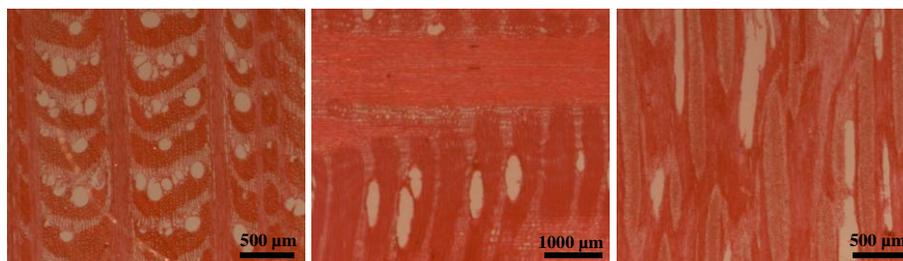


Figura 5 Planos de corte da madeira de Cedrão. a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm)

5.1.2.3 Descrição microscópica da madeira *Acrocarpus fraxinifolius*

Camadas de crescimento: distintas devido ao espessamento da parede das fibras. **Vasos:** porosidade difusa, dispendo em arranjo radial; agrupamento dos vasos predominam os vasos múltiplos com 62,31%, sendo que 31,45% são germinados, 20,47% múltiplos de 3, 5,93% múltiplos de 4 e 4,45% múltiplos de 5, ocorrendo também solitários com 37,69%. Frequência apresenta valores de 6,0 mm^2 a 18,00 mm^2 , com uma média de 11,23 mm^2 e desvio padrão de 2,76 mm^2 ; diâmetro tangencial do lúmen variando de pequeno 140,2 μm a médios 350,82 μm , com predominância de médios 234,45 μm , e desvio padrão de 42,38 μm ; contorno arredondado; comprimento variando de 170,38 μm a 596,45 μm , média de 365,41 μm , e desvio padrão de 99,53 μm ; placa de perfuração simples e apêndice presente em uma das extremidades dos vasos, podendo também ser encontrada em ambas as extremidades; vasos desobstruídos; pontuações intervasculares e raiovasculares em disposição opostas. **Parênquima axial paratraqueal:** aliforme e com aletas finas. **Parênquima em faixas:** estreitas. **Fibras:** comprimento variando de 1037,45 μm a 2009,27 μm , média muito curta 1573,82 μm e desvio padrão de 234,69 μm ; fibras com paredes delgadas a espessas, média de 2,81 μm variando de 1,53 μm a 4,68 μm e desvio padrão

0,68 μm ; diâmetro do lúmen médio de 14,79 μm variando de 8,84 a 25,83 μm , e desvio padrão de 3,72 μm . **Raios:** parênquima radial heterogêneo, corpo do raio composto de células procumbentes e uma camada de células marginais e laterais eretas; raios multisseriados estreitos com (51,76 μm) de espessura, variando de 36,27 a 69,28 μm , desvio padrão de (8,15 μm); comprimento extremamente baixo com altura média de (0,40 mm), sendo extremamente baixos, mínimo de 0,21mm, máximo 0,55 mm e desvio padrão de 0,09 mm; e raios mais largos, variando de 4 a 10 células de largura; frequência de 3,00 a 9,00 raio por mm/linear, média de 5,40 mm e desvio padrão de 1,48mm.

Na Figura 6 estão ilustrados os planos de corte da madeira de Cedro Indiano obtidos após a preparação das lâminas permanentes.



Figura 6 Planos de corte da madeira de Cedro Indiano. a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm)

5.1.2.4 Descrição microscópica da madeira *Eucalyptus grandis*

Camadas de crescimento: distintas devido ao espessamento da parede das fibras. **Vasos:** porosidade difusa, dispendo em arranjo tangencial; agrupamento dos vasos. Predominam os vasos múltiplos com 69,16%, sendo que 25,75% são germinados, 31,44% múltiplos de 3, e 5,99% múltiplos de 4 e 5, ocorrendo também solitários com 30,84%. Frequência apresenta valores de 6,0 mm^2 a 17,00 mm^2 , com uma média de 11,13 mm^2 e desvio padrão de 3,13 mm^2 ;

diâmetro tangencial do lúmen variando de pequeno 142,04 μm a médio 264,96 μm , com predominância de médios 217,26 μm , e desvio padrão de 31,69 μm ; contorno arredondado; comprimento variando de 213,98 μm a 579,61 μm , média de 423,54 μm , e desvio padrão de 99,69 μm ; placa de perfuração simples e apêndice presente em uma das extremidades dos vasos, podendo também ser encontrada em ambas as extremidades; vasos desobstruídos; pontuações intervasculares e raiovasculares em disposição alterna. **Parênquima axial paratraqueal:** vasicêntrico e escasso. **Fibras:** comprimento variando de 747,75 μm a 1278,25 μm , média muito curta de 1064,85 μm e desvio padrão de 149,69 μm ; fibras com paredes delgadas e muito espessas, média de 2,95 μm variando de 1,84 μm a 5,96 μm e desvio padrão 1,06 μm ; diâmetro do lúmen médio de 10,27 μm variando de 4,64 a 16,20 μm , e desvio padrão de 2,92 μm . Fibras com pontuações simples e fibras septadas presentes. **Raios:** parênquima radial heterogêneo, corpo do raio composto de células procumbentes e quadradas; raios multisseriados estreitos com (18,27 μm) de espessura, variando de 12,05 a 27,11 μm , desvio padrão de (4,24 μm); comprimento extremamente baixo com altura média de (0,28 mm), mínimo de 0,14mm, máximo 0,46 mm e desvio padrão de 0,07 mm; e raios mais largos, variando de 1 a 3 células de largura; frequência de 11,00 a 20,00 raio por mm/ linear, média de 14,63 mm e desvio padrão de 2,03mm.

Na Figura 7 estão ilustrados os planos de corte da madeira de Eucalipto obtidos após a preparação das lâminas permanentes.

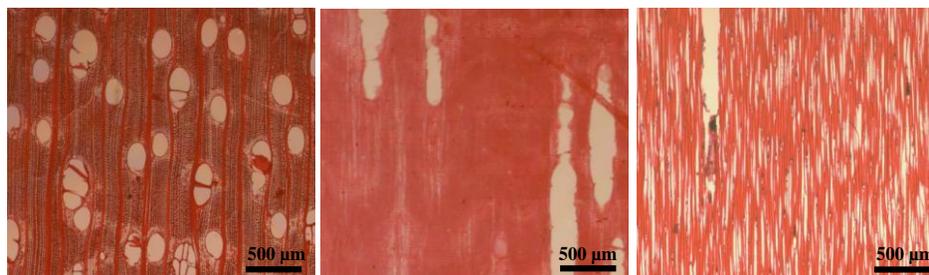


Figura 7 Planos de corte da madeira de Eucalipto. a) Transversal (500 μm); b) Tangencial (500 μm); c) Radial (500 μm)

5.1.3 Caracterização física

Na Tabela 2 podem ser observados os valores médios de densidade aparente, densidade básica e umidade dos quatro tipos de madeira.

Tabela 2 Densidade aparente, densidade básica e umidade dos diferentes tipos de madeiras

| Tratamento | Densidade Aparente | Densidade Básica | Umidade |
|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | (g/cm^3) | | (%) |
| Caucho | 0,517 ^(0,02) A | 0,429 ^(0,006) A | 11,30 ^(0,19) A |
| Cedão | 0,586 ^(0,05) B | 0,498 ^(0,02) C | 11,79 ^(0,26) B |
| Cedro Indiano | 0,655 ^(0,02) C | 0,521 ^(0,01) D | 11,72 ^(0,15) B |
| Eucalipto | 0,601 ^(0,04) B | 0,468 ^(0,007) B | 14,25 ^(0,18) C |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Conforme observado na Tabela 2, somente as madeiras de Cedão e Eucalipto apresentaram valores médios estatisticamente iguais para densidade aparente, sendo estes de 0,586 e 0,601 g/cm^3 , respectivamente. Enquanto que as madeiras de Caucho e Cedro Indiano apresentaram o menor (0,517 g/cm^3) e maior (0,655 g/cm^3) valor médio, respectivamente.

Segundo Kollmann e Cotê (1968) e Vale, Martins e Araújo (1992), as densidades aparente e básica são referentes à quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume, ou também o volume de espaços vazios na madeira. Marques et al. (2012) frisam que é uma das propriedades mais importantes da madeira, afetando a resistência mecânica, além da variação dimensional.

Marra (1992) relata que a densidade é o inverso da porosidade. Quanto menor a densidade, maior a porosidade. Conforme observado na Tabela 2, a madeira de Caucho apresentou menor densidade, o que poderia ser explicado pela frequência de poros. Entretanto, de acordo com a caracterização anatômica desta madeira, a frequência total de poros é de 9,33, a menor entre as madeiras estudadas, porém o diâmetro dos vasos é de 239,32 μm e o comprimento é de 476,79 μm , sendo os maiores entre as demais madeiras, resultando então numa menor densidade. Já a madeira de Cedrão apresenta a maior frequência de poros/ mm^2 , sendo o total de 17,23, o que explica a baixa densidade.

O que ocorre com a madeira de Cedro Indiano e Eucalipto é baseado no fato de que o tecido lenhoso possui uma densidade mais elevada e, portanto apresenta paredes celulares mais espessas e lúmens reduzidos (MARRA, 1992). Ao observar a caracterização anatômica das madeiras de Cedro Indiano e Eucalipto, obtém-se espessura do lúmen de 14,79 e 10,27 μm , respectivamente, e espessura da parede de 2,81 e 2,95 μm , respectivamente. Essas características limitam a mobilidade do adesivo na estrutura lenhosa. Sendo assim, quanto maior a densidade, menos permeável será ao adesivo e, conseqüentemente a ligação adesiva será mais superficial e provavelmente mais fraca (MARRA, 1992).

Para a densidade básica, todas as madeiras diferiram estatisticamente entre si. Foi observado para as madeiras de Caucho e Cedro Indiano o menor (0,429 g/cm^3) e o maior (0,521 g/cm^3) valor médio, respectivamente, enquanto que as madeiras de Cedrão e Eucalipto apresentaram valores médios

intermediários de 0,498 g/cm³ e 0,468 g/cm³, respectivamente. A madeira de Caucho é classificada como madeira leve, apresentando valores de densidade aparente até 0,550 g/cm³, enquanto que as madeiras de Cedrão, Cedro Indiano e Eucalipto são consideradas madeiras de média densidade, apresentando valores entre 0,550 e 0,750 g/cm³ (ELEOTÉRIO et al., 2015).

Para Mendes et al. (1999) a densidade básica é um dos principais parâmetros de qualidade da madeira para utilização como matéria-prima industrial, sendo definida pela relação entre o peso da madeira seca e o seu volume saturado (LOPES; GARCIA, 2002). É considerada uma variável complexa, resultando da combinação de diversos fatores como dimensão das fibras, espessura da parede celular, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira do cerne e alburno e arranjo dos elementos anatômicos (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

Ao observar o teor de umidade, somente as madeiras de Cedrão e Cedro Indiano foram estatisticamente iguais, enquanto que as demais madeiras, Caucho e Eucalipto, diferiram estatisticamente. A madeira de Eucalipto apresentou o maior valor médio (14,25%) e a madeira de Caucho apresentou o menor valor médio (11,3%).

A densidade aparente do Cedro Indiano apresenta variações de acordo com a idade, o local e a procedência, podendo-se encontrar valores, segundo a literatura, de 0,44 a 0,68 g/cm³ (CARVALHO, 1998; HONORATO et al., 2005; PRADO et al., 2003; SIMPSON, 1996; TRIANOSKI, 2010; WHITMORE; OTAROLA, 1976).

Dias e Lahr (2004) avaliaram as relações entre a densidade aparente e demais propriedades físicas, de resistência e de rigidez da madeira de espécies nativas brasileiras. Para a madeira de Cedrão foi obtido o valor médio para densidade aparente de 0,566 g/cm³.

Gonçalez e Gonçalves (2001) caracterizaram tecnologicamente a madeira de Cedrão e obtiveram valor médio de densidade básica de 0,47 g/cm³.

Lobão et al. (2004) caracterizaram um lote de madeira de Eucalipto comercializada por uma empresa do setor florestal brasileiro. O lote menos denso apresentou densidade aparente de 0,575 g/cm³, enquanto que o lote mais denso apresentou densidade aparente de 0,880 g/cm³. Para a umidade, foram obtidos valores de 12,47% para o lote menos denso e de 12,48% para o lote mais denso.

Eleotério et al. (2015) determinaram e compararam a densidade básica e aparente a 12% de umidade e os coeficientes de contração radial, tangencial e volumétrico de cinco espécies e um híbrido de eucalipto. As amostras de Eucalipto foram retiradas de árvores com 14 anos. O valor médio obtido para a densidade básica foi de 0,463 g/cm³, enquanto que para a densidade aparente foi de 0,502 g/cm³.

Foram obtidos dados básicos a partir de uma amostra procedente de quatro publicações do Laboratório de Produtos Florestais/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (LPF/IBAMA) (IBAMA, 1997; INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL - IBDF, 1981, 1988; SOUZA et al., 1997) e a densidade básica encontrada para a madeira de Caucho foi de 0,39 g/cm³.

Não foram encontrados trabalhos com os valores médios de densidade aparente e umidade para a madeira de Caucho. Também não foram encontrados valores de umidade para as madeiras de Cedrão e Cedro Indiano.

Na Tabela 3 podem ser observados os valores médios para a retração tangencial e radial do Ponto de saturação das fibras (PSF) até 12% e de 12 a 0%. Na Tabela 4 podem ser observados os valores médios para a retração total dos quatro tipos de madeira.

Tabela 3 Retrações tangencial e radial até 12% e de 12 a 0% para os quatro tipos de madeira

| Tratamento | Retração até 12% | | Retração de 12% a 0% | |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Tangencial | Radial | Tangencial | Radial |
| Caucho | 2,06 ^(0,78) A | 0,50 ^(0,31) A | 4,66 ^(0,60) B | 2,66 ^(0,28) C |
| Cedraão | 5,03 ^(0,72) B | 1,17 ^(0,62) B | 4,07 ^(0,48) A | 1,42 ^(0,45) A |
| Cedro Indiano | 4,52 ^(0,72) B | 2,04 ^(0,79) C | 3,97 ^(0,27) A | 2,08 ^(0,34) B |
| Eucalipto | 4,88 ^(1,02) B | 2,49 ^(0,64) C | 4,13 ^(0,32) A | 2,91 ^(0,39) C |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Conforme se observa na Tabela 3, nota-se que, para a retração tangencial até 12%, somente o Caucho diferiu estatisticamente das demais madeiras, apresentando menor valor médio (2,06). As demais madeiras apresentaram valores médios superiores, destacando o maior valor médio obtido pela madeira de Cedraão (5,03). Para a retração radial até 12%, também pode ser observado um menor valor médio para a madeira de Caucho (0,50), diferindo estatisticamente das demais madeiras. Entretanto, a madeira de Cedraão também diferiu estatisticamente das demais, apresentando retração radial de 1,17, enquanto que as madeiras de Cedro Indiano e Eucalipto foram estatisticamente iguais, apresentando maiores valores médios de 2,04 e 2,49, respectivamente.

Para a retração tangencial de 12 a 0%, observa-se que novamente somente a madeira de Caucho diferiu estatisticamente das demais, porém apresentou o maior valor médio (4,66), enquanto que a madeira de Cedro Indiano apresentou o menor valor médio (3,97). Para a retração radial, as madeiras de Caucho e Eucalipto foram estatisticamente iguais, apresentando valores de 2,66 e 2,91, respectivamente. A madeira de Cedraão apresentou o menor valor médio, sendo este de 1,42.

Tabela 4 Retrações tangencial e radial totais para os quatro tipos de madeira

| Tratamento | Retração total (%) | |
|---------------|--------------------------|--------------------------|
| | Tangencial | Radial |
| Caucho | 6,72 ^(0,82) A | 3,16 ^(0,41) A |
| Cedão | 9,10 ^(1,00) B | 2,59 ^(1,02) A |
| Cedro Indiano | 8,49 ^(0,74) B | 4,13 ^(0,93) B |
| Eucalipto | 9,02 ^(0,99) B | 5,39 ^(0,55) C |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Para a retração tangencial total, observa-se que somente a madeira de Caucho diferiu estatisticamente das demais, apresentando menor valor médio (6,72). Para a retração total radial, as madeiras de Caucho e Cedão foram estatisticamente iguais, apresentando os menores valores médios, 3,16 e 2,59, respectivamente. As madeiras de Cedro Indiano e Eucalipto diferiram estatisticamente entre si, apresentando valores médios de 4,13 e 5,39, respectivamente. Segundo Eleotério et al. (2015) há uma tendência de uma maior densidade resultar em maior retração.

Dias e Lahr (2004) avaliaram as relações entre a densidade aparente e demais propriedades físicas, de resistência e de rigidez da madeira de espécies nativas brasileiras. Para a madeira de Cedão foram obtidos os valores médios de retração radial e tangencial de 3,5 e 6,4, respectivamente.

Gonçalez e Gonçalves (2001) caracterizaram tecnologicamente a madeira de Cedão e obtiveram valor médio de retratibilidade radial e tangencial de 3,9 e 6,5, respectivamente.

Eleotério et al. (2015) determinaram e compararam a densidade básica e aparente a 12% de umidade e os coeficientes de contração radial, tangencial e volumétrico de cinco espécies e um híbrido de eucalipto. As amostras de

Eucalipto foram retiradas de árvores com 14 anos. Os valores médios de retração radial e tangencial obtidos foram de 4,1 e 7,1, respectivamente.

Foram obtidos dados básicos a partir de uma amostra procedente de quatro publicações do Laboratório de Produtos Florestais/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (LPF/IBAMA) (IBAMA, 1997; IBDF, 1981, 1988; SOUZA et al., 1997) e as retrações tangenciais e radiais encontradas para a madeira de Caucho foram de 10,5 e 6,2%, respectivamente.

Não foram encontrados valores para retratibilidade tangencial e radial totais para a madeira de Cedro Indiano.

Na Tabela 5 podem ser observados os valores médios para o índice de anisotropia dos quatro tipos de madeira.

Tabela 5 Índice de anisotropia para os quatro tipos de madeira

| Tratamento | Anisotropia |
|-------------------|--------------------------|
| Caucho | 2,16 ^(0,40) A |
| Cedão | 4,14 ^(1,93) B |
| Cedro Indiano | 2,15 ^(0,48) A |
| Eucalipto | 1,69 ^(0,27) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Quando avaliado o coeficiente de anisotropia, observa-se que somente a madeira de Cedão obteve o maior valor médio (4,14), diferenciando-se estatisticamente das demais espécies. O coeficiente de anisotropia é um parâmetro de avaliação da qualidade da madeira que considera sua variação dimensional. Entretanto, segundo Silva (2002), o fator anisotrópico da madeira não é suficiente para caracterizá-la como estável ou não. É necessário avaliar as

contrações tangencial e radial separadamente, pois coeficientes de anisotropia muito baixos podem ser resultantes de contrações tangencial e radial elevadas, o que demonstra a alta instabilidade da madeira.

Segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), a qualidade da madeira com coeficiente de anisotropia até 1,50 é considerada excelente, enquanto que a madeira com coeficiente até 2,0 é considerada normal, e com coeficiente acima de 2,0, a madeira é considerada ruim.

Somente a madeira de Eucalipto pode ser considerada com qualidade normal, enquanto que as demais madeiras, Caucho, Cedrão e Cedro Indiano, são consideradas, de acordo com o índice de anisotropia, com qualidade ruim. Porém, ainda de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), madeiras classificadas com qualidade ruim podem ser utilizadas na construção civil, carvão e lenha, ou seja, apesar da classificação inferior, as madeiras de Caucho, Cedrão e Cedro Indiano ainda estão aptas pra utilização no setor civil.

Prado et al. (2003) desenvolveram estudos das características físicas e químicas da madeira de várias procedências de Cedro Indiano e obtiveram coeficiente de anisotropia de 1,8.

Gonçalez et al. (2006) ao avaliarem o coeficiente de anisotropia da madeira de Eucalipto aos 17 anos, obtiveram valor médio de 1,58. Lopes (2007) analisou os aspectos estéticos, físicos, mecânicos e de qualidade da superfície usinada da madeira de Eucalipto aos 18 anos e obteve coeficiente de anisotropia de 1,77.

Araújo et al. (2014) determinaram as propriedades físicas da madeira de Cedrão e obtiveram coeficiente de anisotropia de 1,25.

Na Tabela 6, pode-se observar os valores médios de porosidade para os quatro tipos de madeira.

Tabela 6 Valores médios de porosidade para os quatro tipos de madeira

| Tratamento | Porosidade (%) |
|-------------------|---------------------------|
| Caucho | 59,68 ^(1,68) A |
| Cedão | 54,02 ^(3,54) B |
| Cedro Indiano | 48,64 ^(1,83) D |
| Eucalipto | 51,34 ^(3,02) C |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Conforme observado na Tabela 6, os quatro tipos de madeira diferiram estatisticamente entre si. As madeiras de Caucho e Cedão apresentaram os maiores valores médios de porosidade (59,68%), o que influenciou as baixas densidades obtidas na Tabela 2 e influenciou positivamente as baixas retrações tangenciais e radiais totais (Tabela 4). A madeira de Eucalipto apresentou o menor valor médio de porosidade (51,34%), seguida da madeira de Cedro Indiano (48,64%), também influenciando as maiores densidades, maiores retrações tangenciais e radiais totais e maiores valores médios das propriedades mecânicas.

De acordo com Iwakiri (2005), a frequência de vasos está relacionada com a porosidade, que se relaciona com a densidade, o que influencia a penetração dos adesivos na madeira. Sendo assim, ao avaliar a frequência de vasos na madeira das quatro espécies estudadas, observa-se que o Caucho, apesar de não possuir elevada frequência de vasos, apresenta maior diâmetro (239,32 μm) e maior comprimento dos vasos (476,79 μm), o que influencia a obtenção do maior valor médio de porosidade para esta espécie (59,68%). Já a madeira de Cedão apresenta valor elevado de porosidade (54,02%) devido a maior frequência de vasos (17,23), além de apresentar raios com comprimento imensurável.

5.1.4 Caracterização mecânica

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática para os quatro tipos de madeira.

Tabela 7 Módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática para os quatro tipos de madeira

| Tratamento | MOE | | MOR | |
|---------------|-------|-----------------------|-------|---------------------|
| | (MPa) | | | |
| Caucho | 4819 | ^(458,17) C | 58,0 | ^(5,07) C |
| Cedão | 4421 | ^(723,94) D | 58,9 | ^(6,83) C |
| Cedro Indiano | 7517 | ^(780,10) A | 107,5 | ^(5,24) A |
| Eucalipto | 5810 | ^(583,94) B | 75,7 | ^(5,73) B |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Quando avaliado o MOE, observa-se que os quatro tipos de madeira diferiram estatisticamente entre si. O maior valor médio obtido foi para a madeira de Cedro Indiano (7517MPa), o que pode ser explicado pelas maiores densidades aparente e básica, conforme Tabela 2, e a baixa porosidade, conforme Tabela 6, enquanto que o menor valor médio obtido foi para a madeira de Cedão (4421MPa). Ao avaliar o MOR, somente as madeiras de Caucho e Cedão foram estatisticamente iguais, com valores médios de 58,0 e 58,9 MPa, respectivamente, sendo os menores valores obtidos. A madeira de Cedro Indiano apresentou o maior valor médio, sendo este de 107,5 MPa, seguida da madeira de Eucalipto, que apresentou o valor médio de 75,7 MPa, o que pode ser explicado pelas maiores densidades aparente e básica, conforme Tabela 2, e as baixas porosidades, conforme Tabela 6.

Dias e Lahr (2004) avaliaram as relações entre a densidade aparente e demais propriedades físicas, de resistência e de rigidez da madeira de espécies nativas brasileiras. Para a madeira de Cedrão foi obtido o valor médio para o módulo de elasticidade de 10032 MPa e para o módulo de ruptura de 61 MPa. Os autores observaram que a densidade aparente está relacionada com as propriedades de resistência e rigidez.

Gonçalez e Gonçalves (2001) caracterizaram, tecnologicamente, a madeira de Cedrão e obtiveram valor médio para o módulo de elasticidade de 11277,65 MPa e para o módulo de ruptura de 92,77 MPa.

Lobão et al. (2004) caracterizaram um lote de madeira de Eucalipto comercializada por uma empresa do setor florestal brasileiro. O lote menos denso (0,575 g/cm³) apresentou valor médio para o módulo de elasticidade de 13772 MPa e para o módulo de ruptura de 64,7 MPa, enquanto que o lote mais denso (0,880 g/cm³) apresentou valor médio para o módulo de elasticidade de 16778 MPa e para o módulo de ruptura de 88,0 MPa.

Para a madeira de Cedro Indiano, nos ensaios realizados pelo Laboratório de Tecnologia da Madeira - LTM (2009), o módulo de ruptura foi de 77 MPa e para o módulo de elasticidade foi de 9374 MPa.

A partir de uma amostra procedente de publicações do Laboratório de Produtos Florestais/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (LPF/IBAMA) (IBAMA, 1997; IBDF, 1981, 1988; SOUZA et al., 1997) foram obtidos valores médios para o MOE e o MOR da madeira de Caucho de 8924 e 55,8 MPa, respectivamente.

Na Tabela 8 estão os valores médios de compressão para os quatro tipos de madeira.

Tabela 8 Valores médios de compressão para os quatro tipos de madeira

| Tratamento | Compressão (MPa) |
|-------------------|---------------------------|
| Caucho | 33,65 ^(3,78) B |
| Cedão | 31,99 ^(3,34) B |
| Cedro Indiano | 50,09 ^(9,62) A |
| Eucalipto | 49,70 ^(2,95) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Analisando os valores médios de compressão paralela às fibras, observa-se que as madeiras que apresentaram melhor resistência foram Cedro Indiano e Eucalipto, sendo estatisticamente iguais entre si e apresentando valores de 50,09 e 49,70 MPa, respectivamente, o que pode ser explicado pelas maiores densidades aparente destas. As madeiras de Caucho e Cedão apresentaram valores inferiores, 33,65 e 31,99 MPa, respectivamente, sendo estatisticamente iguais.

Dias e Lahr (2004) avaliaram as relações entre a densidade aparente e demais propriedades físicas, de resistência e de rigidez da madeira de espécies nativas brasileiras. Para a madeira de Cedão foi obtido o valor médio de compressão paralela às fibras de 41 MPa.

Lobão et al. (2004) ao avaliarem a madeira de Eucalipto comercializada por uma empresa do setor florestal brasileiro, obtiveram, para o lote menos denso (0,575 g/cm³), valor médio de compressão paralela às fibras de 49,5 MPa, enquanto que o lote mais denso (0,880 g/cm³), apresentou valor médio de 62,4 MPa.

Segundo a caracterização tecnológica efetuada pelo LTM (2009), em relação ao ensaio de Compressão paralela, foi obtido o valor médio de 40 MPa para a madeira de Cedro Indiano.

O valor médio de compressão para a madeira de Caucho foi de 36,77 MPa, de acordo com dados obtidos publicações do LPF/IBAMA (IBAMA, 1997; IBDF, 1981, 1988; SOUZA et al., 1997).

5.1.5 Caracterização química

Na Tabela 9 encontram-se os valores médios da umidade, extrativos, cinzas, lignina e holocelulose para os quatro tipos de madeira.

Tabela 9 Caracterização química dos quatro tipos de madeira

| Tratamento | Extrativos | Cinzas | Lignina | Holocelulose |
|---------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | (%) | | | |
| Caucho | 4,53 ^(0,26) B | 1,81 ^(0,17) C | 31,21 ^(5,12) A | 62,45 ^(5,06) B |
| Cedão | 8,15 ^(0,10) C | 0,64 ^(0,02) B | 40,34 ^(3,25) A | 50,88 ^(3,33) A |
| Cedro Indiano | 4,03 ^(0,17) A | 0,26 ^(0,02) A | 26,08 ^(2,50) A | 69,63 ^(2,63) C |
| Eucalipto | 9,02 ^(0,17) D | 0,11 ^(0,006) A | 33,91 ^(3,22) A | 56,96 ^(3,40) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Ao avaliar os valores médios para os extrativos, todos foram estatisticamente diferentes. A madeira de Eucalipto apresentou o maior valor médio de extrativos (9,02%), seguida da madeira de Cedão (8,15%), Caucho (4,53%) e, por fim, a madeira de Cedro Indiano (4,03%). Segundo Plaster et al. (2008), o gênero *Eucalyptus* possui espécies de difícil colagem, principalmente as que apresentam elevadas densidades e teores de extrativos. Os constituintes químicos da madeira interferem no processo de colagem, sendo que os extrativos afetam a adesão devido à quantidade e o tipo (ALBINO; MORI; MENDES, 2012).

Segundo o *Forest Products Laboratory* (1999) e Skeist (1990), diversas pesquisas relatam que os extrativos na superfície da madeira contribuem para a inativação da mesma, ocasionando pobre umectação do adesivo. A maioria dos adesivos utiliza água como carregador, gerando problemas de umedecimento, fluxo e penetração na superfície com extrativos.

Para o teor de cinzas, as madeiras de Eucalipto e Cedro Indiano apresentaram valores médios estatisticamente iguais, menores que os valores médios obtidos para as demais madeiras, sendo estes de 0,11 e 0,26%, respectivamente. As madeiras de Cedrão e Caucho diferiram estatisticamente entre si e das demais madeiras, apresentando valores médios de 0,64 e 1,81%, respectivamente.

Para lignina, os quatro tipos de madeira apresentaram valores estatisticamente iguais. O valor médio obtido para a madeira de Cedro Indiano foi de 26,08%, para a madeira de Caucho de 31,21%, para a madeira de Eucalipto de 33,91%, e para a madeira de Cedrão de 40,34%.

Com relação à holocelulose, observa-se que as madeiras de Eucalipto e Cedrão apresentaram valores médios estatisticamente iguais, sendo inferiores as madeiras de Caucho e Cedro Indiano. Os valores médios obtidos foram de 56,96 e 50,88%, para as madeiras de Eucalipto e Cedrão, respectivamente. As madeiras de Caucho e Cedro Indiano diferiram estatisticamente entre si e das demais madeiras, apresentando valores médios superiores de 62,45 e 69,63%, respectivamente.

Guimarães et al. (2013) avaliaram a densidade básica e os constituintes químicos presentes nas madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* aos 31 anos. Com relação aos constituintes químicos, os autores obtiveram, para a madeira de *Eucalyptus grandis*, valores médios de extrativos totais, cinzas, lignina e holocelulose de 7,99%; 0,18%; 29,34% e; 62,66%, respectivamente.

Para a madeira de Cedro Indiano, em relação à composição química, esta apresenta valores médios de 10,6 %, 20,1% e 69,3%, para extrativos, lignina e holocelulose, respectivamente (LTM, 2009).

Não foram encontrados valores médios para caracterização química da madeira de Caucho e Cedrão.

5.1.6 Caracterização do adesivo

Na Tabela 10 estão dispostos os valores médios obtidos para o teor de sólidos (%), pH e viscosidade (cP) dos adesivos resorcinol e poliuretano.

Tabela 10 Teor de sólidos, pH e viscosidade dos adesivos resorcinol e poliuretano

| Tratamento | Teor de sólidos (%) | pH | Viscosidade |
|-------------------|----------------------------|-----------|--------------------|
| Resorcinol | 65,0 | 7,73 | 863,6 cP |
| Poliuretano | 75,0 | 6,00 | 3134,0 cP |

Conforme observado na Tabela 10, o valor médio para o teor de sólidos foi superior no adesivo poliuretano quando comparado ao adesivo resorcinol. Segundo Iwakiri, Keinert Júnior e Mendes (2005), o teor de sólidos é a quantidade presente de sólidos no adesivo, sendo este composto por componentes sólidos e líquidos voláteis constituídos de solventes orgânicos. Posteriormente, a evaporação dos componentes líquidos, ocorre a cura do adesivo, formando a linha de cola, responsável pela ligação entre os substratos.

Através do teor de sólidos é possível constatar quanto de adesivo efetivamente fica, para formar a linha de cola (IWAKIRI; KEINERT JÚNIOR; MENDES, 2005), ou seja, nota-se que o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, por apresentar maior porcentagem de teor de sólidos, possivelmente

apresentará uma linha de cola mais espessa. De acordo com Bianche (2014), porcentagens altas para o teor de sólidos podem contribuir para a qualidade da linha de cola por apresentar maior quantidade de material sólido, melhorando a adesão entre a madeira e o adesivo, porém pode ser obtida uma linha de cola mais espessa, o que pode piorar a adesão.

Para o pH, observa-se que o adesivo resorcinol possui pH básico, enquanto o adesivo poliuretano possui pH ácido. De acordo com Stella (2009), o pH de uma solução aquosa é definido como a concentração de íons dissociados H^+ e OH^- , sendo sua determinação feita em pHmetro. Iwakiri, Keinert Júnior e Mendes (2005) atestam que o adesivo não deve ultrapassar os limites no mínimo 2,5 e de no máximo 11, o que poderia degradar as fibras da madeira.

Como os adesivos resorcinol e poliuretano curam em meio básico e ácido, respectivamente, madeiras com alta acidez apresentam maior dificuldade de colagem com o adesivo resorcinol. Enquanto que madeiras com pH básico apresentam maior dificuldade de colagem com o adesivo poliuretano de mamona.

Ao avaliar a viscosidade, o adesivo poliuretano apresenta maior valor médio quando comparado ao adesivo resorcinol, sendo este de 3134 cP. Para Iwakiri (2005), a viscosidade é definida como a resistência ao fluxo livre entre as camadas de uma matéria ou a grandeza que caracteriza a existência de atrito entre as moléculas de um fluido e que se manifesta através do escoamento. Assim, pode-se relacionar a fluidez de um líquido com a sua viscosidade.

Almeida (2009) ressalta que valores altos de viscosidade não são desejáveis, uma vez que prejudica a qualidade da colagem por não conseguir distribuir uniformemente o adesivo sobre a madeira, causando penetração insuficiente na sua estrutura, inutilizando a umectação e dando origem a uma linha de cola espessa. Porém, há uma maior penetração e absorção pela madeira ao utilizar adesivos com baixa viscosidade, sendo importante verificar estes

valores extremos, o que pode resultar em linha de cola faminta ou absorção excessiva pela madeira.

Sendo assim, uma viscosidade elevada indica maior dificuldade de espalhamento do adesivo; menor propriedade de umectação; menor penetração do adesivo na estrutura capilar e maior período de armazenagem do adesivo. Entretanto, uma menor viscosidade indica uma maior penetração e absorção do adesivo e maior temperatura ambiente (LIMA, 2006). Também é importante levar em consideração, que a viscosidade pode ser dificultada em função da variabilidade da madeira, causada pelos diferentes planos de corte obtidos (IWAKIRI, 1998).

Lima (2006) avaliou a qualidade da colagem quanto à resistência ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira, e obteve para o adesivo resorcinol valores médios para o teor de sólidos, pH e viscosidade de 61,9%; 7,3 e 2127 cP, respectivamente.

Iwakiri et al. (2014) ao avaliarem a influência do adesivo, das gramaturas e dos tempos de prensagem nas propriedades mecânicas de vigas laminadas coladas, confeccionadas com madeira de Teca (*Tectona grandis*), obtiveram para o adesivo resorcinol valores médios para o teor de sólidos, pH e viscosidade de 55%; 7,0; 650 cP, respectivamente.

Silva et al. (2013) avaliaram a viabilidade da produção de painéis MDF fabricados com madeiras das espécies *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e resinas poliuretanas mono e bicomponente derivadas do óleo de mamona. Para a caracterização do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona os autores obtiveram valores médios para teor de sólidos de 66% e pH entre 8 e 9.

Bianche (2014) ao estudar a interface madeira-adesivo e a resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura obteve valores médios para o teor de sólidos de 91% e pH de 6 para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

5.1.7 pH da madeira

Na Tabela 11 observa-se os valores médios para o pH das quatro espécies de madeira.

Tabela 11 Valores médios de pH da madeira para as espécies de Caucho, Cedrão, Cedro Indiano e Eucalipto

| Tratamento | pH |
|-------------------|-----------|
| Caucho | 6,30 C |
| Cedrão | 5,15 B |
| Cedro Indiano | 5,14 B |
| Eucalipto | 4,46 A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Ao observar a Tabela 11, verifica-se que a madeira de Caucho apresentou o maior pH quando comprada as demais madeiras, com valor médio de 6,30, diferindo estatisticamente das outras espécies. As madeiras de Cedrão e Cedro Indiano foram estatisticamente iguais, apresentando valores médios de 5,15 e 5,14, respectivamente, e a madeira de Eucalipto apresentou o menor valor médio para o pH, sendo este de 4,46, diferindo das demais madeiras. Entretanto, apesar da divergência entre os valores de pH das madeiras, todas enquadram-se como de pH ácido. Carneiro, Vital e Pereira (2007) relatam que o pH das madeiras se encontra em torno de 3 e 6 e pode variar de acordo com a espécie.

Como se pode observar na Tabela 10, somente o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona possui pH ácido, o que facilita a cura do adesivo nas quatro espécies de madeira estudadas. Com relação ao adesivo resorcinol, que possui caráter básico, pode haver uma inativação do mesmo ao entrar em contato com as madeiras. Porém, de acordo com Pizzi (1994), este adesivo não apresenta

problemas relacionados ao pH da superfície, podendo curar tanto em meio ácido quanto básico.

5.2 Caracterização da madeira laminada colada

A caracterização realizada da madeira laminada colada está disposta abaixo.

5.2.1 Relação entre o MOE e o MOR à flexão estática e o MOEd

Nas Figuras 8 e 9 estão ilustradas as relações entre o MOE e o MOEd, e entre o MOR e o MOEd, respectivamente.

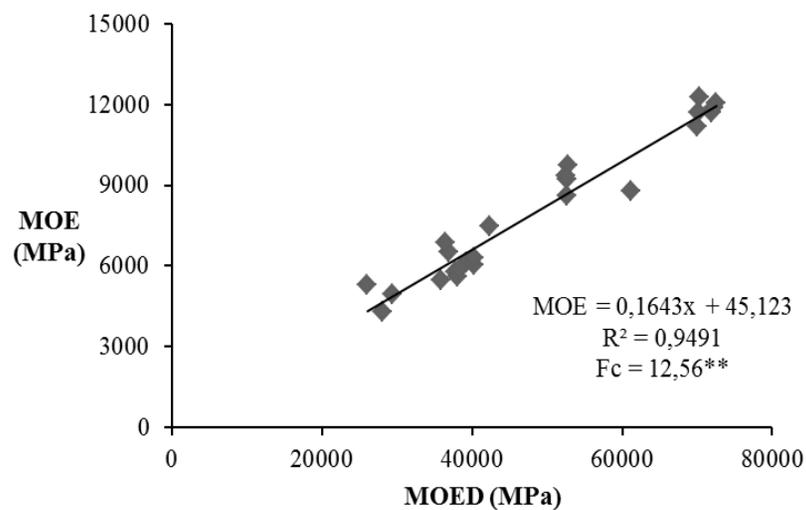


Figura 8 Relação entre o MOE à flexão estática e o MOEd

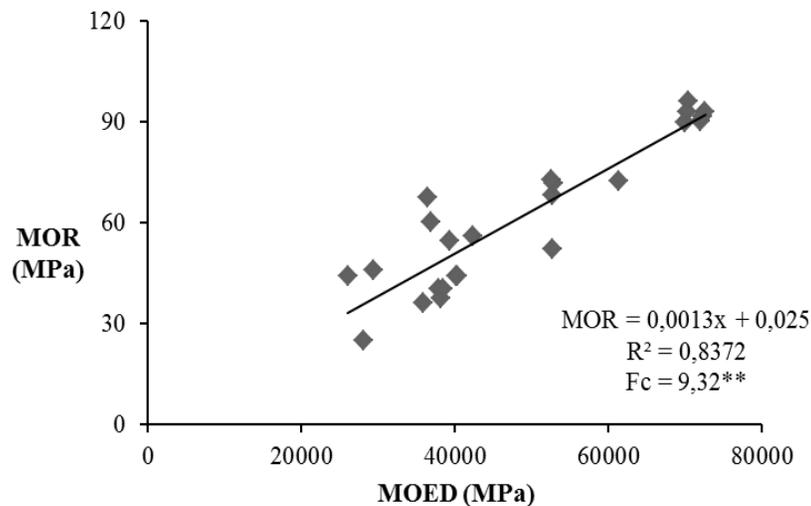


Figura 9 Relação entre o MOR à flexão estática e o MOEd

Houve relação significativa entre o MOE e MOR obtidos pelo ensaio de flexão estática e o MOEd obtido pelo equipamento *Sonelastic*. Para a correlação entre o MOE e o MOEd o R^2 foi de 0,9491, enquanto que para a correlação entre o MOR e o MOEd, o R^2 foi de 0,8372.

Zangiácomo (2003) determinou as propriedades físicas, de resistência e de rigidez de espécies tropicais alternativas da MLC, com dimensões de 300 x 6 x 2 cm (comprimento, largura e espessura). Foi realizado o ensaio de vibração transversal, bem como o ensaio de MOE à flexão estática e o autor obteve R^2 de 0,4889.

Cossolino et al. (2009) estudaram a coerência dos resultados obtidos pelos ensaios de vibração transversal e flexão estática, usualmente empregados, com os resultados obtidos com uma nova solução tecnológica de caracterização não destrutiva baseada na frequência de ressonância longitudinal. Houve relação significativa entre o MOEd, obtido pelo *Sonelastic*, e o MOE à flexão estática, com R^2 de 0,89076.

Teles (2009) ao produzir e caracterizar o comportamento tecnológico de MLC utilizando a espécie *Sextonia rubra* (Louro vermelho) composta por cinco lâminas e adesivo resorcinol, com dimensões de 190 x 4 x 10 cm (comprimento, largura, espessura), obteve R^2 de 0,8345, pelo método de ondas de tensão, utilizando o equipamento *Stress Wave Timer*, e R^2 de 0,9464 pelo método de vibração transversal.

Segundinho et al. (2012) avaliaram a eficácia dos métodos de ensaios baseados nas frequências naturais de vibração comparando-os aos resultados obtidos na flexão estática em peças estruturais de madeira de *Pinus Oocarpa*. Foram utilizadas vigas de *Eucalyptus* sp. com dimensões nominais (40 x 60 x 2000 mm). Os autores observaram boa correlação quando comparados aos resultados obtidos pelo método mecânico de flexão estática, especialmente quando empregada à frequência natural de vibração longitudinal, observando valor de R^2 de 0,89.

5.2.2 Caracterização mecânica

A avaliação da resistência ao cisalhamento seco, úmido e pós-fervura na linha de cola, juntamente com os ensaios de flexão estática, compressão paralela às fibras e ensaio de delaminação, estão dispostos abaixo.

5.2.2.1 Resistência ao cisalhamento seco na linha de cola

Mediante a análise fatorial observou-se que não houve interação entre os fatores tipo de madeira e tipo de adesivo.

Nas Tabelas 12 e 13 podem ser visualizados os valores médios para o cisalhamento seco e a porcentagem de falha na madeira em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo, respectivamente.

Tabela 12 Valores médios de cisalhamento seco e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função das espécies utilizadas

| Tipo de madeira | Cisalhamento seco (MPa) | Falha na madeira (%) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Caucho | 6,74 ^(0,52) A | 91,69 ^(4,45) A |
| Cedraão | 6,13 ^(0,54) A | 39,31 ^(11,30) B |
| Cedro indiano | 6,95 ^(0,38) A | 23,96 ^(20,21) C |
| Eucalipto | 4,73 ^(1,90) B | 17,25 ^(17,86) C |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Ao analisar os valores médios para o cisalhamento seco, observa-se que somente a madeira de Eucalipto diferiu estatisticamente das demais espécies, apresentando valor médio inferior (4,73 MPa). De acordo com Baldwin (1995), Sellers Júnior (1994) e Tsoumis (1991), as lâminas de madeira de maior densidade absorvem menor quantidade de adesivo em relação às lâminas de densidade inferior, devido à menor porosidade e permeabilidade da madeira. Desta forma, observa-se nas Tabelas 2 e 6, relacionadas às densidades e porosidades, respectivamente, que o Eucalipto apresentou menor valor médio para o cisalhamento devido a sua elevada densidade e, conseqüentemente baixa porosidade. No momento da colagem, pode ocorrer uma maior perda de adesivo pelas bordas de peças com maiores densidades, ocasionando uma linha de cola menos eficaz (PLASTER et al., 2008).

As maiores dimensões dos diâmetros dos vasos obtidas nas madeiras de Caucho e Cedro Indiano, 239,32 e 234,4 µm, respectivamente, facilitam a entrada do adesivo na célula, interagindo com a mesma e formando uma maior aderência entre as madeiras, tornando a ligação mais forte e aumentando a resistência ao esforço de cisalhamento (ALBINO; MORI; MENDES, 2012). O mesmo ocorre devido à elevada frequência de vasos encontrada na madeira de Cedraão (17,23).

Com relação à falha na madeira, somente as espécies de Cedro Indiano e Eucalipto foram estatisticamente iguais, apresentando menores valores médios, sendo estes de 23,96 e 17,25%, respectivamente. O que pode ser explicado pelas densidades elevadas obtidas para as duas espécies, conforme Tabela 2 e, conseqüentemente menor porosidade, conforme Tabela 6, dificultando a penetração do adesivo. Outro fator importante que pode ter influenciado a colagem da madeira de Eucalipto é o elevado teor de extrativos, presente nesta espécie (9,02%), que pode contribuir pra inativação da superfície. Conclui-se que, os maiores valores obtidos pra falha na madeira de algumas espécies estão relacionados com uma maior eficiência do adesivo, devido a sua maior penetração na madeira formando uma ligação adesivo-substrato mais forte.

Segundo as normas ASTM D-2559 (ASTM, 2012) e ASTM D-5771 (ASTM, 2015), que fornecem, respectivamente, especificações exigidas para o uso estrutural e não estrutural de componentes de madeira colada, as amostras testadas devem apresentar pelo menos 75 e 60% de falha na madeira, respectivamente. Neste estudo, somente a madeira de Caucho apresentou valor superior aos mínimos estipulados pelas normas.

Albino, Mori e Mendes (2012) relatam que, quanto maior o diâmetro do vaso, largura do raio, espessura da parede da fibra, largura e comprimento da fibra, maior será a resistência da junta colada ao cisalhamento. Constatando o que os autores observaram, nota-se que a maior porcentagem de falha na madeira obtida para a madeira de Caucho (91,69%) está relacionada ao maior diâmetro dos vasos (239,32 μm), a largura dos raios (65,51 μm), a espessura da parede da fibra (3,11 μm) e a espessura do lúmen (15,64 μm).

Tabela 13 Valores médios de cisalhamento seco e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos dois tipos de adesivos

| Adesivo | Cisalhamento seco (MPa) | Falha na madeira (%) |
|-------------|--------------------------|----------------------------|
| Poliuretano | 6,16 ^(1,23) A | 36,37 ^(36,93) A |
| Resorcinol | 6,12 ^(1,46) A | 49,74 ^(27,22) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Ao avaliar a influência do adesivo na resistência ao cisalhamento e na porcentagem de falha na madeira, observa-se que não houve diferenciação estatística para as duas propriedades. O tipo de adesivo não afetou a resistência ao cisalhamento.

Vital, Maciel e Della Lucia (2006) avaliaram a resistência ao cisalhamento seco de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* utilizando adesivo PVAc, na gramatura de 150 g/m², face simples, e resorcinol, na gramatura de 300 g/m², face dupla, e pressão de 1 MPa. O valor médio obtido ao utilizar o adesivo resorcinol foi de 7,62 MPa e a falha na madeira de 42,49%.

Lima et al. (2008) analisaram as juntas coladas com madeiras de clones de *Eucalyptus* e adesivo resorcinol, na gramatura de 250 g/m² e pressão de 1,18 MPa, obtendo valores médios para resistência ao cisalhamento seco de 7,55 a 9,07 MPa e falha na madeira de 29 a 64%.

Iwakiri et al. (2013) avaliaram a qualidade das juntas coladas de madeira de *Eucalyptus benthamii* utilizando adesivos à base de acetato de polivinila (PVAc), com gramatura de 400 g/m² (superfície dupla) e pressão de 1 MPa, e resorcinol, com gramatura de 200 g/m² (superfície dupla) e pressão de 1 MPa, colando as peças nas faces tangenciais, radiais e tangencial/radial. Os autores obtiveram valores médios pra resistência ao cisalhamento seco de 8,46 MPa,

com as peças coladas tangencialmente e adesivo resorcinol, e falha na madeira de 38,75 %.

Bianche (2014) estudou a interface madeira-adesivo e a resistência de juntas coladas com diferentes adesivos. Foram utilizados os adesivos de mamona, silicato de sódio, silicato modificado, PVA e resorcinol. A espécie escolhida foi a de *Eucalyptus* sp. Foram utilizadas gramaturas de 150, 200 e 250 g/m², e pressão de 12 kgf/cm². Foram obtidos valores médios para resistência ao cisalhamento na condição seca de 7,04 MPa utilizando o adesivo poliuretano de mamona, e de 7,78 MPa utilizando o adesivo resorcinol. Os valores médios obtidos pra porcentagem de falha na madeira foram de 38,2% utilizando o adesivo poliuretano, e de 46,8% utilizando o adesivo resorcinol.

5.2.2.2 Resistência ao cisalhamento úmido na linha de cola

Mediante a análise fatorial observou-se que não houve interação entre os fatores tipo de madeira e tipo de adesivo.

Nas Tabelas 14 e 15 podem ser verificados os valores médios para o cisalhamento úmido e a porcentagem de falha na madeira para cada espécie e adesivo.

Tabela 14 Valores médios de cisalhamento úmido e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos tipos de espécies utilizadas

| Tipo de madeira | Cisalhamento (MPa) | Falha na madeira (%) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Caucho | 5,08 ^(2,01) B | 14,58 ^(25,54) A |
| Cedraão | 5,54 ^(1,67) B | 19,17 ^(28,91) A |
| Cedro indiano | 11,13 ^(1,79) A | 8,75 ^(19,67) A |
| Eucalipto | 10,20 ^(0,76) A | 21,67 ^(16,33) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Analisando a resistência ao cisalhamento úmido, observa-se que as madeiras de Cedro Indiano e Eucalipto apresentaram maior valor médio, sendo estatisticamente iguais e diferindo das demais. Os valores médios obtidos foram de 10,20 MPa, para a madeira de Eucalipto, e de 11,13 MPa, para a madeira de Cedro Indiano. As madeiras de Caucho e Cedrão foram estatisticamente iguais, apresentando o menor valor médio, sendo estes de 5,08 e 5,54 MPa, respectivamente. Não houve diferenciação estatística ao avaliar a porcentagem de falha na madeira.

Ao comparar as Tabelas 12 e 14, cisalhamento seco e úmido, respectivamente, nota-se que as madeiras de Eucalipto e Cedro Indiano, após contato com a água, apresentaram maiores valores médios de resistência ao cisalhamento, enquanto que as madeiras de Caucho e Cedrão tiveram seus valores reduzidos, o que também pode ser observado na porcentagem de falha na madeira. Este fato pode ser explicado pelas altas densidades das madeiras de Eucalipto e Cedro Indiano e, conseqüentemente suas menores porosidades, o que diminuiu a absorção de água, o que minimizou os efeitos negativos na linha de cola.

Tabela 15 Valores médios de cisalhamento úmido e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos dois tipos de adesivos

| Adesivo | Cisalhamento (MPa) | Falha na madeira (%) |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|
| Poliuretano | 7,94 ^(2,81) A | 6,25 ^(12,00) B |
| Resorcinol | 7,24 ^(3,81) A | 27,22 ^(29,76) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Não houve diferença estatística ao analisar o efeito do tipo de adesivo sobre a resistência ao cisalhamento úmido, demonstrando que os dois adesivos,

como já encontrado na literatura, apresentam alta resistência à umidade (CUNHA; MATOS, 2011b; DRESSLER, 1994; PIZZI, 1994).

Houve influência do adesivo somente quando avaliada a porcentagem de falha na madeira, sendo que houve diferenciação estatística entre os adesivos poliuretano e resorcinol. O maior valor médio obtido pra falha na madeira ao utilizar o adesivo resorcinol pode ser explicado pela baixa viscosidade do mesmo (863,6 cP), conforme pode ser observado na Tabela 8, o que facilitou a distribuição do adesivo. Pizzi (1994) relata que, a composição química do resorcinol deriva de reações de condensação entre o resorcinol e o formaldeído, produzindo ligações de elevadas resistências mecânicas, também resistentes à água e às variações climáticas.

Durante a reação de polimerização do adesivo resorcinol são formadas ligações cruzadas, que garantem a reatividade do adesivo e sua resistência à umidade (PIZZI; MITTAL, 1994). Com relação ao adesivo de mamona, ocorre o entrecruzamento das ligações químicas, a flexibilidade das cadeias e as forças intermoleculares, dando origem a polímeros resistentes à umidade (AZEVEDO, 2009).

Bianche (2014) ao avaliar a resistência de juntas coladas com adesivos de mamona, silicato de sódio, silicato modificado, PVA e resorcinol, nas gramaturas de 150, 200 e 250 g/m², e pressão de 12 kgf/cm², utilizando a madeira de *Eucalyptus* sp. obteve valores médios para resistência ao cisalhamento na condição úmida de 5,34 MPa utilizando o adesivo poliuretano de mamona, e de 6,52 MPa utilizando o adesivo resorcinol. Os valores médios obtidos pra porcentagem de falha na madeira foram de 22,8% utilizando o adesivo poliuretano, e de 50,8% utilizando o adesivo resorcinol.

5.2.2.3 Resistência ao cisalhamento pós-fervura na linha de cola

Mediante a análise fatorial observou-se que não houve interação entre os fatores tipo de madeira e tipo de adesivo.

Nas Tabelas 16 e 17, podem ser avaliados os valores médios para o cisalhamento pós-fervura e a porcentagem de falha na madeira para cada espécie e adesivo.

Tabela 16 Valores médios de cisalhamento pós-fervura e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos tipos de madeiras

| Tipo de madeira | Cisalhamento (MPa) | Falha na madeira (%) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Caucho | 4,16 ^(0,28) A | 15,00 ^(16,68) A |
| Cedão | 3,38 ^(2,07) A | 41,25 ^(40,24) A |
| Cedro indiano | 6,48 ^(5,24) A | 27,50 ^(30,29) A |
| Eucalipto | ** | ** |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, a não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

** Não foi possível realizar o ensaio de cisalhamento pós-fervura

Conforme observado na Tabela 16, não houve diferenciação estatística quando analisada a resistência ao cisalhamento pós-fervura e a porcentagem de falha na madeira. A madeira de Eucalipto não pôde ser submetida ao ensaio de cisalhamento por ter apresentado a delaminação durante o processo de pós-fervura. Apesar de não ser obtida diferenciação estatística, a madeira de Cedro Indiano apresentou o maior valor médio para resistência ao cisalhamento.

A maior porcentagem de falha na madeira, apesar de não ter ocorrido diferenciação estatística, foi obtida pela madeira de Cedão, que possivelmente pode ser explicada pela alta frequência de vasos (17,23) e comprimento de raios

imensurável, visto que estas características facilitam a penetração do adesivo, podendo ocasionar uma linha de cola mais resistente que a própria madeira.

Tabela 17 Valores médios de cisalhamento pós-fervura e porcentagem de falha na madeira para a madeira laminada colada (MLC) em função dos dois tipos de adesivos

| Adesivo | Cisalhamento (MPa) | Falha na madeira (%) |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|
| Poliuretano | 2,46 ^(1,28) B | 2,92 ^(3,75) B |
| Resorcinol | 6,88 ^(3,35) A | 52,92 ^(24,45) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Analisando a resistência ao cisalhamento e a porcentagem de falha na madeira, observa-se que o tipo de adesivo teve influência nessas propriedades. O adesivo resorcinol apresentou maior valor médio, tanto para a resistência ao cisalhamento quanto para a porcentagem de falha na madeira, diferindo estatisticamente do adesivo poliuretano. O maior valor médio de resistência ao cisalhamento foi obtido pelo adesivo resorcinol (6,88 MPa), e com a obtenção de 52,92 % para a falha na madeira. Enquanto o adesivo poliuretano apresentou valor médio de 2,46 MPa, para resistência ao cisalhamento, e 2,92 % para a falha na madeira.

Os maiores valores médios obtidos para a resistência ao cisalhamento e para a falha na madeira, ao utilizar o adesivo resorcinol, pode ser explicado pela baixa viscosidade do mesmo (863,6 cP), conforme pode ser observado na Tabela 10, facilitando a distribuição do adesivo, não comprometendo a ligação adesiva. Tsoumis (1991) também afirma que, quanto maior a espessura da linha de cola, menor será a resistência da junta colada. O adesivo poliuretano apresentou maior viscosidade e, com isso foi observada visualmente maior espessura na linha de

cola. Este fato pode ter influenciado na obtenção dos menores valores médios para o cisalhamento úmido e pós-fervura.

5.2.2.4 Flexão estática

Nas Tabelas 18 e 19 estão representados os valores médios para o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática para a madeira laminada colada (MLC) em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo.

Tabela 18 Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática para a madeira laminada colada (MLC) em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo

| Tipo de madeira | Adesivo | |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| | Poliuretana de mamona | Resorcinol |
| MOE (MPa) | | |
| Caucho | 5619 ⁽¹⁵¹⁾ Ca | 6066 ⁽²¹¹⁾ Ca |
| Cedrão | 4857 ⁽⁵⁰²⁾ Cb | 6494 ⁽³⁷⁶⁾ Ca |
| Cedro Indiano | 8439 ⁽⁸⁹⁴⁾ Bb | 9285 ⁽⁴⁵²⁾ Ba |
| Eucalipto | 11879 ⁽¹⁸³⁾ Aa | 11726 ⁽⁵⁵⁶⁾ Aa |

*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Mediante a análise fatorial observou-se que houve interação entre os fatores tipo de madeira e tipo de adesivo. Ao avaliar os adesivos dentro dos tipos de madeira, observa-se, para os dois tipos de adesivo, que houve o mesmo padrão. A madeira de Eucalipto apresentou o maior valor médio para o MOE, diferindo estatisticamente das demais. A madeira de Cedro Indiano diferiu estatisticamente de todas as outras madeiras avaliadas, apresentando valores

médios de 8439 MPa para o adesivo poliuretano, e de 9285 MPa para o adesivo resorcinol. As madeiras de Cedrão e Caucho foram estatisticamente iguais, apresentando valores médios de 4857 e 5619 MPa, respectivamente, para o adesivo poliuretano, e de 6494 e 6066 MPa, respectivamente, para o adesivo resorcinol.

Ao avaliar o tipo de madeira dentro de cada adesivo, somente dentro das madeiras de Cedrão e Cedro Indiano houve diferença estatística ao comparar os dois tipos de adesivo. A madeira de Cedrão apresentou valor médio para o MOE de 4857 MPa, para o adesivo poliuretano, e de 6494 MPa, para o adesivo resorcinol. Já a madeira de Cedro Indiano apresentou valor médio de 8439 MPa, para o adesivo poliuretano, e de 9285 MPa, para o adesivo resorcinol. Nota-se que, ao utilizar o adesivo resorcinol, foram obtidos maiores valores médios para o MOE quando comparado ao adesivo poliuretano, com exceção da madeira de Eucalipto, que apresentou o valor médio de 11879,37 MPa, para o adesivo poliuretano, e de 11726,30 MPa, para o adesivo resorcinol, porém não houve diferenciação estatística.

Tabela 19 Valores médios do módulo de ruptura (MOR) à flexão estática para a madeira laminada colada (MLC) em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo

| Tipo de madeira | Adesivo | |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| | Poliuretana de mamona | Resorcinol |
| MOR (MPa) | | |
| Caucho | 37,99 ^(2,15) Ca | 42,84 ^(2,06) Da |
| Cedrão | 38,26 ^(11,51) Cb | 60,77 ^(6,51) Ca |
| Cedro Indiano | 58,74 ^(8,53) Bb | 72,20 ^(0,54) Ba |
| Eucalipto | 91,51 ^(1,39) Aa | 92,96 ^(3,07) Aa |

*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Mediante a análise fatorial observou-se que houve interação entre os fatores tipo de madeira e tipo de adesivo.

Ao avaliar o adesivo dentro dos tipos de madeira, observa-se que dentro do adesivo poliuretano, somente as madeiras de Caucho e Cedrão foram estatisticamente iguais, apresentando os menores valores médios para o MOR, sendo estes de 37,99 e 38,26 MPa, respectivamente. A madeira de Eucalipto apresentou o maior valor médio para o MOR (91,51 MPa), diferindo estatisticamente das demais. A madeira de Cedro Indiano apresentou valor médio de 58,74 MPa, também diferindo das demais espécies. Dentro do adesivo resorcinol, todas as espécies diferiram estatisticamente entre si, e as madeiras de Caucho e Cedrão, assim como observado no MOE, também apresentaram valores médios inferiores para o MOR, sendo estes de 42,84 e 60,77 MPa, respectivamente. Novamente a madeira de Eucalipto apresentou o maior valor médio (92,96 MPa), seguida pela madeira de Cedro Indiano, que apresentou valor médio de 72,20 MPa.

Ao avaliar o tipo de madeira dentro dos adesivos, somente para as madeiras de Cedrão e Cedro Indiano houve diferença estatística ao comparar os dois tipos de adesivo. Verificou-se que, ao utilizar o adesivo resorcinol, foram obtidos maiores valores médios para o MOR quando comparado ao adesivo poliuretano. Os menores valores médios obtidos nas madeiras de Caucho e Cedrão para o MOR e MOE podem ser explicados pelas porcentagens elevadas de poros na madeira de Caucho (59,68%) e Cedrão (54,02%), e a baixa densidade obtida na madeira de Caucho (0,517 g/cm³), conforme Tabela 2. Existe influência da porosidade e, conseqüentemente da densidade, nos valores obtidos para o MOE e MOR da madeira utilizada, o que poderá ser observado nas vigas.

Outro fato importante é que, apesar da colagem na madeira de Eucalipto ter sido inferior (Tabela 12), não houve influência desta no teste de flexão

estática, sendo que a própria madeira suportou melhor o ensaio. Conforme mencionado por Zangiácomo (2003), a escolha das lâminas influencia diretamente as propriedades de rigidez das vigas. O autor relata que, vigas com distribuição não aleatória, apresentarão propriedades de rigidez superiores em relação às aquelas vigas distribuídas aleatoriamente. Lâminas com módulos de elasticidade dinâmicos superiores são distribuídas nas faces, local onde há maior solicitação da peça, sendo que a última tem contribuição importante no momento de inércia final da viga (ZANGIÁCOMO, 2003).

Os maiores valores médios obtidos para as madeiras de Cedrão e Cedro Indiano, ao utilizar o adesivo resorcinol, tanto para o MOE quanto para o MOR, podem ser explicados pelo fato da madeira de Cedrão apresentar maior porosidade (54,02%), que está relacionada à maior frequência de vasos (17,23) e elevada espessura de lúmen (15,49 μm), ocorrendo maior penetração do adesivo resorcinol, além deste apresentar menor viscosidade (863,6 cP), formando uma ligação adesivo-substrato mais forte, conforme Tabela 12.

Nielsen (1998) ao avaliar a MLC utilizando a madeira de Eucalipto, com seção retangular de 40 x 23 x 10 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente), emenda dentada, unidas com adesivo resorcinol e utilizando 10 lâminas, obteve valores médios de MOE e MOR de 10674,05 e 40,86 MPa, respectivamente, para madeira com densidade média de 0,630 g/cm^3 ; e de 11382,68 e 35,59 MPa, respectivamente, para madeira com densidade média de 0,680 g/cm^3 .

Zangiácomo (2003) determinou as propriedades físicas, de resistência e de rigidez de espécies tropicais alternativas utilizando os adesivos resorcinol e poliuretano à base de óleo de mamona para a confecção da MLC, com dimensões de 300 x 6 x 2 cm (comprimento, largura e espessura). Foram utilizadas duas intensidades de pressões: 0,8 e 1,2 MPa. O autor obteve para o MOE à flexão estática valores médios de 1175,47 MPa e 1104,12 MPa, quando

utilizada intensidade de pressão de 0,8 MPa e adesivo resorcinol e poliuretano, respectivamente. Para intensidade de pressão de 1,2 MPa foram obtidos valores médios para o MOE de 1105,16 MPa, quando utilizado adesivo resorcinol e 1157,18 MPa, quando utilizado adesivo poliuretano.

Cunha e Matos (2010) avaliaram o efeito do tipo de adesivo sobre a resistência e rigidez de vigas estruturais de MLC de *Pinus taeda* utilizando os adesivos resorcinol, na gramatura de 400 g/m² face dupla, e poliuretano, na gramatura de 200 g/m². As vigas possuíam dimensões de 310 x 15,6 x 12,2 cm (comprimento, largura e espessura) com seis lâminas sobrepostas e emendas dentadas no topo. Os autores obtiveram valores médios para o MOE e MOR de 15287 e 26 MPa, respectivamente, para o adesivo resorcinol; e de 15795 e 26 MPa, respectivamente, para o adesivo poliuretano.

Almeida et al. (2011) avaliaram vigas estruturais de MLC utilizando madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) utilizando adesivo resorcinol. As vigas possuíam dimensões de 240 x 10 x 3,5 cm (comprimento, largura e espessura, respetivamente), foram classificadas visualmente e, posteriormente pelo método não destrutivo de vibração transversal, utilizando as lâminas com menores módulos de elasticidade no miolo e os maiores módulos de elasticidade nas faces. Foram utilizadas três lâminas para a confecção da MLC, e as vigas permaneceram na prensa por 6 horas para a cura do adesivo. Os autores obtiveram valores médios para o MOE e o MOR de 8809 MPa e 41 MPa, respectivamente.

Iwakiri et al. (2014) avaliaram a influência da classificação da madeira nas propriedades mecânicas de MLC de Teca (*Tectona grandis*). As vigas possuíam dimensões de 300 x 7,5 x 2,5 cm (comprimento, largura, espessura), compostas por cinco lâminas, adesivo resorcinol, nas gramaturas de 350 e 450 g/m², e foram prensadas com pressão de 1 MPa. Os valores médios obtidos para o MOE e MOR são de 12738,67 e 78 MPa, respectivamente.

5.2.2.5 Resistência à compressão paralela às fibras

Na Tabela 20 estão representados os valores médios de compressão para os dois tipos de adesivo e as quatro espécies de madeira.

Tabela 20 Valores médios de compressão (MPa) para a madeira laminada colada (MLC) em função do tipo de madeira e do tipo de adesivo

| Tipo de madeira | Adesivo | |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| | Poliuretana de mamona | Resorcinol |
| Caucho | 23,32 ^(1,20) Cb | 29,17 ^(1,34) Ca |
| Cedão | 26,15 ^(0,57) Cb | 39,09 ^(1,39) Ba |
| Cedro Indiano | 38,97 ^(2,85) Ba | 43,00 ^(0,82) Ba |
| Eucalipto | 56,04 ^(2,90) Aa | 50,92 ^(5,93) Ab |

*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Mediante a análise fatorial observou-se que houve interação entre os fatores tipo de madeira e tipo de adesivo.

Ao analisar o tipo de adesivo dentro dos tipos de madeira, observa-se que para o adesivo poliuretano, somente as madeiras de Caucho e Cedão foram estatisticamente iguais, apresentando valores médios de 23,31 e 26,15 MPa, respectivamente. A madeira de Eucalipto apresentou o maior valor médio (56,04 MPa), sendo que as madeiras de Cedro Indiano e Eucalipto diferiram estatisticamente entre si e das demais. Para o adesivo resorcinol, as madeiras de Cedão e Cedro Indiano foram estatisticamente iguais, apresentando valores médios de 39,09 e 43,00 MPa, respectivamente, enquanto que as madeiras de Eucalipto e Caucho diferiram estatisticamente entre si e das demais espécies. Assim como observado no adesivo poliuretano, a madeira de Eucalipto

apresentou o maior valor médio também no adesivo resorcinol, sendo este valor de 50,92 MPa, o que pode ser explicado pela densidade elevada que esta espécie apresenta, apesar de ter apresentado valor inferior na colagem, quando avaliada a resistência ao cisalhamento seco e falha na madeira (Tabela 12).

Avaliando o tipo de madeira dentro dos tipos de adesivo observa-se que somente a madeira de Cedro Indiano foi estatisticamente igual para os dois tipos de adesivo, sendo os valores de 38,97 MPa, para o adesivo poliuretano, e de 43,00 MPa, para o adesivo resorcinol. Somente a madeira de Eucalipto apresentou o maior valor médio para o adesivo poliuretano (56,04 MPa). As demais madeiras de Caucho e Cedrão apresentaram maiores valores médios com o adesivo resorcinol, sendo estes valores de 29,17 e 39,09 MPa, respectivamente. O adesivo resorcinol apresentou resultados mais satisfatórios que o adesivo poliuretano por apresentar menor viscosidade, o que facilitou a distribuição uniforme por toda a peça e uma melhor penetração nas madeiras mais porosas, como as madeiras de Caucho e Cedrão, conforme pode ser observado nos maiores valores obtidos para falha na madeira (Tabela 12) e porosidade (Tabela 6).

A variação encontrada nos resultados entre as madeiras pode ser explicada por vários fatores relacionados às suas características, como a variabilidade anatômica da madeira, associada à densidade e à porosidade, que influenciaram a formação da ligação adesiva (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2000).

Fiorelli e Dias (2005) avaliaram o comportamento da MLC quando solicitada por esforços de compressão paralela às fibras e sua influência na resistência de vigas de MLC utilizando a madeira de *Pinus spp.* Os valores médios obtidos para a compressão nos corpos de prova estruturais e isentos de defeitos foram de 9956 e 6187 MPa, respectivamente.

Magalhães e Santos (2009) estudaram a MLC utilizando o Eucalipto, e obtiveram valor médio para o ensaio de compressão de 84,2 MPa.

França (2012) avaliou a qualidade da MLC produzida utilizando a madeira de *Acacia mangium* Willd e os adesivos comerciais poliuretano líquido (PUR), na gramatura de 300 g/m², e melamina-ureia-formaldeído (MUF), na gramatura de 500 g/m², visando a sua aplicação em elementos estruturais. O autor obteve valores médios para a compressão nos corpos de prova secos e saturados utilizando adesivo poliuretano de 52,72 e 29,88 MPa, respectivamente.

5.2.2.6 Ensaio de delaminação

Mediante a análise fatorial observou-se que não houve interação entre os fatores tipo de madeira e tipo de adesivo.

Pode-se observar nas Tabelas 21 e 22, os valores médios obtidos para o ensaio de delaminação nas vigas de MLC.

Tabela 21 Valores médios de delaminação (%) para a madeira laminada colada (MLC) avaliando o tipo de madeira

| Tipo de madeira | Delaminação (%) |
|------------------------|----------------------------|
| Caucho | 18,13 ^(25,22) B |
| Cedão | 94,17 ^(14,29) A |
| Cedro Indiano | 71,04 ^(21,45) A |
| Eucalipto | 88,13 ^(19,39) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Avaliando as porcentagens de delaminação dentro de cada tipo de madeira, observa-se que, somente a madeira de Caucho diferiu estatisticamente das demais espécies, apresentando valor médio de 18,13%. Fato que comprova a

qualidade da colagem, demonstrando que a ligação adesiva foi suficientemente forte, remetendo positivamente às suas características anatômicas favoráveis para formação de liga adesiva.

A melhor ligação adesiva observada na madeira de Caucho, o que promoveu a menor porcentagem de delaminação, pode ser explicada pelo maior diâmetro dos vasos (239,32 μm), maior comprimento dos vasos (476,79 μm), maior espessura do lúmen (15,64 μm), maior espessura da parede (3,11 μ) e maior espessura do raio (65,51 μm), o que possibilitou maior penetração do adesivo na madeira, formando ligações mais fortes e, conseqüentemente adequadas a este ensaio, reduzindo a porcentagem de delaminação, o que demonstra superioridade na qualidade da colagem, quando comparada às demais espécies.

Os demais tipos de madeira, Cedrão, Cedro Indiano e Eucalipto foram estatisticamente iguais, apresentando os maiores valores médios, sendo estes de 94,17; 71,04; e 88,13%, respectivamente.

Nenhuma das espécies estudadas conseguiu atender à norma *European Standard* EN 386 (2001), que estipula valor máximo de 10% para delaminação.

Tabela 22 Valores médios de delaminação (%) para a madeira laminada colada (MLC) avaliando o adesivo

| Tipo de adesivo | Delaminação (%) |
|------------------------|----------------------------|
| Poliuretano | 67,5 ^(41,87) A |
| Resorcinol | 68,23 ^(31,06) A |

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses

Avaliando o tipo de adesivo utilizado e a sua porcentagem de delaminação, observa-se que não houve diferenciação estatística. Ambos

apresentaram valores elevados de delaminação, demonstrando a fragilidade quando expostos à umidade e temperatura, não sendo condizente com as características de resistência à água e temperatura.

A avaliação da eficiência destes adesivos, quando submetidos a variações de umidade, pressão e temperatura é de fundamental importância para garantir a integridade do elemento estrutural em MLC durante a vida útil da construção (FIORELLI; DIAS, 2005).

Almeida et al. (2011) avaliaram vigas estruturais de MLC utilizando madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) utilizando adesivo resorcinol. As vigas possuíam dimensões de 240 x 10 x 3,5 cm (comprimento, largura e espessura), foram classificadas visualmente e, posteriormente pelo método não destrutivo de vibração transversal, utilizando as lâminas com menores módulos de elasticidade no miolo e os maiores módulos de elasticidade nas faces. Foram utilizadas três lâminas para a confecção da MLC, e as vigas permaneceram na prensa por 6 horas para a cura do adesivo. O ensaio de delaminação foi realizado de acordo com a norma *American Institute of Timber Construction* - AITC 190 (2007), e os autores concluíram que não houve alterações que comprometessem a integridade na interface entre a linha de cola e as lâminas de Paricá.

Calil Neto (2011) obteve resultados de delaminação iguais a 0,6% para o *Pinus taeda*, 2,2 % para a Teca e 38,6% para o *Lyptus* utilizando adesivo resorcinol.

6 CONCLUSÕES

Houve interação significativa entre o tipo de adesivo e o tipo de madeira quando avaliadas as propriedades compressão, módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática. Em ambas as propriedades a madeira de Eucalipto obteve os melhores resultados, não sendo observado efeito significativo do tipo de adesivo. Entretanto, há a necessidade de melhorar a colagem desta madeira, uma vez que os seus resultados de cisalhamento seco e pós-fervura não se mostraram satisfatórios quando comparados com as outras madeiras.

Em relação à colagem, observou-se pelo teste de cisalhamento, que houve influência significativa do tipo de madeira, sendo afetadas diretamente pelo teor de extrativos e as características anatômicas. O tipo de adesivo afetou significativamente apenas o ensaio de cisalhamento pós-fervura, onde se verificou os melhores resultados para o adesivo resorcinol. De forma geral, a madeira de Cedro Indiano obteve os melhores valores de cisalhamento, seguida pela madeira de Caucho.

A melhor colagem da madeira de Cedro Indiano influenciou positivamente nas propriedades de compressão, módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática das vigas avaliadas. Verificando-se que após a madeira de Eucalipto, a madeira de Cedro Indiano se mostrou a mais apta para produção das vigas.

Não foi observada relação direta entre a porosidade, densidade e as propriedades mecânicas da madeira sobre as propriedades fundamentais das vigas (compressão, módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática).

Houve correlação significativa entre o MOEd e o MOE e MOR à flexão estática, podendo ser utilizada para avaliação não destrutiva das peças.

De forma geral, os adesivos resorcinol e poliuretano à base de mamona podem ser utilizados para produção de vigas de madeira laminada colada com as madeiras de Eucalipto, Cedro Indiano, Caucho e Cedrão. Sendo, em alguns casos, necessários ajustes de processo.

REFERÊNCIAS

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 803-811, 2012.

ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Colagem varia de acordo com propriedades da madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 88, p. 28-32, 2005.

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

ALMEIDA, D. H. et al. Evaluation of quality in the adhesion of glued laminated timber (glulam) of paricá and lyptus wood species. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, v. 4, n. 3, p. 114-118, 2014.

ALMEIDA, D. H. et al. Madeira laminada colada (MLC) da espécie Paricá. **Madeira: arquitetura e engenharia**, São Carlos, v. 12, n. 30, p. 71-82, 2011.

ALMEIDA, N. F. **Avaliação da qualidade da madeira de um híbrido de *Pinus elliotti* var. *elliotti* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de lâminas e manufatura de compensados**. 2011. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo ureia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

AMARAL, C. M. A. **Secagem de madeiras**: contribuição para o estudo da secagem das madeiras de *Pinus pinaster* Sol., *Quercus ilex* L. e *Populus* sp. Lisboa: ISA, 1967.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC Test T110**: Test methods for structural glued laminated timber. Colorado, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 245:** standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2559:** adhesives for bonded structural wood products for use under exterior exposure conditions. West Conshohocken, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3110:** standard specification for adhesives used in nonstructural glued lumber products. **Annual Book of A.S.T.M. Standards**, Philadelphia, v. 15, v. 6, p. 184-192, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5771:** standard test method for cloud point of petroleum products (Optical Detection Stepped Cooling Method). West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1582:** standard test method for nonvolatile content of liquid phenol, resorcinol, and melamine adhesives. West Conshohocken, 1998. 2 p.

APRILANTI, M. D. **Influência de um corte na borda tracionada de uma viga maciça simulando uma emenda de topo na lâmina inferior de vigas laminadas coladas.** 2010. 108 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2010.

ARAÚJO, J. A. et al. Propriedades físicas da madeira de *Cedrelinga cateniformis* Ducke para produção de móveis. REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA, 66., 2014, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: SBPC, 2014. 1 CD ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:** projeto de estruturas de madeira. São Paulo, 1997. 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989:** pastas celulósicas e madeira – determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999:** papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

AZAMBUJA, M. A. Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC). 2002. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A. Eficiência do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona na colagem de emendas dentadas para as espécies Pinus e Eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., São Pedro, 2006. **Anais...** São Pedro: Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira, 2006. 1 CD ROM.

AZAMBUJA, M. A. et al. Proposta de normalização para Madeira Laminada Colada (MLC). **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, n. 13, artigo 1, 2004. Disponível em: <<http://madeira.set.eesc.usp.br/article/viewFile/278/pdf>>. Acesso em 21 maio 2015.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009. 134 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BAILLÉRES, H. et al. Lignin structure in *Buxus sempervirens* reaction wood. **Phytochemistry, Local**, v. 44, n. 1, p. 35-39, 1997.

BALDWIN, R. F. **Plywood manufacturing practices**. San Francisco: M. Freeman, 1995. 388 p.

BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. 85 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 224 p.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie – adesivo – tratamento químico**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, F. A. Adesivos e sua importância na indústria madeireira. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Vitória: Aquarius, 2007. p. 129-163.

CARNEIRO, R P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

CARVALHO, P. E. Espécies introduzidas alternativas às do gênero *Pinus* e *Eucalyptus* para reflorestamento no Centro-sul do Brasil. In: GALVÃO, A. P. M. (Coord.). **Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais**. Colombo: Embrapa Florestas, 1998.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **Descripcion de características generales, macroscópicas de las maderas angiospermas dicotiledoneas**. Caracas, 1974. 19 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Mamona**. (Série histórica). Disponível em: <www.conab.gov>. Acesso em: 10 mar. 2015.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Plantio de eucalipto no Brasil: mitos e verdades**. Brasília, 2011. 20 p.

COSSOLINO, L. C. et al. Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de *Pinnus Oocarpa*. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, 2009.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 593-600, 2011a.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Bending stiffness and resistance of structural glulam beams and “I” – joist composed of different adhesives. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 345-356, 2010.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Estimativa do módulo de elasticidade em vigas laminadas coladas pelos métodos estático e dinâmico. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 97-112, 2011b.

DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt woods. division of applied chemistry technological paper. **Division of Applied Chemistry Technological Paper**, Melbourne, v. 66, p. 1-34, 1972.

DEGIOVANI, A. S. E.; SEGUNDINHO, P. G. A.; CALIL JÚNIOR, C. Comportamento da linha de cola em madeira laminada colada (MLC) sob altas temperaturas. **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v. 12, n. 30, p. 31-48, 2012.

DIAS, A. A.; AZAMBUJA, M.; OLIVEIRA JÚNIOR, S. F. Análise estatística comparativa entre adesivos poliuretanos frente ao resorcinol-formaldeído aplicados em emenda dentada estrutural para a espécie *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABC, 2006. 1 CD ROM.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana a base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 178 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DIAS, F. M. et al. Relation between the compaction rate and physical and mechanical properties of particleboards. **Materials Research**, São Carlos, v. 8, n. 3, p. 329-333, 2005.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 102-113, 2004.

DINWOODIE, J. M. **Timber its nature and behavior**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981.

DRESSLER, V. L. **Investigação de métodos e procedimentos para determinação de tanino e cromo em efluente de curtume**. 1994. 102 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1994.

ELEOTÉRIO, J. R. et al. Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 329 - 336, abr./jun. 2015.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. Tradução de Berta Lange de Morretes. São Paulo: E. Blücher, 1974. 293 p.

EUROPEAN STANDARD (EN 386): glued laminated timber: performance requirements and minimum production requirements. Brussels, 2001.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 371 p.

FERREIRA, C. E. M.; CARRASCO, E. V.; HELLMEISTER, J. C. Tecnologias de adesivos poliuretanos: propriedades e aplicação em madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4., 1988, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EBRAMEM, 1988. p. 39-74.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Avaliação do comportamento da madeira na compressão paralela às fibras e sua influência na resistência de vigas de MLC reforçadas com PRF. **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v. 1 p. 1-15, 2005. 1 CD ROM.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, v. 2/3, p. 67-74, 1971.

FOLLRICH, J. et al. Effect of grain angle on shear strength of glued end grain to flat grain joints of defect-free softwood timber. **Wood Science and Technology**, New York, v. 41, p. 501-509, 2007.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: Department of Agriculture, 1999. 463 p.

FRANÇA, L. C. A. **Madeira laminada colada (MLC) de *Acacia mangium* Willd produzida com adesivos estruturais**. 2012. 50 p. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

FRANKLIN ADHESIVES. **Trinta princípios da colagem de madeira**. 2003. 5 p. Disponível em: <<http://www.franklinadhesives.com>>. Acesso em: 10 maio 2003.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005. p. 215-278.

GARCIA, A.; RECH, M. **Adesivos para a madeira e móveis**. 2011. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1547&subject=Adesivos&title=Adesivos%20para%20a%20madeira%20e%20m%F3veis>. Acesso em: 1 nov. 2011.

GONÇALEZ, J. C. et al. Características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *E. Cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

GONÇALEZ, J. C.; GONÇALVEZ, D. M. Valorização de duas espécies de madeira *Cedrelinga catenaeformis* e *Enterolobium schomburgkii* para a indústria madeireira. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 70, p. 69-74, 2001.

GRANATO, A. F. **Aspectos tecnológicos da fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2011. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

GUIMARÃES, I. L. et al. Caracterização química e física da madeira de procedências de *Eucalyptus*. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 634-645, 2013.

HAUBRICH, J. L.; GONÇALVES, C.; TONET, A. Adesivos vinílicos apresentam soluções para madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 103, p. 66-70, 2007.

HONORATO, S. J. A. et al. Cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*) una opción agroflorestal para la sierra Norte del estado de Puebla. **Folleto Técnico INIFAP**, Cpyacan, n. 1, p. 41, 2005.

HUNT, G. M. **Preservación de la madera**. Barcelona: Salvat, 1962.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual**. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. **Madeiras da Amazônia**: características e utilização. Brasília, 1981. v. 1, 113 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. **Madeiras da Amazônia**: características e utilização. Brasília, 1988. v. 2, 236 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. *Eucalyptus grandis*. Disponível em: <<http://ibflorestas.org.br/loja/sementes/semente-eucalipto-grandis.html>>. Acesso em: 1 ago. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Madeiras da Amazônia**: características e utilização. Brasília, 1997. v. 3, 141 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden). Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/cief/especies/grandis.asp>>. Acesso em: 1 ago. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA. **Catálogo de madeiras da Amazônia**: característica e utilização: área da Hidrelétrica de Balbina. Manaus, 1991. 163 p.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Cham, v. 10, n. 3, p. 221-359, 1989.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação da resistência de juntas coladas da madeira de *Eucalyptus benthamii* com diferentes adesivos e faces de colagem. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 411-416, set. 2013.

IWAKIRI, S. et al. Características de Vigas Laminadas Coladas Confeccionadas com Madeira de Teca (*Tectona grandis*). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 2, p. 269-275, 2014.

IWAKIRI, S.; KEINERT JÚNIOR, S.; MENDES, L. M. Painéis de madeira compensada. In: IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Fupef, 2005. 254 p.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira**. Curitiba: Fupef, 1998. 128 p. (Série didática no 1/98).

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

JESUS, H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, L. L. G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 16, p. 3-30, 2002.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology: wood based materials**. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 703 p.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: BERGMAN, R. et al. **Wood handbook**. Washington: USDA, 2010. p. 100-145.

LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA. **Banco de dados do Laboratório de Tecnologia da Madeira**. Curitiba: UFPR, 2009.

LELIS, R. **Zur Bedeutung der Kerninhaltsstoffe obligatorisch verkernter Nadelbaumarten bei der Herstellung von feuchtebeständigen und biologisch resistenten Holzspanplatten, am Beispiel der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco)**. 1995. 175 p. Tesis (Doktorwürde en Wissenschaft Forst) - Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, Göttingen, 1995.

LIMA, C. K. P. **Avaliação da qualidade de juntas coladas da madeira de clones de *Eucalyptus***. 2006. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

LIMA, K. P. L. et al. Colagem da madeira de clones de *Eucalyptus* com três adesivos comerciais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 73-77, 2008.

LOBÃO, M. S. et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

LOPES, A. L. C. et al. Zoneamento climático preliminar para o cultivo da mamona quanto à deficiência hídrica para o estado de Minas Gerais. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA TECNOLÓGICA, 8., 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: EPAMIG, 2011. 1 CD ROM.

LOPES, C. S. D. **Caracterização da madeira de três espécies de eucalipto para uso em movelaria**. 2007. 88 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

LOPES, G. A.; GARCIA, J. N. Densidade básica e umidade natural da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith, de Itatinga, associadas aos padrões de casca apresentados pela população. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 62, p. 13-23, dez. 2002.

LOPES, M. C. **Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada a classificação de painéis colados lateralmente de madeira de *Pinus taeda* L.** 2008. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Floresta) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LORENZI, H. et al. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas.** Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003.

LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.; ALENCAR, J. C. **Essências madeireiras da Amazônia.** Manaus: INPA/SUFRAMA, 1979. 245 p.

MACLEAN, J. D. **Preservative treatment of wood by pressure methods.** Madison: U. S. Department of Agriculture, 1952. 160 p.

MAGALHÃES, L. N.; SANTOS, P. R. D. L. A madeira laminada colada como material estrutural de uma construção sustentável. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 1, n. 2, p. 25-27, jul./dez. 2009.

MAGALHÃES, W. L. E. Tratamento mecânico visando o aumento da permeabilidade em madeira de *Pinus elliotti* Engelm Var. *elliotti*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Indi, 2004.

MAGHEMBE, J. A.; PRINS, H. Performance of multipurpose trees for agroforestry two years after planting at Makoka, Malawi. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 64, n. 2/3, p. 171-182, 1994.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles and practice.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.

MARTÍNEZ, P. E.; GARCIA, J. M. Evaluación de cinco tratamientos fitosanitarios en la producción de Plántulas de Cedro Rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn) en Etapa de Semillero en Tuxpan, Veracruz, México. **Revista UDO Agrícola**, Maturpin, v. 4, n. 1, p. 27-30, 2004.

MATOS, J. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997. 115 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MENDES, L. M. et al. Variação da massa específica da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. no sentido longitudinal dos caules. **Cerne**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 1-7, 1999.

MORALES, E. A. M. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira:** proposta para simplificação de procedimentos metodológicos. 2005. 111 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; ALVES, R. C. Influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2013.

NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de adesão de juntas coladas de diferentes espécies comerciais de madeira. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 593-601, 2013.

NASCIMENTO, A. M. et al. Comportamento de ligações adesivas em madeira de reflorestamento. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 9, n. 1, p. 54-62, 2002.

NATTERER, J. Quality criteria for timber design. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, 2., 1991, London. **Proceedings...** London: [s. n.], 1991. p. 19-26.

NIELSEN, I. R. **Utilização da madeira comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake X *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na confecção de vigas laminadas coladas.** 1998. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

NOCK, H. P.; RICHTER, H. G. **Adesão e adesivos:** adesivos e sua aplicação na indústria madeireira. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1978. 94 p.

OHARA, G. H.; KOJIMA, K. E.; ROSSI, J. C. Estudo experimental da biocompatibilidade do polímero poliuretano da mamona implantada intra-óssea e intra-articular em coelhos. **Acta Ortopédica Brasileira**, São Paulo, n. 3, p. 62, 1995.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil.** 1998. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, M. C. J. **Biodiesel de mamona em trator agrícola: desempenho em função do período de armazenamento e da proporção biodiesel\diesel.** 2012. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of technology.** 4th ed. New York: McGraw Hill, 1980. 705 p.

PARRA SERRANO, L. J. **Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas.** 2013. 100 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba, 2013.

PETRAUSKI, S. M. F. C. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo de mamona.** 2012. 119 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorreificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 61, p. 122-132, 2002.

PINTO, J. A. **Análise da viabilidade do uso da madeira de “*Cryptomeria japonica*” para laminação e produção de painéis compensado.** 2011. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology.** New York: M. Dekker, 1994.

PIZZI, A. Natural phenolic adhesives I: Tannin. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology.** New York: M. Dekker, 1994. p. 347-358.

PLASTER, O. B. et al. Comportamento de juntas coladas na madeira serrada de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras v. 14 n. 3, p. 251-258, 2008.

PRADO, C. A. et al. **Características físicas e químicas da madeira de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.** Colombo: Embrapa Florestas, 2003. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 14).

PROPERZI, M.; PIZZI, A.; UZIELLI, L. Comparative wet wood glueing performance of different types of Glulam wood adhesives. **Holz als Roh und Werkstoff**, Berlin, v. 61, p. 77-78, 2003.

PSCHEIDT, L. S. **Avaliação das etapas do processo produtivo de portas lisas na empresa Dal Pai.** 2007. 50 p. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RAÍ, S. N. Pré-treatment of *Acrocarpus fraxinifolius* seeds. **India Forester**, Dehradun, v. 102, n. 8, p. 488-491, 1976.

RIVER, B. H. Fracture of adhesive-bonded Wood joints. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology.** New York: M. Dekker, 1994. cap. 9.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: Seru (*Allantoma lineata*) e Marupá (*Simarouba amara*). **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 345-354, 2010.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology.** New York: M. Dekker, 1994. p. 19-32.

SEGUNDINHO, P. G. A. et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1155-1161, 2012.

SELBO, M. L. **Adhesives bonding of wood.** Washington: USDA, 1975. (Technical Bulletin, 1512).

SELLERS JUNIOR, T. Adhesives in the wood industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology.** New York: M. Dekker, 1994. p. 599-614.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus spp.*** 1990. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden de diferentes idades visando sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Tecnologia e Produtos Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, S. A. M. et al. Painéis MDF produzidos com resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 15, n. 1, p. 7-20, jan./abr. 2013.

SIMPSON, W. T. **Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings:** tropical and temperate hardwoods. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1996.

SKEIST, I. **Handbook of adhesives.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 778 p.

SOARES, T. S.; CARVALHO, R. M. M. A.; VALE, A. B. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 689-694, 2003.

SOUZA, M. H. et al. **Madeiras tropicais brasileiras.** Brasília: IBAMA, 1997. 152 p.

STELLA, J. C. **A influência de variáveis do ciclo de prensagem e gramatura de cola nas propriedades mecânicas de compensados de paricá (*Schizolobium amazonicum*).** 2009. 51 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

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

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Product guide:** glulam. Disponível em: <<http://www.apawood.org/>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

TIENNE, D. L. C. et al. Qualidade de adesão de juntas de madeira de pinus coladas em condições simuladas de serviço interno e externo. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 1, p. 16-29, 2011.

TIENNE, D. L. C. **Qualidade da adesão de juntas coladas expostas a condição de serviço externo e interno**. 2006. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas de rápido crescimento para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. 260 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TSOUMIS, G. **Science and Technology of wood**: structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood handbook**: wood as engineering material. Washington USDA, 1999. 473 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Banco de dados do Laboratório de Tecnologia da Madeira**. Curitiba: UFPR, 2009.

VALE, A. T.; MARTINS, I. S.; ARAÚJO, W. O. Estudo da densidade básica de três espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 16, n. 2, p. 209-217, 1992.

VAN RENSBURG, B. W. J. et al. The effect of timber density and type of adhesive on the strenght of finger-joints in s.a. *pine* and *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, Pretoria, n. 140, p. 39-43, 1987.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. In: **WOOD handbook: wood as an engineering material**. Madison: U.S.D.A, 1999. Chap. 9, p. 9.1-9.24. Disponível em: <http://www.woodweb.com/knowledge_base/Adhesive_bonding_of_wood_materials.html#sthash.3wMxEHJB.dpuf>. Acesso em: 22 jan. 2015.

VILAR, W. D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. São Paulo: Grupo Pronor, 1993.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

WATAI, L. T. **Painéis derivados da madeira**. São Paulo. Associação Brasileira de Painéis de Madeira, 1987.

WHITMORE, J. L.; OTAROLA, T. *Acrocarpus fraxinifolius* Wight, espécie de rápido crecimiento inicial, buena forma y madera de usos múltiples. **Revista Interamericana de ciências Agrícolas**, Turrialba, v. 26, n. 2, p. 201-204, 1976.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZANGIÁCOMO, A. L.; LAHR, F. A. R. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 9, n. 40, p. 103-131, 2007.

ANEXOS

ANEXO A Tabelas de análise de variância

Caracterização da madeira

Densidade aparente

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|------|--------|--------|--------|--------|
| Trat | 3 | 0,0568 | 0,0189 | 90,728 | 0,0000 |
| Erro | 44 | 0,0092 | 0,0002 | | |
| Total corrigido | 47 | 0,0659 | | | |
| CV (%) | 3,02 | | | | |

Densidade básica

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|------|--------|--------|--------|--------|
| Trat | 3 | 0,1211 | 0,0404 | 35,401 | 0,0000 |
| Erro | 44 | 0,0502 | 0,0011 | | |
| Total corrigido | 47 | 0,1713 | | | |
| CV (%) | 5,73 | | | | |

Umidade

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|------|---------|---------|---------|--------|
| Trat | 3 | 64,9712 | 21,6571 | 527,337 | 0,0000 |
| erro | 44 | 1,8070 | 0,0411 | | |
| Total corrigido | 47 | 66,7782 | | | |
| CV (%) | 1,65 | | | | |

Retração tangencial até 12%

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-------|---------|---------|--------|--------|
| Trat | 3 | 69,6512 | 23,2171 | 34,476 | 0,0000 |
| erro | 44 | 29,6306 | 0,6734 | | |
| Total corrigido | 47 | 99,2818 | | | |
| CV (%) | 19,91 | | | | |

Retração radial até 12%

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 28,5291 | 9,5097 | 25,259 | 0,0000 |
| erro | 44 | 16,5657 | 0,3765 | | |
| Total corrigido | 47 | 45,0948 | | | |
| CV (%) | 39,60 | | | | |

Retração tangencial de 0 até 12%

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 3,404 | 1,1335 | 5,895 | 0,0018 |
| erro | 44 | 8,4596 | 0,1923 | | |
| Total corrigido | 47 | 11,8599 | | | |
| CV (%) | 10,42 | | | | |

Retração radial 0 até 12%

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 15,7475 | 5,2492 | 38,303 | 0,0000 |
| erro | 44 | 6,0298 | 0,1370 | | |
| Total corrigido | 47 | 21,7773 | | | |
| CV (%) | 16,30 | | | | |

Retração tangencial total

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 44,2699 | 14,7567 | 18,355 | 0,0000 |
| erro | 44 | 35,3751 | 0,8040 | | |
| Total corrigido | 47 | 79,6451 | | | |
| CV (%) | 10,76 | | | | |

Retração radial total

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 43,2220 | 14,4073 | 13,733 | 0,0000 |
| erro | 44 | 46,1620 | 1,0491 | | |
| Total corrigido | 47 | 89,3840 | | | |
| CV (%) | 20,19 | | | | |

Anisotropia

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 54,3236 | 18,1079 | 30,427 | 0,0000 |
| erro | 44 | 26,1855 | 0,5951 | | |
| Total corrigido | 47 | 80,5091 | | | |
| CV (%) | 40,40 | | | | |

Porosidade

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 799,6377 | 266,5459 | 38,317 | 0,0000 |
| Erro | 44 | 306,0783 | 6,9563 | | |
| Total corrigido | 47 | 1105,7159 | | | |
| CV (%) | 4,94 | | | | |

MOE à flexão estática

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|---------------|---------------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 64581417,7685 | 21527139,2562 | 38,857 | 0,0000 |
| erro | 44 | 24376146,6223 | 554003,3323 | | |
| Total corrigido | 47 | 88957564,3808 | | | |
| CV (%) | 13,06 | | | | |

MOR à flexão estática

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 1,7017 | 0,5672 | 68,065 | 0,0000 |
| erro | 44 | 0,3667 | 0,0083 | | |
| Total corrigido | 47 | 2,0684 | | | |
| CV (%) | 12,26 | | | | |

Compressão

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 3515,7229 | 1171,9076 | 37,0000 | 0,0000 |
| erro | 44 | 1393,6297 | 31,6734 | | |
| Total corrigido | 47 | 4909,3526 | | | |
| CV (%) | 13,61 | | | | |

Extrativos

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 57,1232 | 19,0411 | 549,261 | 0,0000 |
| erro | 8 | 0,2773 | 0,0347 | | |
| Total corrigido | 11 | 57,4005 | | | |
| CV (%) | 2,90 | | | | |

Cinzas

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 5,2891 | 1,7630 | 236,648 | 0,0000 |
| erro | 8 | 0,0596 | 0,0075 | | |
| Total corrigido | 11 | 5,3487 | | | |
| CV (%) | 12,23 | | | | |

Lignina

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 317,3600 | 105,7867 | 7,929 | 0,0088 |
| erro | 8 | 106,7407 | 13,3426 | | |
| Total corrigido | 11 | 424,1007 | | | |
| CV (%) | 11,11 | | | | |

Holocelulose

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 573,6434 | 191,2145 | 13,866 | 0,0015 |
| erro | 8 | 110,3236 | 13,7905 | | |
| Total corrigido | 11 | 683,9670 | | | |
| CV (%) | 6,19 | | | | |

pH

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Trat | 3 | 5,2282 | 1,7427 | 148,634 | 0,0000 |
| erro | 8 | 0,0938 | 0,0117 | | |
| Total corrigido | 11 | 5,3220 | | | |
| CV (%) | 2,06 | | | | |

Caracterização da madeira laminada colada

MOE à flexão estática

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|------|----------------|---------------|---------|--------|
| Madeira | 3 | 151542463,9798 | 50514154,6599 | 221,434 | 0,0000 |
| Adesivo | 1 | 2893356,4838 | 2893356,4838 | 12,683 | 0,0026 |
| Mad*Ad | 3 | 2537330,4277 | 845776,8092 | 3,708 | 0,0337 |
| erro | 16 | 3649966,6859 | 228122,9179 | | |
| Total corrigido | 23 | 160623117,5772 | | | |
| CV (%) | 5,94 | | | | |

MOE desdobramento madeira

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|---------------|---------------|---------|--------|
| Madeira /1 | 3 | 91290740,2569 | 30430246,7523 | 133,394 | 0,0000 |
| Madeira /2 | 3 | 62789054,1506 | 20929684,7169 | 91,747 | 0,0000 |
| erro | 16 | 3649966,6859 | 228122,9179 | | |

MOE desdobramento adesivo

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|--------------|--------------|--------|--------|
| Adesivo /1 | 1 | 4021225,1736 | 4021225,1736 | 17,627 | 0,0007 |
| Adesivo /2 | 1 | 1074462,4838 | 1074462,4838 | 4,710 | 0,0454 |
| Adesivo /3 | 1 | 299852,0860 | 299852,0860 | 1,314 | 0,2685 |
| Adesivo /4 | 1 | 35147,1681 | 35147,1681 | 0,154 | 0,6999 |
| erro | 16 | 3649966,6859 | 228122,9179 | | |

MOR à flexão estática

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|------|------------|-----------|--------|--------|
| Madeira | 3 | 9287,7783 | 3095,9261 | 92,340 | 0,0000 |
| Adesivo | 1 | 669,9267 | 669,9267 | 19,981 | 0,0004 |
| Madeira*Adesivo | 3 | 400,2134 | 133,4045 | 3,979 | 0,0270 |
| Erro | 16 | 536,4377 | 33,5274 | | |
| Total corrigido | 23 | 10894,3561 | | | |
| CV (%) | 9,35 | | | | |

MOR desdobramento madeira

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|-----------|-----------|--------|--------|
| Madeira /1 | 3 | 5717,9242 | 1905,9747 | 56,848 | 0,0000 |
| Madeira /2 | 3 | 3970,0676 | 1323,3559 | 39,471 | 0,0000 |
| erro | 16 | 536,4377 | 33,5274 | | |

MOR desdobramento adesivo

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|----------|----------|--------|--------|
| Adesivo /1 | 1 | 759,8251 | 759,8251 | 22,663 | 0,0002 |
| Adesivo /2 | 1 | 271,8920 | 271,8920 | 8,110 | 0,0116 |
| Adesivo /3 | 1 | 35,2838 | 35,2838 | 1,052 | 0,3202 |
| Adesivo /4 | 1 | 3,1393 | 3,1393 | 0,094 | 0,7636 |
| Erro | 16 | 536,4377 | 33,5274 | | |

Compressão

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|------|-----------|----------|---------|--------|
| Madeira | 3 | 2490,9279 | 830,3093 | 114,658 | 0,0000 |
| Adesivo | 1 | 117,5280 | 117,5280 | 16,230 | 0,0010 |
| Madeira*Adesivo | 3 | 248,9641 | 82,9881 | 11,460 | 0,0003 |
| erro | 16 | 115,8659 | 7,2416 | | |
| Total corrigido | 23 | 2973,2861 | | | |
| CV (%) | 7,02 | | | | |

Compressão desdobramento madeira

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|-----------|----------|--------|--------|
| Madeira /1 | 3 | 2004,6518 | 668,2173 | 92,275 | 0,0000 |
| Madeira /2 | 3 | 735,2403 | 245,0810 | 33,843 | 0,0000 |
| Erro | 16 | 115,8659 | 7,2416 | | |

Compressão desdobramento adesivo

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|----------|----------|--------|--------|
| Adesivo /1 | 1 | 251,4243 | 251,4243 | 34,719 | 0,0000 |
| Adesivo /2 | 1 | 24,3614 | 24,3614 | 3,364 | 0,0853 |
| Adesivo /3 | 1 | 51,3338 | 51,3338 | 7,089 | 0,0170 |
| Adesivo /4 | 1 | 39,3728 | 39,3728 | 5,437 | 0,0331 |
| Erro | 16 | 115,8659 | 7,2416 | | |

Cisalhamento seco

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Madeira | 3 | 36,1475 | 12,0492 | 10,168 | 0,0000 |
| Adesivo | 1 | 0,0161 | 0,0161 | 0,014 | 0,9077 |
| Madeira*Adesivo | 3 | 0,2831 | 0,0944 | 0,080 | 0,9709 |
| Erro | 40 | 47,3986 | 1,1850 | | |
| Total corrigido | 47 | 83,8453 | | | |
| CV (%) | 17,74 | | | | |

Notas - Cisalhamento seco

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------------|
| Madeira | 3 | 40925,0153 | 13641,6718 | 135,026 | 0,0000 |
| Adesivo | 1 | 2144,5480 | 2144,5480 | 21,227 | 0,0000 |
| Madeira*Adesivo | 3 | 3439,1280 | 1146,3760 | 11,347 | 0,0000 |
| Erro | 40 | 4041,2013 | 101,0300 | | |
| Total corrigido | 47 | 50549,8927 | | | |
| CV (%) | 23,35 | | | | |

Cisalhamento úmido

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------------------|-------------------|-----------|-----------------|
| Madeira | 3 | 321,5369 | 107,1790 | 34,293 | 0,0000 |
| Adesivo | 1 | 5,0264 | 5,0264 | 1,608 | 0,2131 |
| Mad*Ad | 2 | -1,23288542E+ 0000 | -6,16442712E-0001 | -0,197 | 1,0000 |
| erro | 35 | 109,3880 | 3,1254 | | |
| Total corrigido | 41 | 434,7184 | | | |
| CV (%) | 23,13 | | | | |

Notas - Cisalhamento úmido

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| Madeira | 3 | 943,4524 | 314,4841 | 0,717 | 0,5487 |
| Adesivo | 1 | 4524,0079 | 4524,0079 | 10,310 | 0,0028 |
| Madeira*Adesivo | 2 | 2071,8254 | 1035,9127 | 2,361 | 0,1092 |
| Erro | 35 | 15358,3333 | 438,8095 | | |
| Total corrigido | 41 | 22897,6190 | | | |
| CV (%) | 137,47 | | | | |

Cisalhamento pós-fervura

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Madeira | 2 | 31,1567 | 15,5784 | 2,622 | 0,1135 |
| Adesivo | 1 | 64,0208 | 64,0208 | 10,777 | 0,0065 |
| Madeira*Adesivo | 2 | 24,0604 | 12,0302 | 2,025 | 0,1747 |
| Erro | 12 | 71,2878 | 5,9406 | | |
| Total corrigido | 17 | 190,5257 | | | |
| CV (%) | 52,18 | | | | |

Notas - Cisalhamento pós-fervura

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| Madeira | 2 | 2068,7500 | 1034,3750 | 3,235 | 0,0752 |
| Adesivo | 1 | 8739,4141 | 8739,4141 | 27,328 | 0,0002 |
| Madeira*Adesivo | 2 | 1498,0859 | 749,0430 | 2,342 | 0,1384 |
| Erro | 12 | 3837,5000 | 319,7917 | | |
| Total corrigido | 17 | 16143,7500 | | | |
| CV (%) | 64,06 | | | | |

Delaminação

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| Madeira | 3 | 21518,4245 | 7172,8082 | 19,713 | 0,0000 |
| Adesivo | 1 | 3,1901 | 3,1901 | 0,009 | 0,9266 |
| Madeira*Adesivo | 3 | 2558,0078 | 852,6693 | 2,343 | 0,1116 |
| Erro | 16 | 5821,8750 | 363,8672 | | |
| Total corrigido | 23 | 29901,4974 | | | |
| CV (%) | 28,11 | | | | |

Delaminação - madeira

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| Madeira | 3 | 21518,4245 | 7172,8082 | 17,113 | 0,0000 |
| Erro | 20 | 8383,0729 | 419,1536 | | |
| Total corrigido | 23 | 29901,4974 | | | |
| CV (%) | 30,17 | | | | |

Delaminação - adesivo

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| Adesivo | 1 | 3,1901 | 3,1901 | 0,002 | 0,9618 |
| Erro | 22 | 29898,3073 | 1359,0140 | | |
| Total corrigido | 23 | 29901,4974 | | | |
| CV (%) | 54,32 | | | | |