



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Itapeva

DIEGO RANGEL ARAUJO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA NA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA**

Itapeva - SP
2015

DIEGO RANGEL ARAUJO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA NA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Itapeva, como requisito para conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Itapeva - SP
2015

Araujo, Diego Rangel
A663a Avaliação do efeito da umidade da madeira na resistência ao
cisalhamento da linha de cola / Diego Rangel Araujo. – – Itapeva, SP,
2015

51 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia
Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2015

Orientador: Julio Cesar Molina

Banca examinadora: Juliana Cortez Barbosa, Diego Henrique de
Almeida

Bibliografia

1. Madeira – Efeito da umidade. 2. Eucalipto. 3. Cisalhamento.
I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus
Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 674.1



DIEGO RANGEL ARAUJO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA NA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: _____

Julio Cesar Molina
Prof. Dr. Júlio Cesar Molina

Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: _____

Juliana Cortez Barbosa
Profª. Drª. Juliana Cortez Barbosa

Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

3º Examinador: _____

Diego Henrique de Almeida
Prof. M^º. Diego Henrique de Almeida

Universidade de São Paulo - USP - Escola de Engenharia de São Carlos.

Itapeva, 06 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por tudo que ele tem me proporcionado.

Agradeço aos meus pais, Irany Santos de Araujo e Elaine Cristine Rangel Tavares Araujo, por tudo que fizeram e continuam a fazer pelos seus filhos, pelo amor, educação e por sempre dizerem que a única herança que iriam nos deixar seria o estudo.

Ao meu irmão Renann Rangel Araujo, por ser a minha referência e ter me aconselhado desde pequeno.

A minha namorada Tairine Aparecida Sampaio Teixeira, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e me fazendo sorrir a cada semestre.

Aos carinhos que estiveram desde o início da graduação e que se tornaram os meus melhores amigos, Alex Siqueira Costa, Caio Araujo Belezia e Daniel Henrique Araujo Sais.

A todos da República das Encalhadas e Agregados, em especial à Isabella Imakawa de Araújo, Karina Arakaki Higuti, Ana Clara Lancarovici Alves, Bruna Ramos Vieira de Andrade, Antonio Dimas Mancebo Neto, Camilo Araujo Belezia e Jaime Pinn Regli, pelos bons momentos que passamos juntos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Julio Cesar Molina, que me ajudou no desenvolvimento deste trabalho e que sempre foi muito atencioso.

A todos os projetos e grupos que participei durante a graduação, PET, Centro Acadêmico, Cursinho Cuca Fresca e PROMAD Jr.

E a todos os funcionários e professores do Campus da UNESP de Itapeva.

*“O passado serve para evidenciar as nossas falhas e dar-nos indicações para o
progresso do futuro”*

Henry Ford

RESUMO

Um dos fatores importantes na obtenção de uma boa qualidade da Madeira Laminada Colada (MLC) é o controle da quantidade de água presente na madeira no momento da colagem. Porém, observa-se que não existem muitos estudos sobre a influência da umidade da madeira após a colagem quanto a resistência ao cisalhamento da linha de cola. Este trabalho avaliou a influência do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* (8%, 10%, 12%, 14% e 16%) na qualidade da colagem, na resistência ao cisalhamento da linha de cola e nos modos de ruptura em corpos de prova com corte duplo. Avaliou também a influência da umidade pós-colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola e nos modos de ruptura em corpos de prova com corte duplo, colados a 12% e ensaiados depois de imersos em água durante 12, 24, 36 e 48 horas. Para colagem das lamelas utilizou-se o adesivo do tipo poliuretano, bicomponente (Imperveg – Poliuretano vegetal). Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento da linha de cola foi pouco influenciada pelo aumento da umidade de colagem e que os modos de ruptura predominantes foram de forma mista, ou seja, na linha de cola e também na madeira. Além disso, os corpos de prova imersos em água após a colagem não sofreram grandes perdas de resistência e romperam em sua maior parte na madeira indicando a boa qualidade da colagem sob a presença da umidade.

Palavras-chave: Resistência ao cisalhamento. Teor de umidade. Madeira de reflorestamento. Resina poliuretana.

ABSTRACT

One of the important factors in getting a good quality of Glued Laminated Wood (GLULAM) is the control of the amount of water present in the wood at the time of collage. However, it is observed that there are not many studies on the influence of humidity of wood after gluing as the shear strength of the glue line. This study evaluated the influence of the moisture content of the wood of *Eucalyptus grandis* (8%, 10%, 12%, 14% and 16%) on the quality of the glue, the shear strength of the glue line and burst modes in specimens with double cutting. Also assessed the influence of moisture after collage on shear strength of the glue line and burst modes in specimens with double cut, glued the 12% and tested after immersed in water for 12, 24, 36 and 48 hours. For bonding of the adhesive was used parts from polyurethane, bi-component (Imperveg – Plant polyurethane). The results showed that the shear strength of the glue line was little influenced by increased moisture and the prevailing rupture modes were so mixed, i.e. on the glue line and also in the wood. In addition, the specimens immersed in water after gluing not suffered great losses and broke largely on wood indicating the good quality of glue under the presence of moisture.

Keywords: Shear strength. Moisture content. Reforestation wood. Polyurethane resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma viga de MLC	19
Figura 2 – Reação da estrutura reticulada	21
Figura 3 – Resina poliuretana utilizada	23
Figura 4 – Diagrama de Kollmann	27
Figura 5 – Modelo do corpo de prova de cisalhamento com corte duplo	28
Figura 6 – Lamela central (esquerda) e lateral (direita) dos corpos de prova ..	28
Figura 7 – Corpos de prova embalados	30
Figura 8 – Relação entre a umidade de equilíbrio da madeira e a umidade relativa do ar para várias temperaturas	31
Figura 9 – Processos de fabricação dos corpos de prova: A) aplicação do adesivo na área de cola; B) distribuição do adesivo na área de cola; C) prensagem do corpo de prova; D) corpos de prova em descanso durante 24 horas; E) corpos de prova finalizados	32
Figura 10 – Corpos de prova imersos em água	33
Figura 11 – Corpo de prova sendo ensaiado	34
Figura 12 – Influência da umidade de colagem da madeira na resistência ao cisalhamento da linha de cola	37
Figura 13 – Modo de ruptura predominante na colagem a 8% de teor de umidade.....	39
Figura 14 – Modo de ruptura predominante na colagem a 10% de teor de umidade.....	39
Figura 15 – Modo de ruptura predominante na colagem a 12% de teor de umidade.....	40
Figura 16 – Modo de ruptura predominante na colagem a 14% de teor de umidade.....	40
Figura 17 – Modo de ruptura predominante na colagem a 16% de teor de umidade.....	41
Figura 18 – Influência da umidade pós-colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola	43
Figura 19 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 12 horas	44

Figura 20 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 24 horas	45
Figura 21 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 36 horas	45
Figura 22 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 48 horas	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das propriedades mecânicas do <i>Eucalyptus grandis</i> , U = 12%	26
Tabela 2 – Informações sobre os corpos de prova	29
Tabela 3 – Valores e variabilidade da resistência ao cisalhamento da linha de cola em relação ao teor de umidade da madeira na colagem	36
Tabela 4 – Modos de ruptura de acordo com o teor de umidade de colagem..	38
Tabela 5 – Valores e variabilidade da resistência ao cisalhamento da linha de cola em relação ao tempo de imersão em água.....	42
Tabela 6 – Modos de ruptura de acordo com o tempo imerso em água	44

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ANOVA	Análise de variância
CCA	Solução preservativa à base de arseniato de cobre cromatado
CP	Corpo de prova
DMS	Diferença Mínima Significativa
LVL	Laminated Veneer Lumber
MDF	Medium Density Fiberboard
MLC	Madeira Laminada Colada
MUF	Melamina-uréia-formaldeído
OSB	Oriented Strand Board
PRF	Fenol-resorcinol-formaldeído
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
PVA	Acetato de polivinila
U	Umidade
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de carbono
E_{12}	Módulo de elasticidade a 12% de umidade
$E_{c0,m}$	Valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras
$E_{u\%}$	Módulo de elasticidade na umidade ensaiada
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
H_2O	Água
f_{12}	Resistência a 12% de umidade
$f_{c0,k}$	Valor característico da resistência à compressão paralela às fibras
$f_{t0,k}$	Valor característico da resistência à tração paralela às fibras
$f_{u\%}$	Resistência na umidade ensaiada
f_v	Resistência ao cisalhamento
f_{wk}	Valor característico da resistência
$f_{v0,k}$	Valor característico da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$\rho_{ap,12\%}$	Densidade aparente a 12% de umidade
Δ	Diferença Mínima Significativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Teor de umidade da madeira	16
3.2 Tipos de água na madeira	16
3.3 Movimento da água na madeira	17
3.4 Ponto de saturação das fibras	17
3.5 Umidade de equilíbrio da madeira	17
3.6 Colagem da madeira	17
3.7 Madeira laminada colada	18
3.8 Adesivos utilizados para MLC	20
3.9 Adesivo do tipo poliuretano	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Ensaios preliminares	23
4.2 Caracterização da madeira	24
4.3 Preparação dos corpos de prova	27
4.4 Controle da umidade	29
4.5 Colagem das lamelas	31
4.6 Imersão em água	32
4.7 Ensaios definitivos de cisalhamento da linha de cola	33
4.8 Análise estatística	34

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 Influência da umidade de colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola	36
5.2 Influência da umidade de colagem nos modos de ruptura	37
5.3 Influência da umidade pós-colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola	42
5.4 Influência da umidade pós-colagem nos modos de ruptura	43
6 CONCLUSÃO	47
7 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	48
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

Os produtos engenheirados que utilizam a madeira em sua composição vêm ganhando maior atenção ao longo dos últimos anos no Brasil. Isso se deve em parte a uma maior conscientização dos engenheiros, arquitetos e construtores sobre as propriedades da madeira e suas possibilidades de aplicação. Tais produtos engenheirados são os painéis do tipo LVL (Laminated Veneer Lumber), OSB (Oriented Strand Board), MDF (Medium Density Fiberboard), entre outros, além dos elementos estruturais confeccionados em MLC (Madeira Laminada Colada). De uma maneira geral são utilizados vários tipos de resinas na confecção de produtos engenheirados de madeira. Dentre elas podem ser citadas as resinas poliuretanas, epóxis, e do tipo fenol resorcinol. Em particular, os elementos que utilizam lamelas de madeira coladas umas as outras são geralmente confeccionados em ambiente industrial com controle de qualidade. Esse acompanhamento técnico, que visa melhorar a qualidade do produto final procura controlar a quantidade de água presente na madeira no momento da colagem, a temperatura de colagem, assim como a pressão de colagem entre as lamelas. O desempenho do adesivo após a colagem das lamelas, neste caso, é de fundamental importância para o adequado aproveitamento do potencial da madeira como material estrutural.

Dentro deste contexto, observa-se, porém, que não existem muitos estudos sobre a influência da umidade da madeira após a colagem. Estudos têm sido realizados para verificar, por exemplo, o efeito do tratamento da madeira na diminuição da resistência interfacial madeira - resina (VICK, 1995). Outros estudos têm sido realizados para verificar o efeito da umidade de colagem da madeira na qualidade do produto final (BOHN, 1995, MOTTA et al., 2012 e REMADE, 2007). Vale mencionar ainda que, como a utilização de produtos de MLC ainda não é tão difundida no Brasil, é necessário que estudos sejam realizados no requisito de espécie - adesivo para uma caracterização das madeiras e resinas que melhor possam se adaptar a essa técnica (CALIL NETO, 2011). Na maioria dos casos a escolha da cola depende das condições de uso da estrutura e do tipo de madeira. É possível colar praticamente todas as madeiras. Entretanto algumas espécies possuem características físicas e

químicas que exigem o emprego de colas especiais ou a modificação das colas normalmente comercializadas para o uso em madeiras. Normalmente as espécies mais adequadas para o emprego em MLC são as coníferas, como o pinus, e algumas folhosas (dicotiledôneas), como os eucaliptos.

Vale mencionar também que, no Brasil, o grande fator limitante para a produção de MLC é o custo do adesivo, em que àquele à base de resorcinol formaldeído, que é importado, pode representar entre 40 e 60% do custo final (LIMA, 1994 e BOHN; SZÜCS, 1995). O adesivo a base de resorcinol é uma resina sintética recomendada para colagens resistentes à água fria ou fervente, muitos solventes, a fungos ou mofo, ao calor seco ou úmido, etc. Por outro lado, o adesivo poliuretano, também bastante utilizado na colagem entre peças de madeira, é um ligante moderno que permite otimizar as propriedades dos materiais para os mais diferentes campos de aplicação e pode ser obtido a custos mais acessíveis no mercado brasileiro. Dada a necessidade do estudo das propriedades de resistência dos produtos engenheirados de madeira, em especial os que utilizam lamelas coladas, especificamente para a utilização em estruturas, justifica-se a realização do presente trabalho. A pesquisa em questão enriquecerá a literatura brasileira que atualmente encontra-se em fase de desenvolvimento, visto que no setor das estruturas de madeira, há ainda grande carência de estudos e pesquisadores no país.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como finalidade analisar a qualidade da resistência de colagem de lamelas de madeira de reflorestamento em função do teor de umidade, utilizando-se adesivo do tipo poliuretano. Pretende-se também avaliar a influência da umidade antes e após a colagem das lamelas na resistência ao cisalhamento da linha de cola e nos modos de ruptura do conjunto.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência do teor de umidade (8%, 10%, 12% 14% e 16%) na qualidade da colagem de lamelas de madeira de reflorestamento coladas com resina poliuretana;
- Avaliar a influência do teor de umidade na resistência ao cisalhamento da linha de cola e nos modos de ruptura, a partir de ensaios de cisalhamento direto a serem realizados em corpos de prova com corte duplo colados nas umidades 8%, 10%, 12% 14% e 16%;
- Avaliar a influência da umidade pós-colagem das lamelas de madeira na resistência ao cisalhamento da linha de cola e nos modos de ruptura a partir de corpos de prova com corte duplo colados a 12% de umidade e ensaiados após permanecerem imersos em água por períodos de 12, 24, 36 e 48 horas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Teor de umidade da madeira

O teor de umidade da madeira é encontrado através da relação entre a massa de água contida em seu interior e a sua massa seca, expresso em porcentagem. Além da massa, outras propriedades da madeira também são dependentes desse teor de umidade, são elas: retração, densidade, resistência, etc. Nas folhosas a diferença entre o teor de umidade do cerne e alburno depende da espécie, ao contrário das coníferas, onde o teor de umidade do alburno é maior do que no cerne (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Oliveira et. al. (2005) analisaram a variação do teor de umidade na madeira de sete espécies de eucalipto: *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus pilularis*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. De acordo com os resultados obtidos concluiu-se que para o *Eucalyptus paniculata* e o *Corymbia citriodora* a variação nos teores de umidade foram mais homogêneos, enquanto, que no *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus grandis* a variação se mostrou mais heterogênea. Já o *Eucalyptus cloeziana* mostrou um comportamento mais uniforme em relação a variação do teor de umidade.

3.2 Tipos de água na madeira

Existem dois tipos de água na madeira, a água de capilaridade ou água livre que se encontra nos vasos, meatos, canais e lúmen das células, e a água de adesão ou higroscópica que está localizada no interior das paredes celulares. A água de capilaridade pode ser facilmente retirada, a qual passa de uma célula para outra até atingir a superfície externa da madeira. Já a água de adesão é mais difícil de ser retirada apresentando ainda um processo mais lento, sendo necessário o emprego de energia neste processo (SCHULTZ, 2008).

Segundo Galvão e Jankowsky (1985), a madeira também pode apresentar água em forma de vapor nos seus capilares. Porém, ela pode ser desprezada devido a sua baixa densidade se comparada a água capilar e higroscópica.

3.3 Movimento da água na madeira

A água na madeira se movimenta da região de maior umidade para a de menor umidade, podendo estar na forma de vapor ou líquido. Para que ocorra a secagem da madeira, a parte externa deve estar mais seca do que a interna. Assim, conforme a umidade superficial for diminuindo a água do interior se move até o exterior. Essa movimentação ocorre através de vários tipos de passagens, como: vasos e cavidades das fibras, pontoações, células radiais, aberturas, dutos de resina, entre outros, gerando um gradiente de umidade conforme a distância. Além disso, a exposição em altas temperaturas acelera este processo (PONCE; WATAI, 1985).

3.4 Ponto de saturação das fibras

Segundo Schultz (2008), o Ponto de Saturação das Fibras (PSF) é atingido quando toda água livre ou água de capilaridade é retirada da madeira restando apenas a água de adesão ou higroscópica. É a partir dele que a estrutura da madeira pode sofrer alguma modificação resultando em defeitos e alterações na sua resistência física e mecânica. Normalmente o PSF situa-se numa faixa entre 22 e 30% de umidade, variando de espécie para espécie. A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, admite como o PFS o valor de 25%.

3.5 Umidade de equilíbrio da madeira

Abaixo do PSF começa a perda de água higroscópica até o teor de umidade em que a madeira entra em equilíbrio com as condições atmosféricas. Este ponto é chamado de teor de umidade de equilíbrio da madeira, o qual está em função da espécie, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e o histórico de exposição (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985; SKAAR, 1988).

3.6 Colagem da madeira

As principais propriedades da madeira que influenciam no processo de colagem são: as anatômicas, físicas, químicas e mecânicas.

No caso das anatômicas, Selbo (1975) disserta que, o cerne da madeira pode prejudicar a qualidade de colagem quando comparado ao

alburno, pois apresenta maior densidade, porosidade e concentração de extrativos.

A densidade e o teor de umidade são as duas propriedades físicas imprescindíveis para a colagem da madeira. As madeiras com alta densidade apresentam maior alteração dimensional resultando em maiores tensões na linha de cola. Já as madeiras com baixa densidade são mais porosas, ocorrendo a linha de cola faminta, ou seja, a penetração excessiva de adesivo (VICK, 1999). Na utilização de um adesivo sintético tradicional, à base de resorcinol, a madeira deve estar previamente seca até teores de umidade entre 5% e 20% (REMADE, 2007).

O elevado teor de extrativos na superfície da madeira também torna prejudicial o contato adesivo - madeira (DIAS, 2005).

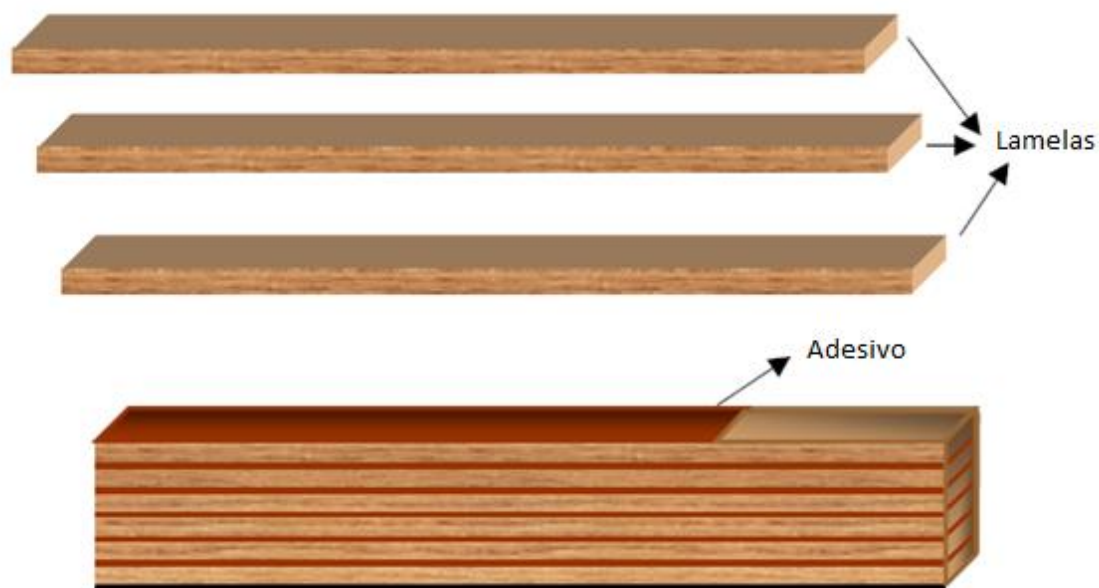
Para a propriedade mecânica da madeira, quanto maior a resistência da linha de cola em relação à resistência da madeira, maior será a percentagem de falhas na madeira na interface com a linha de cola (SELBO, 1975).

Motta (2013) avaliou a influência de cinco classes de teor de umidade (8%, 10%, 12%, 14% e 16%) nas propriedades de adesão da madeira de duas espécies comerciais de eucalipto representadas pelo híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* e *Corymbia citriodora*. Os adesivos utilizados foram à base de resina resorcínica (Cascophen RS216M) e acetato de polivinila - PVA (CASCORES2590). A partir dos resultados observou-se que para a madeira de híbrido clonal o teor de umidade pouco influenciou na colagem das juntas com os dois adesivos. Já na madeira de *Corymbia citriodora* a teores de umidade de 8%, 10% e 12% colados com PVA o desempenho das juntas foi superior. Entretanto, quando utilizado a resina resorcínica, as juntas unidas a 12% apresentaram desempenho inferior.

3.7 Madeira laminada colada

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um material fabricado a partir da colagem entre lamelas, as quais são dispostas paralelamente entre si, e consolidadas por meio de pressão. As lamelas possuem dimensões menores se comparadas ao produto final acabado (CALIL NETO, 2011). A Figura 1 exemplifica um elemento estrutural do tipo MLC.

Figura 1 – Esquema de uma viga de MLC



Fonte: Zangiácomo, 2003

De acordo com Zangiácomo (2003), a MLC apresenta alta resistência mecânica em função do seu baixo peso e grande adaptação a diferentes formas. Para tanto, sua aplicação é frequente em estruturas de cobertura, elementos estruturais principais para pontes, torres de transmissão, edifícios, embarcações, banzos de escada e corrimão, móveis, entre outras.

As principais vantagens da MLC são (ZANGIÁCOMO, 2003):

- Facilidade na construção de grandes estruturas a partir de peças de dimensões comerciais;
- Redução dos principais defeitos se comparada a peças maciças de madeira com grandes dimensões;
- Possibilidade da utilização de peças de menor e maior qualidade em áreas menos e mais solicitadas, respectivamente;
- Possibilidade de aplicação de contra-flechas durante o processo de fabricação;
- Baixa relação peso/resistência, não exigindo equipamentos com capacidade suficiente para içamento, bem como conduzindo a fundações com ações de menores intensidades;

- Bom desempenho contra a ação do fogo em peças com grande seção transversal;
- Alta resistência contra os agentes corrosivos.

3.8 Adesivos utilizados para MLC

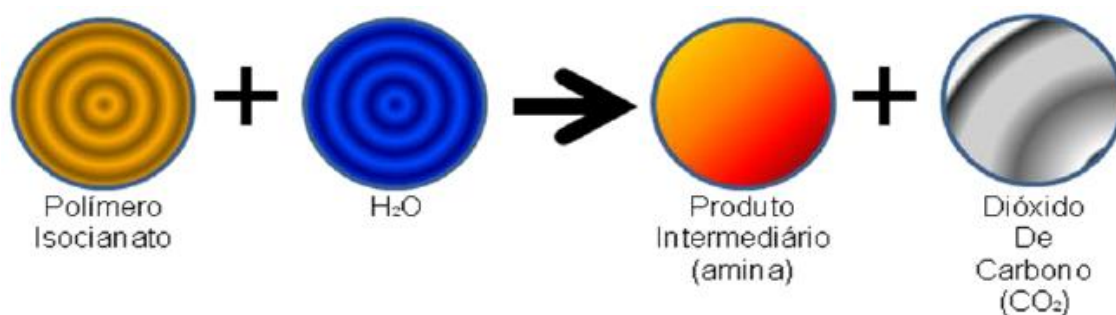
Segundo Miotto (2009), para fabricação da MLC podem ser utilizados vários adesivos, os quais são determinados pelas condições de temperatura e teor de umidade do meio onde a estrutura será inserida. Dentre eles temos os adesivos fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), utilizado frequentemente, e a melamina-uréia-formaldeído (MUF), bicomponente, cujo tempo de cura é baixo e apresenta linha de cola transparente após catalisação. Existem também os adesivos poliuretanos como o Purbond HB530, monocomponente, e o produzido a partir de óleo de mamona desenvolvido pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, o qual foi aprovado por Miotto *apud* Azambuja (2006) nos testes mecânicos em diferentes condições de umidades e aceito quando comparado ao fenol-resorcinol-formaldeído, com destaque para a espécie do gênero eucalipto.

Jesus e Calil Junior (2002) também estudaram o comportamento do adesivo poliuretano à base de mamona em Madeira Laminada Colada para as espécies de *Pinus caribea hondurensis* e o *Eucalyptus grandis* e concluíram que as formas de ruptura no cisalhamento ocorrem em mais da metade (50,7%) dos corpos de prova de pinus no intervalo de 80 a 100% na madeira, enquanto que para o mesmo intervalo de ruptura o eucalipto apresentou 85,2%. Esta diferença pode ter ocorrido devido a interferência da resina presente no pinus na adesão entre as peças.

3.9 Adesivo do tipo poliuretano

No processo de colagem entre o adesivo poliuretano e elementos de madeira, a água presente na madeira reage com uma parte do isocianato liberando dióxido de carbono (CO_2) e forma uma amina. Durante a reação, o adesivo é expandido rapidamente, e logo em seguida, a amina reage com outro grupo isocianato, resultando em uma estrutura reticulada como nos sistemas bicomponentes (CALIL NETO, 2011).

Figura 2 – Reação da estrutura reticulada



Fonte: Calil Neto, 2011

Ainda segundo Calil Neto (2011) recomenda-se na utilização do adesivo poliuretano para união entre peças de madeira a aplicação por linha de cola de 200 gramas/m². Além disso, a pressão exercida deve ser bem definida para obtenção de uma alta qualidade de colagem.

Molina (2008) verificou a partir de ensaios estáticos e dinâmicos o comportamento de barras de aço coladas com as resinas epóxis (Sikadur 32 e Compound Adesivo) em corpos de prova de *Pinus taeda* e *Eucalipto citriodora*; e com a resina monocomponente do tipo poliuretana Purweld 665 em corpos de prova de *Pinus taeda*. Os resultados mostraram que para os ensaios estáticos de ancoragem as resinas epóxis mostraram-se adequadas para a colagem de barras de aço em peças estruturais, a partir das umidades de colagem a 12% ± 1%, 17% ± 1% e 22% ± 1%. Porém, para este mesmo ensaio, na umidade de 22% ± 1% a resina poliuretana incorporou bolhas de ar diminuindo a resistência de ancoragem da ligação se comparada as resinas epóxis nas mesmas condições. Para os ensaios dinâmicos de ancoragem a resina poliuretana praticamente não resistiu às cargas aplicadas e as ligações romperam para um baixo número de ciclos quando comparadas as resinas epóxis nas mesmas condições, indicando que ela é inadequada para a colagem de barras de aço em peças estruturais de madeira a 22% ± 1% de umidade.

Pigozzo (2004) avaliou os efeitos das variações da umidade (12%, 15%, 18% e 22%) sobre a resistência de ancoragem de barras de aço coladas perpendiculares às fibras, em vigas de *Pinus oocarpa*, utilizando três resinas epóxis (Compound Injeção, AR 300 e Sikadur 32) e uma resina poliuretana a

base de óleo de mamona. Para todas as resinas houve perdas significativas de resistência de ancoragem com o aumento da umidade da madeira para colagem. Se comparado a madeira seca (12% de umidade) com a madeira a 22% de umidade, a resina epóxi Sikadur 32 apresentou perdas de 30%, as resinas epóxis Compound Injeção e AR 300 apresentaram perdas de 50% e a resina poliuretana apresentou praticamente perda total da resistência de ancoragem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Mecânicas dos Materiais do Campus da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Itapeva/SP.

Para a confecção dos corpos de prova foi considerada a espécie de madeira de *Eucalyptus grandis* obtida por meio de doação.

Já a resina utilizada para colagem dos corpos de prova foi do tipo poliuretana (Imperveg – Poliuretano vegetal), bicomponente (Figura 3). Segundo o fabricante, esta resina apresenta cura em 24 horas.

Figura 3 – Resina poliuretana utilizada



Fonte: Autor, 2015

4.1 Ensaios preliminares

Foram realizados ensaios preliminares de colagem com as resinas poliuretanas monocomponente (a base de óleo de mamona) e bicomponente (Imperveg – Poliuretano vegetal) para verificação da qualidade e tempo de cura das mesmas.

Os testes com a resina poliuretana monocomponente não foram satisfatórios, pois apresentaram linha de cola pouco resistente com o aumento do teor de umidade da madeira no momento da colagem após permanecerem durante 24 horas coladas e sob pressão.

Para a resina poliuretana bicomponente os testes tiveram três proporções diferentes para os componentes A e B da resina. As duas primeiras proporções testadas foram 1:1,2 e 1:1,142, conforme recomendação do fabricante (a partir de estudos realizados) e especificação do rótulo, respectivamente. A terceira especificação utilizada foi de 1:1 de maneira empírica. Após 24 horas e sob pressão todas as colagens apresentaram linha de cola resistente.

A partir dos resultados obtidos pelos testes, optou-se pela utilização da resina poliuretana bicomponente, pois esta apresentou linha de cola mais resistente se comparada a resina monocomponente. A proporção escolhida para os componentes A e B da resina seguiu a especificação do rótulo (1:1,142) devido a melhor qualidade de colagem (analisada visualmente em função de sua resistência).

4.2 Caracterização da madeira

Os ensaios de caracterização da madeira utilizada foram realizados de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997. Para tanto foram determinados as seguintes propriedades: umidade, densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras. Considerou-se para os ensaios 6 corpos de prova.

Os valores de resistência obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras foram corrigidos para 12% de umidade pela Equação 1. Através deste mesmo ensaio, encontraram-se os valores dos módulos de elasticidade, os quais também foram corrigidos para a umidade padrão de 12% (Equação 2) e posteriormente calculado o seu valor médio.

$$f_{12} = f_{u\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (1)$$

Onde:

f_{12} = resistência a 12% de umidade (MPa);

$f_{u\%}$ = resistência na umidade ensaiada (MPa);

U = umidade ensaiada (%).

$$E_{12} = E_{u\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (2)$$

Onde:

E_{12} = módulo de elasticidade a 12% de umidade (MPa);

$E_{u\%}$ = módulo de elasticidade na umidade ensaiada (MPa);

U = umidade ensaiada (%).

A partir dos valores de resistência corrigidos foi calculado o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) com base no estimador centrado proposto pela ABNT NBR 7190:1997 (Equação 3).

$$f_{wk} = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (3)$$

Onde:

f_{wk} = valor característico da resistência (MPa);

n = número de corpos de prova.

$f_1, f_2, \dots, f_n$ = valores de resistência dos corpos de prova (MPa), os quais devem ser colocados em ordem crescente $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para f_{wk} valor inferior a f_1 , nem a 0,70 do valor médio.

O valor característico ($f_{c0,k}$) foi utilizado na caracterização simplificada proposta pela mesma norma para determinação das demais propriedades da madeira (Equações 4 e 5) conforme apresentadas na Tabela 1. A densidade aparente obtida inicialmente para a umidade de 14,44% (670 kg/m^3) foi corrigida para o correspondente valor a 12% através do diagrama de Kollmann (Figura 4).

$$f_{c0,k} / f_{t0,k} = 0,77 \quad (4)$$

Onde:

$f_{c0,k}$ = valor característico da resistência à compressão paralela às fibras (MPa);

$f_{t0,k}$ = valor característico da resistência à tração paralela às fibras (MPa).

$$f_{v0,k} / f_{c0,k} = 0,12 \quad (5)$$

Onde:

$f_{c0,k}$ = valor característico da resistência à compressão paralela às fibras (MPa);

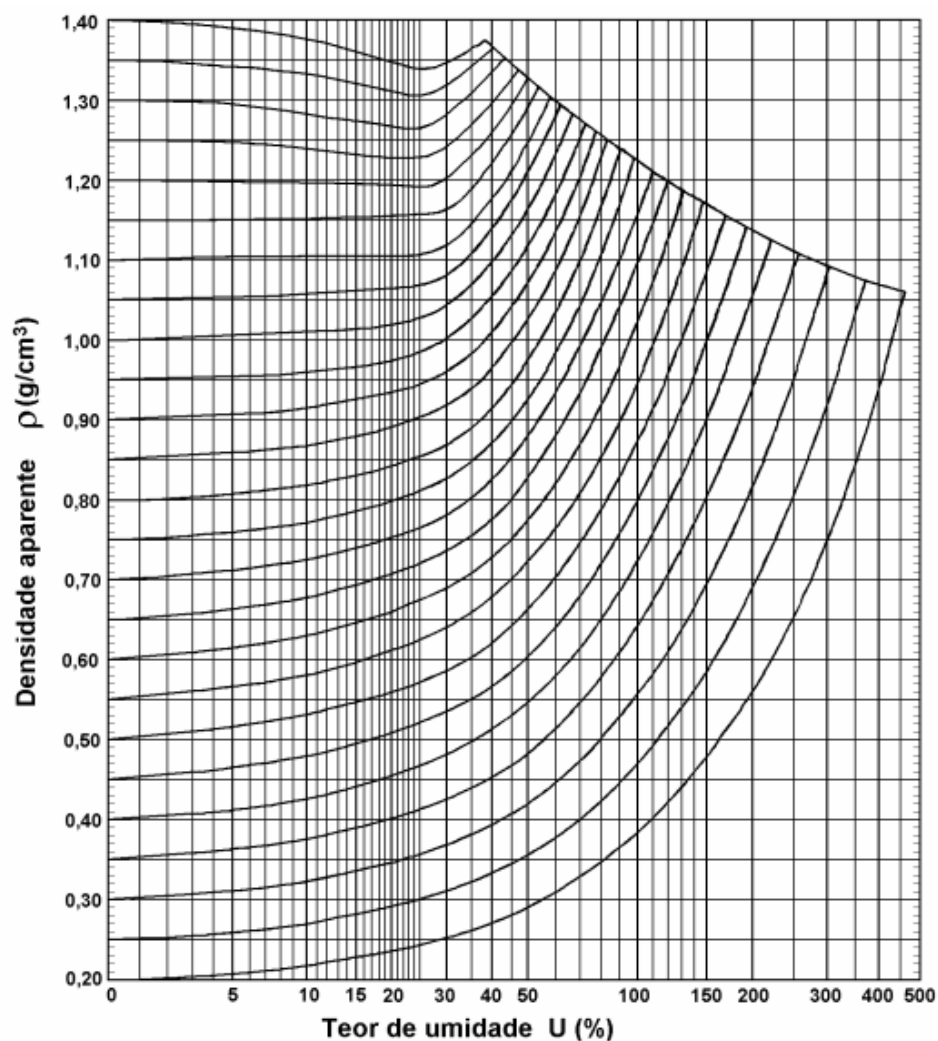
$f_{v0,k}$ = valor característico da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa).

Tabela 1 – Valores das propriedades mecânicas do *Eucalyptus grandis*, U = 12%

Espécie	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m³)	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)
<i>Eucalyptus grandis</i>	660,00	47,79	62,07	5,73	24775,52

Fonte: Autor, 2015

Figura 4 – Diagrama de Kollmann

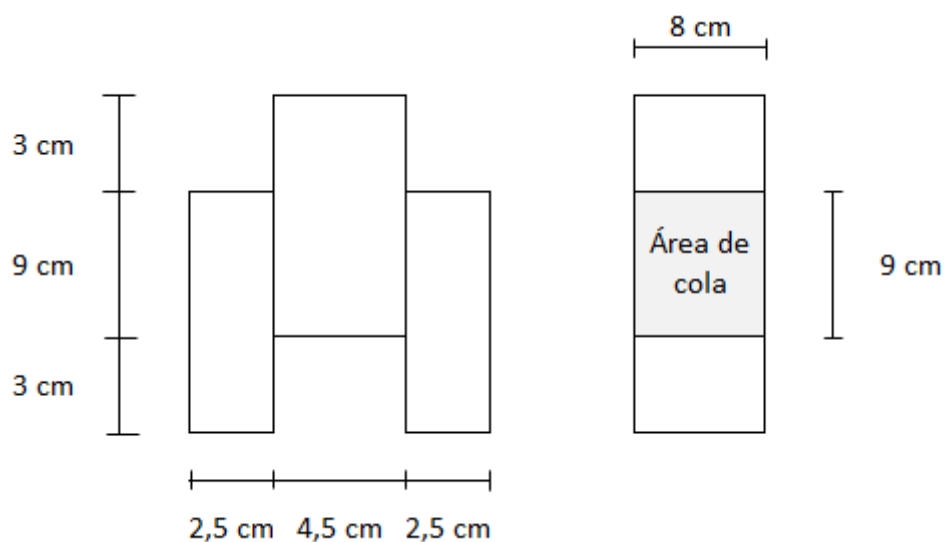


Fonte: Kollmann e Côté, 1984

4.3 Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios experimentais de cisalhamento da linha de cola foram confeccionados corpos de prova de cisalhamento com corte duplo, contendo área de 72 cm^2 por linha de cola, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Modelo do corpo de prova de cisalhamento com corte duplo

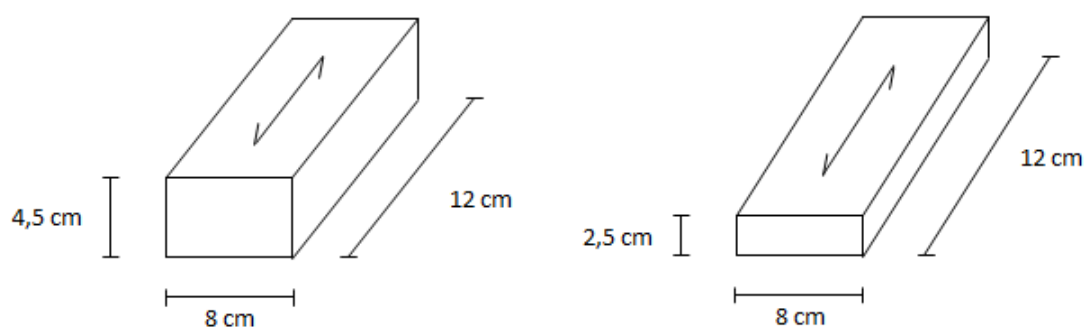


Fonte: Autor, 2015

As lamelas usadas na constituição dos corpos de prova foram retiradas de pranchas escolhidas aleatoriamente de um lote de madeira.

Foram confeccionadas um total de 27 lamelas centrais (12 cm x 8 cm x 4,5 cm) e 54 lamelas laterais (12 cm x 8 cm x 2,5 cm) conforme a Figura 6 para colagem nas respectivas umidades: 8%, 10%, 12%, 14% e 16%.

Figura 6 – Lamela central (esquerda) e lateral (direita) dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2015

Para cada faixa de umidade (8%, 10%, 14% e 16%) foram consideradas 3 replicações de amostras. Para a umidade de 12% foram consideradas um total de 15 replicações. Após a colagem dos corpos de prova, 12 amostras a 12% de umidade foram imersas em água durante 12, 24, 36 e

48 horas e posteriormente ensaiados para verificação da resistência da linha de cola. A Tabela 2 contém os detalhes dos tempos de imersão em água.

Tabela 2 – Informações sobre os corpos de prova

Quantidade de corpos de prova	Umidade de colagem (%)	Tempo imerso em água pós-colagem (horas)
3	8	-
3	10	-
3	12	-
3	14	-
3	16	-
3		12
3	12	24
3		36
3		48
Total de corpos de prova: 27		

Fonte: Autor, 2015

O número baixo de replicações de amostras para realização dos ensaios ocorreu pela dificuldade das lamelas atingirem os valores de umidade (8%, 10%, 12%, 14% e 16%) desejados para colagem.

4.4 Controle da umidade

Para obter a umidade desejada dos corpos de prova, para posterior colagem dos mesmos, as peças foram colocadas em estufa climatizadora até alcançarem os seguintes teores de umidade: 8% $\pm$ 0,5%; 10% $\pm$ 0,5%; 12% $\pm$ 0,5%; 14% $\pm$ 0,5% e 16% $\pm$ 0,5%. Após atingirem as umidades desejadas as lamelas foram mantidas em sacos plásticos de polietileno, em ambiente climatizado, para evitar a troca de umidade com o meio ambiente (Figura 7).

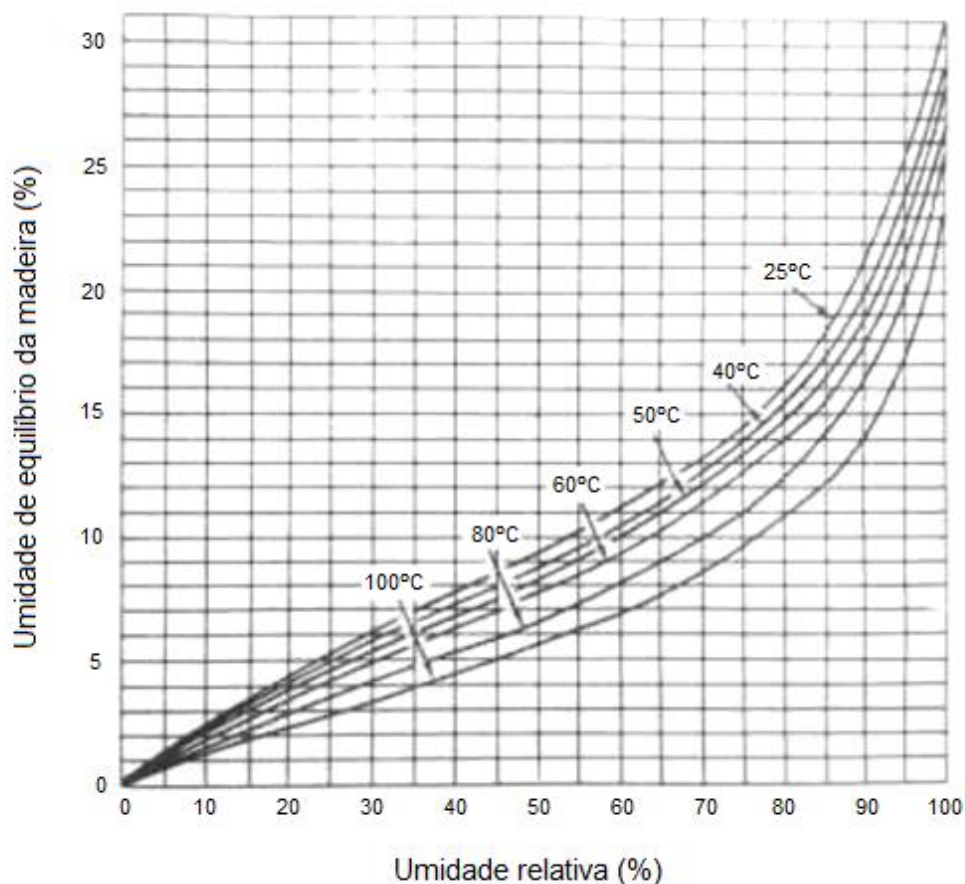
Figura 7 – Corpos de prova embalados



Fonte: Autor, 2015

O teor de umidade de equilíbrio desejado no interior da estufa utilizada (Modelo – 4001 marca Tecnal) para secagem das peças foi obtido com o auxílio do gráfico proposto por Ponce e Watai (1985). O referido gráfico, o qual está apresentado na Figura 8 fornece o valor da umidade de equilíbrio da madeira através da correlação entre curvas de temperatura e umidade relativa da estufa.

Figura 8 – Relação entre a umidade de equilíbrio da madeira e a umidade relativa do ar para várias temperaturas



Fonte: Ponce e Watai, 1985

4.5 Colagem das lamelas

As proporções dos componentes A e B da resina utilizada foram determinadas por meio da pesagem em balança analítica. Os componentes A e B após misturados foram aplicados nos corpos de prova de madeira por meio do uso de uma seringa de plástico. O procedimento para colagem considerou a aplicação da resina em apenas uma das faces dos dois elementos a serem unidos. A gramatura utilizada foi de 200 g/m^2 e a resina foi espalhada nesta face com o uso de uma espátula. A quantidade de adesivo utilizada foi de $1,44 \text{ g} \pm 0,10 \text{ g}$ por linha de cola. Para a montagem dos corpos de prova as lamelas foram alinhadas e prensadas por meio de sargentos. Foi considerada uma pressão de prensagem para as peças de madeira na composição dos corpos de prova de cisalhamento, obtida por meio do uso de torquímetro, sendo aplicado, neste caso, um torque de $2 \text{ N}\cdot\text{m}$. A pressão mínima recomendada

para MLC é de 1,2 MPa no caso de madeiras com densidade superior a 0,5 g/cm³. Os corpos de prova ficaram prensados por no mínimo 24 horas antes dos ensaios de cisalhamento. Na Figura 9 estão ilustradas algumas etapas do processo de fabricação dos corpos de prova.

Figura 9 – Processos de fabricação dos corpos de prova: A) aplicação do adesivo na área de cola; B) distribuição do adesivo na área de cola; C) prensagem do corpo de prova; D) corpos de prova em descanso durante 24 horas; E) corpos de prova finalizados



Fonte: Autor, 2015

4.6 Imersão em água

Logo após a colagem das lamelas, os 12 corpos de prova que estavam na umidade de 12% foram imersos em uma bacia contendo água e ficaram durante 12, 24, 36 e 48 horas (Figura 10).

Figura 10 – Corpos de prova imersos em água



Fonte: Autor, 2015

4.7 Ensaios definitivos de cisalhamento da linha de cola

Do total de 27 corpos de prova de cisalhamento fabricados, ensaiou-se 15 nas diferentes umidades de colagem (8%, 10%, 12%, 14% e 16%). Os corpos de prova foram ensaiados na máquina universal de ensaios EMIC – com capacidade de 30 toneladas – (Figura 11) para verificação da resistência ao cisalhamento da linha de cola e dos respectivos modos de ruptura para cada teor de umidade de colagem. Para o restante dos corpos de prova colados na umidade de 12% também foram verificados os valores da resistência ao cisalhamento da linha de cola assim como os modos de ruptura. Porém, neste caso, estes valores foram verificados após os corpos de prova ficarem imersos em água durante 12, 24, 36 e 48 horas. Dessa forma foram verificadas duas condições de resistência: uma para a umidade de colagem e outra para umidade após imersão em água por determinado período.

Figura 11 – Corpo de prova sendo ensaiado



Fonte: Autor, 2015

4.8 Análise estatística

Para a análise estatística dos resultados utilizou-se o software R. Nele foram realizadas análises de variância (ANOVA) e testes de comparações múltiplas de Tukey, com nível de significância de 5% para ambos os casos.

Através da análise de variância foi verificado se as médias obtidas da resistência ao cisalhamento da linha de cola com diferentes teores de umidade da madeira no momento da colagem (8%, 10%, 12%, 14% e 16%) possuíam alguma diferença significativa. Assim como, se as médias obtidas da resistência ao cisalhamento da linha de cola com diferentes tempos de imersão em água dos corpos de prova (12, 24, 36 e 48 horas) possuíam alguma diferença significativa. Esse teste corresponde a verificar as hipóteses: nula (H_0) – médias terão valores estatisticamente sem diferença, e a alternativa (H_1) – médias terão valores estatisticamente diferentes, sendo aceito para esta última pelo menos um par diferente.

$$H_0 : x_1 = x_2 = \dots = x_n$$

$$H_1 : x_m \neq x_n, \text{ para pelo menos um par } (m, n), \text{ com } m \neq n$$

Para que ocorra a diferença significativa entre as médias na análise de variância uma maneira de avaliar é utilizando o p-value. Se o p-value $< 5\%$, rejeitamos a hipótese nula, ou seja, existem evidências de diferenças significativas entre pelo menos um par de médias. Caso contrário (p-value $> 5\%$), não rejeitamos a hipótese nula, ou seja, não existem evidências de diferenças significativas entre as médias.

Havendo a diferença significativa, foi realizado o teste de Tukey para avaliar a magnitude desta diferença entre as médias, e quais delas se diferiram entre si. Esse teste se baseia na Diferença Mínima Significativa ($DMS = \Delta$) e nele é verificado o contraste entre duas médias.

Encontrado o valor de Δ , as médias são colocadas em ordem decrescente e realizado a diferença entre elas (duas a duas). Em seguida, são comparadas as diferenças com o valor de Δ . Se a diferença entre um par de médias for superior ao valor de Δ , a diferença entre elas será significativa, ou seja, rejeitamos H_0 . Mas se a diferença entre as médias for inferior ao valor de Δ , a diferença entre as duas médias não será significativa, ou seja, não rejeitamos H_0 .

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento da linha de cola sob a influência do teor de umidade da madeira no momento da colagem e do tempo de imersão em água dos corpos de prova, assim como a discussão dos principais resultados estão apresentados a seguir.

5.1 Influência da umidade de colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola

A Tabela 3 mostra os valores da resistência ao cisalhamento da linha de cola obtido para os corpos de prova (CP) nas seguintes umidades de colagem: 8%, 10%, 12%, 14% e 16%.

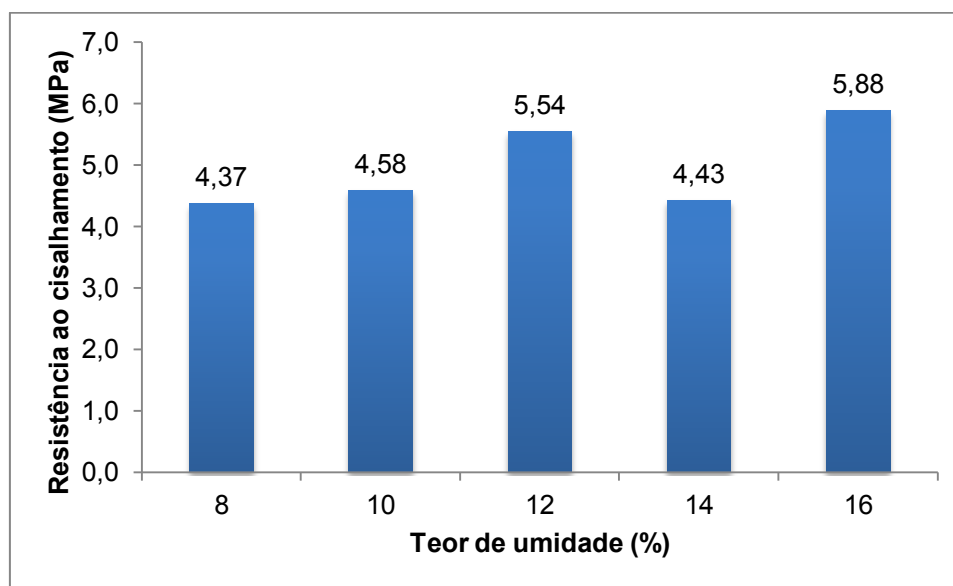
Tabela 3 – Valores e variabilidade da resistência ao cisalhamento da linha de cola em relação ao teor de umidade da madeira na colagem

Teor de umidade (%)	Resistência ao cisalhamento f_v (MPa)				Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	CP 1	CP 2	CP 3	Média		
8	4,18	4,73	4,19	4,37	0,32	7,24
10	4,51	5,19	4,05	4,58	0,57	12,53
12	6,21	5,59	4,81	5,54	0,71	12,74
14	3,20	4,94	5,14	4,43	1,06	24,02
16	6,82	6,81	4,01	5,88	1,62	27,55

Fonte: Autor, 2015

Na Figura 12 encontra-se o comportamento da umidade de colagem dos corpos de prova em relação à resistência média ao cisalhamento da linha de cola.

Figura 12 – Influência da umidade de colagem da madeira na resistência ao cisalhamento da linha de cola



Fonte: Autor, 2015

A partir da análise dos resultados de resistência ao cisalhamento da linha de cola obtido para as diferentes umidades de colagem observou-se uma tendência de aumento da resistência em função do aumento da umidade de colagem. Observou-se, porém, uma descontinuidade dos resultados para o teor de umidade de colagem de 14%, que pode ter ocorrido por deficiências na colagem. Os possíveis motivos podem ser: distribuição da resina de forma não uniforme na área de cola e a incorporação de bolhas de ar na linha de cola (insuficiência de colagem).

A análise de variância, no entanto, mostrou que não houve diferença significativa da resistência média ao cisalhamento da linha de cola de acordo com os teores de umidade da madeira no momento da colagem ($p\text{-value} = 13,7\% > 5\%$).

5.2 Influência da umidade de colagem nos modos de ruptura

Os modos de ruptura dos corpos de prova colados a 8%, 10%, 12%, 14% e 16% de teor de umidade estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Modos de ruptura de acordo com o teor de umidade de colagem

Número de corpos de prova	Teor de umidade (%)	Modo de ruptura		
		Linha de cola	Madeira	Mista
3	8	-	-	3
3	10	-	-	3
3	12	-	-	3
3	14	2	-	1
3	16	-	2	1

Fonte: Autor, 2015

Foram observadas para os corpos de prova colados a 8%, 10% e 12% de teor de umidade ruptura predominante mista (Figuras 13, 14 e 15), ou seja, a que ocorre em parte na linha de cola e na madeira. Já para os corpos de prova colados a 14% e 16% de teor de umidade o modo de ruptura predominante ocorreu respectivamente na linha de cola e na madeira (Figuras 16 e 17).

Figura 13 – Modo de ruptura predominante na colagem a 8% de teor de umidade



Fonte: Autor, 2015

Figura 14 – Modo de ruptura predominante na colagem a 10% de teor de umidade



Fonte: Autor, 2015

Figura 15 – Modo de ruptura predominante na colagem a 12% de teor de umidade



Fonte: Autor, 2015

Figura 16 – Modo de ruptura predominante na colagem a 14% de teor de umidade



Fonte: Autor, 2015

Figura 17 – Modo de ruptura predominante na colagem a 16% de teor de umidade



Fonte: Autor, 2015

Os resultados mostraram que com o aumento do teor de umidade da madeira no momento da colagem a tendência de ruptura é mista, podendo ocorrer na madeira, como aconteceu na colagem a 16% de teor de umidade. Aliás, essa faixa de umidade foi a que obteve o maior valor de resistência ao cisalhamento, o que pode ter resultado nesse tipo de ruptura. Por outro lado, para a colagem a 14% de teor de umidade a ruptura predominante na linha de cola vai de encontro ao valor de resistência ao cisalhamento obtido, o qual foi o mais baixo entre as outras faixas de umidades testadas. Uma possível deficiência na colagem para esta faixa de umidade como citada no item 5.1 pode ter resultado nesse tipo de ruptura.

5.3 Influência da umidade pós-colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola

A Tabela 5 mostra os valores da resistência ao cisalhamento da linha de cola obtido para os corpos de prova (CP) imersos em água (durante 12, 24, 36 e 48 horas) após colagem a 12% de umidade.

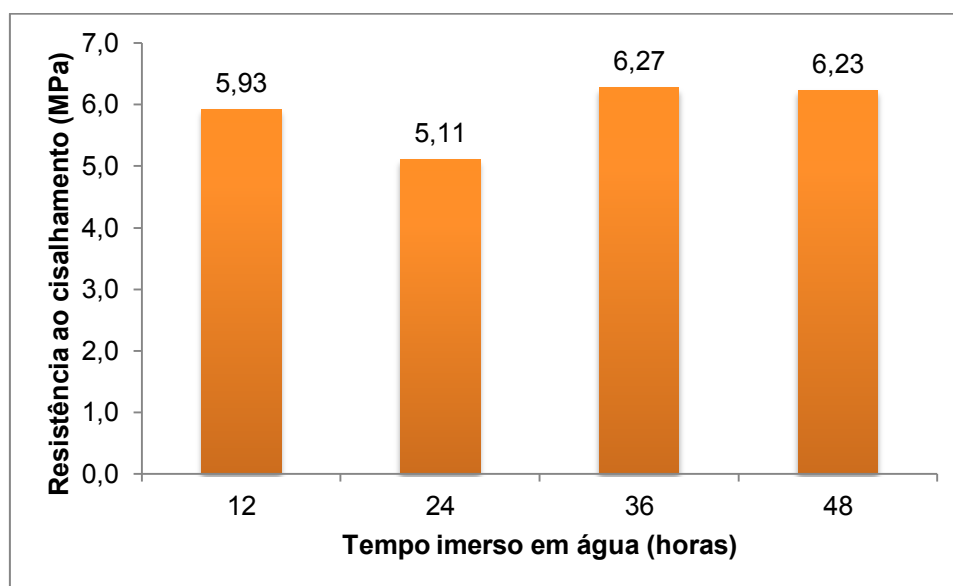
Tabela 5 – Valores e variabilidade da resistência ao cisalhamento da linha de cola em relação ao tempo de imersão em água

Tempo em água (horas)	Resistência ao cisalhamento f_v (MPa)				Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
	CP 1	CP 2	CP 3	Média		
12	6,43	6,26	5,09	5,93	0,73	12,34
24	4,56	4,84	5,93	5,11	0,72	14,15
36	5,88	5,98	6,95	6,27	0,59	9,44
48	5,54	6,48	6,67	6,23	0,61	9,71

Fonte: Autor, 2015

Na Figura 18 apresenta-se o comportamento resistente dos corpos de prova imersos em água depois de colados. São apresentados, neste caso, os valores médios da resistência ao cisalhamento da linha de cola.

Figura 18 – Influência da umidade pós-colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola



Fonte: Autor, 2015

A partir da análise dos resultados de resistência ao cisalhamento da linha de cola dos corpos de prova imersos em água por 12, 24, 36 e 48 horas, observou-se que a umidade não afetou a qualidade de colagem e consequentemente os valores da resistência ao cisalhamento da linha de cola.

Entretanto, para o tempo de imersão em água durante 24 horas, o valor médio da resistência ao cisalhamento da linha de cola ficou abaixo dos outros valores. Isso também mostra que podem ter ocorrido deficiências na colagem antes da imersão dos corpos de prova em água. Tais deficiências podem estar relacionadas a incorporação de bolhas de ar na linha de cola e a distribuição da resina de forma não uniforme na área de cola.

A análise de variância mostrou que não houve diferença significativa entre as médias da resistência ao cisalhamento da linha de cola em função do tempo imerso em água dos corpos de prova ($p\text{-value} = 30,3\% > 5\%$).

5.4 Influência da umidade pós-colagem nos modos de ruptura

Os modos de ruptura dos corpos de prova colados a 12% de teor de umidade e imersos em água durante os tempos de 12, 24, 36 e 48 horas estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Modos de ruptura de acordo com o tempo imerso em água

Número de corpos de prova	Tempo imerso em água (horas)	Modo de ruptura		
		Linha de cola	Madeira	Mista
3	12	-	3	-
3	24	-	-	3
3	36	-	2	1
3	48	-	3	-

Fonte: Autor, 2015

Para os corpos de prova imersos durante 12, 36 e 48 horas o modo de ruptura predominante ocorreu na madeira (Figuras 19, 21 e 22). Porém, para os corpos de prova imersos durante 24 horas a ruptura predominante foi mista (Figura 20).

Figura 19 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 12 horas



Fonte: Autor, 2015

Figura 20 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 24 horas



Fonte: Autor, 2015

Figura 21 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 36 horas



Fonte: Autor, 2015

Figura 22 – Modo de ruptura predominante após imersão em água durante 48 horas



Fonte: Autor, 2015

Os resultados mostraram que o tempo de imersão em água não afetou o modo de ruptura dos corpos de prova, o qual predominou na madeira. A exceção ocorreu com os corpos de prova imersos durante 24 horas que resultaram em ruptura predominante mista. Esse fato coincide com o seu valor de resistência ao cisalhamento inferior às demais resistências obtidas para cada faixa de tempo de imersão em água. A causa dessa ruptura também pode ser resultado de deficiências na colagem como citada no item 5.3.

6 CONCLUSÃO

O aumento da umidade da madeira no momento da colagem correspondeu a um aumento nos valores de resistência ao cisalhamento da linha de cola para os teores de umidade: 8%, 10%, 12% e 16%. Porém, estatisticamente esses valores, incluindo o valor para o teor de umidade a 14%, não apresentam diferenças entre si. Isso mostra que houve pouca influência do aumento da umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* para colagem na resistência ao cisalhamento da linha de cola.

Os corpos de prova colados a 8%, 10%, 12% e 16% de umidade não romperam na linha de cola, pelo contrário, romperam na forma mista (parte na linha de cola e parte na madeira) e na madeira, demonstrando que a colagem foi eficiente e satisfatória.

Os corpos de prova imersos em água por períodos de 12, 24, 36 e 48 horas não apresentaram estatisticamente diferença nos valores de resistência ao cisalhamento da linha de cola, ou seja, não perderam resistência e nem tiveram a qualidade da colagem prejudicada, indicando que a resina poliuretana, bicomponente, utilizada nesse estudo (Imperveg – Poliuretano vegetal) trabalha adequadamente na presença de umidade ao contrário da maioria das resinas poliuretanas.

O tempo de imersão em água durante 12, 36 e 48 horas também não afetou o modo de ruptura dos corpos de prova, os quais romperam predominantemente na madeira.

7 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Refazer os ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola para as umidades de colagem a 8%, 10%, 12%, 14% e 16% considerando um número maior de amostras e faixas de umidade.

Refazer os ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola pós-colagem para os tempos de imersão em água durante 12, 24, 36, e 48 horas considerando um maior número de corpos de prova e tempos de imersão em água.

Refazer ambos os ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola, porém, utilizando outra espécie de madeira de reflorestamento, como por exemplo, o *Pinus sp.*

Fazer os ensaios de resistência da linha de cola com *Pinus sp.* em autoclave por vácuo – pressão para avaliação da porcentagem de ruptura da linha de cola.

Verificar a influência da colagem em madeiras tratadas com CCA.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AZAMBUJA, M. dos A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BOHN, A. R. **Influência da espessura das lâminas de cola na madeira laminada colada**. 1995. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BOHN, A. R.; SZÜCS, C. A. Influência da espessura dos anéis de crescimento no comportamento mecânico dos elementos de madeira laminada colada. In: **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 5., 1995, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: EEUFMG; CEFET; IBRAMEM, 1995. v. 1. p. 579-586.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (mlc): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 125p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (United States). **Wood handbook: Wood as an engineering material**. Madison: General Technical Report Fpl-grt-113, 1999. 463 p.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P.; **Secagem Racional da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 p.

JESUS, J. M. H.; CALIL JUNIOR, C. **Estudo do adesivo poliuretano a base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia. São Carlos – SP, ano 3, n.8, 2002.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTÉ, W. A. (1984). **Principles of Wood science and technology**. v.1. Solid Wood. Reprint. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. Springer-Verlag: 1968 – 1984.

LIMA, M. F. Para vencer grandes vãos. **Revista de Tecnologia da Construção – Téchné**, São Paulo, v. 2, n. 11, p.15-17, 1994.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325 f.

Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOLINA, J. C. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes**. 2008. 240 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MOTTA, J. P; OLIVEIRA, J. T. S e ALVES, R. C. **Influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto**. Revista Construindo. Belo Horizonte – MG, v.4, n.2, 2012

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. **Variação do Teor de Umidade e da Densidade Básica na Madeira de Sete Espécies de Eucalipto**. R. Árvore.Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

PIGOZZO, J. C. **Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes**. 2004. 374 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Secagem da Madeira**. Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1985, p.70.

REMADE. Pinus e eucalipto para produção de painéis. **Revista da Madeira**, n.103, 2007. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1054&subject=Painéis&title=Pinus e eucalipto para produção de painéis](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1054&subject=Painéis&title=Pinus%20e%20eucalipto%20para%20produção%20de%20painéis)>. Acesso 25 de agosto de 2015.

SELBO, M. L. **Adhesives bonding of wood**. Was., DC. FPL – FS – USDA, Technical Bulletin, n. 1512, aug. 1975.

SKAAR, C. **Wood-water relations**. New York: Springer-Verlag, 1988. 283p.

SCHULTZ, A. C. P. **Avaliação da Colagem e da Variação de Umidade na Produção de Painéis Compensado com Mistura De Espécies**. 2008. 70 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

VICK, C. B. Coupling agent improves durability of PRF bonds to CCA treated. **Science Direct**, 1995.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. Wood handbook – Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. Chap. 9. 1999. 463p.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira**. 2003. 81 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.