Campus de São Carlos

**AVALIAÇÃO DO ADESIVO POLIURETANO A
BASE DE MAMONA PARA FABRICAÇÃO DE
MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC)**

MAXIMILIANO DOS ANJOS AZAMBUJA

Orientador: Prof. Dra. Antonio Alves Dias

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ÁREA INTERUNIDADES EM
"CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS"**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**

**AVALIAÇÃO DO ADESIVO POLIURETANO
À BASE DE MAMONA PARA FABRICAÇÃO DE
MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC)**

MAXIMILIANO DOS ANJOS AZAMBUJA

Dissertação apresentada à Área
Interunidades em Ciência e Engenharia
de Materiais, Campus de São Carlos,
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100037129

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

São Carlos

Class.	TESE
Cutt.	0547
Tombo	T0241/02
Sysno	1277174

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A991a Azambuja, Maximiliano dos Anjos
Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona
para fabricação de madeira laminada colada (MLC) /
Maximiliano dos Anjos Azambuja. -- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto
de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo,
2002.

Área Interunidades: Ciência e Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias.

1. Adesivo de mamona. 2. Madeira tratada.
3. Parâmetros de colagem. 4. Madeira laminada colada.
I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 – São Carlos-SP – Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

e-mail: wladerez@ifsc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MAXIMILIANO DOS ANJOS AZAMBUJA, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 19-09-2002.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Antonio Alves Dias (Orientador e Presidente)

Prof. Dr. José Manoel Henriques de Jesus – UFMT

Prof. Dr. Almir Sales – UFSCar

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Zoroastro Freitas de Azambuja, pela sabedoria e orientação na vida.
À minha mãe Zenira dos Anjos Azambuja, pelo amor, que sempre levo dentro de minha alma.
A meus irmãos Sandro, Robson, Emiliana e Vivian pelo amor e carinho.
À minha “boadrasta” Rita e irmãozinho Zoroastro Filho, minha nova família.

“Só por hoje, procurarei fortificar minha mente. Estudarei. Aprenderei algo proveitoso. Não serei um ocioso mental. Lerei alguma coisa que exija esforço, raciocínio e concentração”.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, pela fé e sabedoria.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes pela bolsa de estudos concedida.

Ao Professor Dr. Antonio Alves Dias pela orientação segura e incansável durante a elaboração deste trabalho, incentivo, confiança e amizade.

À Prof. Dr. Gilberto Orivaldo Chierice e todos os funcionários do Laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do IQSC-USP pelo auxílio e preparação do poliól e do prepolímero empregados neste.

Ao colega de pós-graduação Mariano Martinez Espinosa pela orientação segura do planejamento estatístico e análise dos resultados experimentais e teóricos.

À todos os colegas de pós-graduação, professores e funcionários dos Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras e Estruturas de Madeiras, que direta ou indiretamente, participaram na elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – OBJETIVOS.....	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 – MADEIRA LAMINADA COLADA	5
2.2 – ADESIVO POLIURETANO À BASE DE ÓLEO DE MAMONA	12
2.3 – PRESERVATIVOS HIDROSSOLÚVEIS	16
2.3.1 - USINAS DE PRESERVAÇÃO DE MADEIRA	18
2.3.2 - EFEITOS DO TRATAMENTO PRESERVATIVO HIDROSSOLÚVEL.....	19
2.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3 – DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE COLAGEM	24
3.1 – MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1.1 - MADEIRA	24
3.1.2 - ADESIVO	24
3.1.3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	25
3.1.4 – FABRICAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	28

3.1.5 - MÉTODOS DE ENSAIO	35
3.2 - RESULTADOS OBTIDOS.....	35
3.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	39
3.3.1 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA MT E M	48
3.3.2 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA C E M	49
3.3.3 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA TC E MT	53
3.3.4 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA TC E C	57
4 – VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA	62
4.1 – MATERIAIS E MÉTODOS	63
4.1.1 - MADEIRA	63
4.1.2 - ADESIVOS	63
4.1.3 – MONTAGEM DAS VIGAS	64
4.1.4 - MÉTODO DE ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DAS VIGAS ...	68
4.2 - RESULTADOS OBTIDOS.....	69
4.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	73
4.3.1 - DETERMINAÇÃO DO VALOR TEÓRICO DA RIGIDEZ À FLEXÃO (EI_{teo})	73
4.3.2 - EFICIÊNCIA DA LAMINAÇÃO DAS VIGAS	75
5 - CONCLUSÕES FINAIS	79
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	82
ANEXO A	89
ANEXO B	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma peça de MLC.....	8
Figura 2 – (a) Emenda de topo, (b) Emenda biselada e (c) Emenda dentada.....	8
Figura 3 – Esquema de MLC com empenamentos e trincas.....	12
Figura 4 - Poros impregnados com CCA (VICK, 1999).	20
Figura 5 – Entabicação ao ar (a), Climatizadoras (b).....	30
Figura 6 –Entabicação nas climatizadoras (a) e (b); Corpos-de-prova a 12% (c), Armazenagem dos corpos-de-prova já classificados e embalados (d) e Corpos-de- prova separados para a colagem (e).....	31
Figura 7 – UPM (a), Reservatório com CCA (b).....	31
Figura 8 –Compressor (a) e a Autoclave (b).....	32
Figura 9 - Procedimento de preparação e aplicação do adesivo poliuretano a base de mamona .	34
Figura 10 - Guia dos corpos-de-prova presos com sargento (a) e as Pressas utilizadas na colagem (b).	34
Figura 11 - Máquina universal AMSLER (a) e Detalhe da guia parafusada para manter o alinhamento do corpo-de-prova (b).	35
Figura 12 - Análise de resíduos - cisalhamento, colado, sem tratamento (dados da tabela 18).....	45
Figura 13 - Análise dos escores normais – cisalhamento, colado, sem tratamento (dados da tabela 18).....	45
Figura 14 - Análise de resíduos – cisalhamento, colado, com tratamento (dados da tabela 19).....	45
Figura 15 - Análise dos escores normais – cisalhamento, colado, com tratamento (dados da tabela 19).....	45

Figura 16 - Análise de resíduos - tração normal, colado, sem tratamento (dados da tabela 21).....	46
Figura 17 - Análise dos escores normais – tração normal, colado, sem tratamento (dados da tabela 21).....	46
Figura 18 - Análise de resíduos - tração normal, colado, com tratamento (dados da tabela 23).....	46
Figura 19 - Análise dos escores normais – tração normal, colado, com tratamento (dados da tabela 23).	46
Figura 20 - Análise de resíduos - tração paralela, colado, sem tratamento (dados da tabela 24).....	46
Figura 21 - Análise dos escores normais – tração paralela, colado, sem tratamento (dados da tabela 24).	46
Figura 22 - Análise de resíduos - tração paralela, colado, com tratamento (dados da tabela 25).....	47
Figura 23 - Análise dos escores normais – tração paralela, colado, com tratamento (dados da tabela 25).	47
Figura 24 - Esquema de aplicação da pressão de colagem nas vigas.	68
Figura 25 - Esquema estático do ensaio das vigas de MLC.	68
Figura 26 - Forma de ruptura das vigas de Pinus Caribea var. Hondurenses.	71
Figura 27 – Detalhe da ruptura das vigas de Pinus Caribea var. Hondurenses.	72
Figura 28 - Forma de ruptura das vigas de Eucaliptus Grandis.....	72
Figura 29 - Detalhe de ruptura das vigas de Eucaliptus Grandis.....	72
Figura 30 - Seção transversal genérica de uma viga em MLC.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de colagem para corpos-de-prova.	14
Tabela 2: Parâmetros de colagem para MLC.....	15
Tabela 3: Proporção entre componentes ativos – CCA.	16
Tabela 4: Retenções mínimas de integrantes ativos.	18
Tabela 5: Variações dos corpos-de-prova dos ensaios realizados.	27
Tabela 6: Viscosidade e pressão de colagem - tração paralela às fibras.....	27
Tabela 7: Viscosidade e pressão de colagem - cisalhamento e tração normal às fibras...28	
Tabela 8: Resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova maciços.	36
Tabela 9: Resistência à tração normal em corpos-de-prova maciços.	36
Tabela 10: Resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova colados, sem preservativo.36	
Tabela 11: Resistência à tração paralela em corpos-de-prova maciços.....	37
Tabela 12: Resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova colados, com preservativo CCA. .37	
Tabela 13: Resistência à tração paralela em corpos-de-prova colados, sem preservativo...37	
Tabela 14: Resistência à tração normal em corpos-de-prova colados, sem preservativo.38	
Tabela 15: Resistência à tração paralela em corpos-de-prova colados, com preservativo CCA.....	38
Tabela 16: Resistência à tração normal em corpos-de-prova colados, com preservativo CCA.....	39
Tabela 17: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova maciços.....	40
Tabela 18: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova colados, sem tratamento.	40

Tabela 19: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração normal de corpos-de-prova maciços.....	40
Tabela 20: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova colados, com tratamento.....	41
Tabela 21: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova colados, sem tratamento.....	41
Tabela 22: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova maciços.	42
Tabela 23: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração normal de corpos-de-prova colados, sem tratamento.	42
Tabela 24: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração normal de corpos-de-prova colados, com tratamento.....	43
Tabela 25: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova colados, sem tratamento.....	43
Tabela 26: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova colados, com tratamento.	44
Tabela 27: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento MT x M.	48
Tabela 28: Comparação de médias da resistência à tração normal MT x M.	48
Tabela 29: Comparação de médias da resistência dos finger-joints.	49
Tabela 30: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento C x M.	50
Tabela 31: Comparação de médias da resistência à tração normal C x M.	51
Tabela 32: Comparação de médias da resistência dos finger-joints C x M.	52
Tabela 33: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento TC x MT.....	54
Tabela 34: Comparação de médias da resistência à tração normal TC x MT.....	55
Tabela 35: Comparação de médias da resistência dos finger-joints TC x MT.	56

Tabela 36: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento TC x C.....	58
Tabela 37: Comparação de médias da resistência à tração normal TC x C.....	59
Tabela 38: Comparação de médias da resistência dos finger joints TC x C.....	60
Tabela 39: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Pinus" (5x15x230cm).	65
Tabela 40: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Pinus (5x10,5x230cm).	65
Tabela 41: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Eucaliptus" (5x15x230cm).....	66
Tabela 42: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Eucaliptus" (5x10,5x230cm).....	66
Tabela 43: Exemplo dos resultados de leitura de deslocamentos verticais na viga 1.	69
Tabela 44: Valores corrigidos dos deslocamentos verticais na viga 1.....	70
Tabela 45: Cálculo do EI efetivo da viga 1 de Pinus caribea var. hondurensis.....	71
Tabela 46: Valores obtidos para as cargas de ruptura das vigas (kN) e momento de ruptura (kN.m).	71
Tabela 47: Cálculo do EI_{teo} da viga 1 de Pinus Hondurenses.....	74
Tabela 48: Valores teóricos e experimentais de rigidez à flexão de todas as vigas ensaiadas.	75
Tabela 49: Valores de eficiência das vigas da espécie Pinus Caribea.....	75
Tabela 50: Valores de eficiência das vigas da espécie Eucalyptus grandis.....	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LaMEM	Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras
MLC	Madeira laminada colada
IQSC	Instituto de Química de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
NBR	Norma Brasileira Registrada

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Corpos-de-prova colados com o adesivo de mamona.
CCA	Arseniato de cobre cromatado
EI_{exp}	Valor experimental da rigidez à flexão
EI_{teo}	Valor teórico da rigidez à flexão
M	Corpos-de-prova maciços
MT	Corpos-de-prova maciços tratados com o preservativo CCA
TC	Corpos-de-prova tratados com o preservativo CCA e posteriormente colados com o adesivo de mamona.
UPM	Usina de preservação da madeira

RESUMO

AZAMBUJA, M.A. (2002). *Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)*. São Carlos, 2002. Dissertação (mestrado) – Área Interunidades, Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho teve como finalidade o estudo da aplicação de um adesivo alternativo para a fabricação de madeira laminada colada (MLC). Este adesivo, à base de óleo de mamona, apresenta vantagens em relação ao tradicionalmente utilizado, considerando aspectos ecológicos e econômicos. Foram determinados parâmetros adequados para a colagem, e avaliada a compatibilidade entre este adesivo e o tratamento com o preservativo hidrossolúvel de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA – tipo C) e em madeiras sem o tratamento preservativo, em termos de resistência da linha de cola, por meio dos ensaios de cisalhamento, de tração normal e de tração paralela às fibras, usando a espécie *Pinus caribea hondurensis*. Com estes parâmetros, foram confeccionadas 12 vigas de MLC, utilizando-se as espécies de reflorestamento *Pinus caribea hondurensis* e *Eucaliptus grandis*. Foi avaliado o desempenho estrutural das vigas de MLC, por intermédio do ensaio mecânico de resistência à flexão, objetivando-se analisar a resistência da linha de cola. Os resultados obtidos permitem concluir o bom desempenho do adesivo poliuretano à base de mamona, para a aplicação em madeira não preservada e preservada com CCA tipo-C. A pressão de colagem indicada para laminação das vigas é 0,8 MPa para madeira não tratada, e 1,6 MPa para madeira tratada. Para a fabricação das emendas das lâminas recomenda-se a pressão de colagem igual a 9 MPa, para madeira tratada ou não.

Palavras-chave: adesivo de mamona; madeira tratada; parâmetros de colagem; madeira laminada colada.

ABSTRACT

AZAMBUJA, M.A. (2002). *Evaluation of the polyurethane adhesive base on castor oil to fabrication of glued laminated timber (GLULAM)*. Sao Carlos, 2002. Dissertation (master's degree) – Interunidades area, School of Engineering of Sao Carlos, Institute of Physics of Sao Carlos, Institute of Chemistry of Sao Carlos, University of Sao Paulo.

The aim of this work is the study of the use of alternative adhesive for glued laminated timber (GLULAM). This adhesive, based on castor oil, presents ecological and economical advantages in relation of traditionally used. The appropriate parameters for gluing were determined and the compatibility between this adhesive and treatment with the waterborne preservative of chromated copper arsenate (CCA - C) were evaluated through shear tests and tensions tests (perpendicular and parallel to the grain), using the species *Pinus caribea hondurensis*. With these parameters, were made 12 beams of GLULAM; using the species *Pinus caribea hondurensis* and *Eucaliptus grandis*. The structural performance of the beams of GLULAM was evaluated through static bending tests. The results obtained allow concluding the good performance of the adhesive polyurethane based on castor oil, for use in wood not preserved and preserved with CCA type-C. The gluing pressures indicated are 0,8 MPa for non-treated wood, and 1,6 MPa for treated wood. The gluing pressure recommended for finger-joints is 9 MPa, for treated wood or not.

Keywords: castor oil adhesive; gluing parameters; glued laminated timber; GLULAM.

1 – INTRODUÇÃO

A madeira laminada colada (MLC) é consagrada no contexto internacional como um dos mais importantes materiais para a aplicação estrutural. No Brasil, os elementos estruturais em madeira laminada colada têm sido pouco utilizados, devido ao seu alto preço. Um dos motivos disto ocorrer é o custo da cola utilizada na sua fabricação, à base de resorcinol-formaldeído.

A técnica de fabricação de madeira laminada colada (MLC) baseia-se, principalmente, no uso racional da madeira de reflorestamento, ou mesmo espécies nativas de baixa e de média densidade.

A MLC é constituída por lâminas de madeira de dimensões relativamente reduzidas, em relação às dimensões finais do elemento estrutural, solidarizadas entre si, por meio de um adesivo, formando desta maneira peças com as mais variadas formas e dimensões. Cada lâmina é obtida por meio da emenda de peças de menor comprimento.

Os fatores que influenciam na resistência da madeira laminada colada são vários, entre eles o desempenho do adesivo empregado em sua fabricação, a resistência da madeira, a espécie de madeira, a quantidade de nós, a direção das fibras, as emendas longitudinais e laterais, a espessura e o número de lâminas, a qualidade e posição das lâminas, os módulos de elasticidade, as dimensões das peças e a distribuição das tensões.

HENRIQUES DE JESUS (2000) determinou os parâmetros de colagem para MLC, com o um adesivo alternativo, o adesivo poliuretano à base de mamona, constituído a partir do pré-polímero A249 e do poliól B1640, desenvolvido no laboratório de Química Analítica e Tecnologia de polímeros do IQSC - USP. A avaliação do adesivo foi feita por meio de ensaios de cisalhamento, de tração paralela e de tração normal às fibras da madeira em corpos-de-prova colados. Observa-se, em sua pesquisa, que o tempo de trabalhabilidade do adesivo é reduzido, o que dificulta sua aplicação em estruturas de MLC.

Para facilitar a aplicação do adesivo na produção de MLC, foi desenvolvida, pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (IQSC-USP), uma nova variação deste adesivo, a partir do pré-polímero A249 e do poliól 25040, que apresenta um tempo de trabalhabilidade superior ao da versão anterior. Esta nova variação foi o objeto de estudo deste trabalho.

Outro aspecto a salientar, é a necessidade do tratamento preservativo na madeira, principalmente para espécies de reflorestamento, aplicado sob condições de vácuo e de pressão, em autoclaves. Um dos produtos químicos mais utilizados atualmente para o tratamento preservativo da madeira, no Brasil, é o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) tipo-C, que é hidrossolúvel.

Tendo em vista este contexto, neste trabalho foram determinados parâmetros adequados de colagem para madeira sem tratamento e para madeira tratada sob condições de vácuo/pressão com o preservativo CCA tipo-C. Foi estudada a influência dos parâmetros pressão de colagem e viscosidade do adesivo, na resistência da linha de cola, por meio de testes de cisalhamento, de tração normal e de tração paralela às fibras. Para este último ensaio, foi utilizada a emenda dentada ("finger-joint"), que é a mais utilizada pelos produtores de MLC para a obtenção de

lâminas com o comprimento desejado, pois apresenta boa resistência mecânica e praticidade na sua execução. Nestes ensaios foi utilizada a espécie de madeira *Pinus Hondurensis* (*Pinus caribea* var. *hondurensis*), uma conífera. A escolha dessa espécie foi devido a sua baixa densidade, o que propicia boa colagem e retenção do preservativo CCA, além do fato desta madeira ser proveniente de áreas de reflorestamento.

Posteriormente, foram confeccionadas 12 vigas de MLC, utilizando-se uma disposição seletiva da qualidade das lâminas, utilizando as espécies *Pinus Caribea* - *Pinus caribea hondurensis* e o *Eucaliptus Grandis* - *Eucaliptus grandis*. Estas vigas foram coladas com o adesivo à base de mamona, utilizando os parâmetros de colagem com melhor resultado na parte inicial deste trabalho, e com o adesivo a base de resorcinol formaldeído (Cascophen), para efeito de comparação. A avaliação do desempenho estrutural destas vigas foi feita por intermédio de ensaios de flexão.

Com este trabalho pretende-se obter um melhor conhecimento do comportamento do novo adesivo poliuretano à base de mamona, quando aplicado em elementos estruturais de madeira laminada colada preservada ou não, com a finalidade de tornar a MLC mais competitiva no mercado brasileiro.

1.1 – OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- avaliar a compatibilidade do adesivo poliuretano à base de mamona com o tratamento preservativo de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) tipo-C, que é hidrossolúvel.
- determinar parâmetros de colagem (pressão de colagem e viscosidade) adequados

para a nova variação do adesivo poliuretano à base de mamona do tipo bicomponente, composto pelo póliol 25040 e prépolímero A249.

- avaliar o desempenho estrutural de vigas de madeira laminada colada, fabricadas com o adesivo poliuretano a base de mamona.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando o estudo desenvolvido, este capítulo apresenta a revisão bibliográfica a respeito dos seguintes assuntos:

- madeira laminada colada (MLC);
- adesivo poliuretano à base de mamona;
- preservativos hidrossolúveis, dando ênfase no preservativo hidrossolúvel de arseniato de cobre cromatado (CCA).

Com relação à MLC, foram apresentadas suas principais características, tipos de elementos, vantagens e desvantagens do material, e importância da ligação adesiva.

Em seguida, apresentam-se informações sobre o adesivo poliuretano à base de mamona, suas aplicações e alguns parâmetros para sua utilização.

Finalmente, são apresentadas as principais características do preservativo mais utilizado no Brasil, PINHEIRO (2002), o preservativo hidrossolúvel CCA, a forma adequada de sua aplicação e seus efeitos sobre a madeira.

2.1 – MADEIRA LAMINADA COLADA

As peças estruturais de madeira serrada possuem limitação nas suas dimensões, devido aos processos de extração, transporte, e da presença de defeitos

em peças mais avantajadas. Uma das formas de eliminar estas restrições é a utilização da madeira laminada colada (MLC), que consiste na obtenção de peças por meio da colagem de lâminas de pequena espessura.

Pode-se citar algumas vantagens da MLC, em relação às peças estruturais de madeira maciça, tais como:

- “possibilidade de construir grandes estruturas a partir de peças de dimensões comerciais, pois o adesivo permite o uso de peças curtas e estreitas, as quais unidas eficientemente, podem formar peças estruturais de diversas larguras, comprimento, formas e espessuras, MANTILLA (1989)”;
- “a versatilidade do material na obtenção das mais variadas formas geométricas para os elementos estruturais, possibilitam inúmeras configurações arquitetônicas, NATTERER (1991)”;
- ocorre redução da intensidade dos defeitos de secagem, próprios de peças maciças de grandes dimensões segundo ROCCO; SALES (1998) e MANTILLA (1989);
- “o baixo peso próprio do MLC é outra característica favorável para o processo construtivo, pois permite construções com inércia reduzida, propiciando maior economia na execução das fundações, LE COURRIER (1987)”;
- pode-se utilizar a madeira de reflorestamento ou espécies nativas que não são utilizadas ou são pouco utilizadas estruturalmente segundo MACEDO (1996);
- “possibilidade do emprego de peças de melhor qualidade nas regiões de alta solicitação, e peças de qualidade inferior nas regiões onde a solicitação é menos intensa, MANTILLA (1989)”.

Alguns aspectos restritivos da MLC em relação às peças estruturais de madeira maciça podem ser citados:

- custo superior ao da madeira maciça, segundo ROCCO; SALES (1998);

- de acordo com MANTILLA (1984), o fator de perda durante a sua fabricação é elevado, variando entre 13 e 33%, tanto na madeira como no adesivo, devido principalmente às emendas, ao acabamento, e às características do projeto;
- o processo de fabricação exige equipamentos e técnicas especiais como também mão de obra especializada, segundo ROCCO; SALES (1998);
- existe o custo adicional devido ao transporte que, em algumas situações é elevado, especialmente quando os elementos estruturais são grandes, segundo MANTILLA (1984).

Os elementos estruturais de MLC são constituídos por um determinado número de lâminas, unidas paralelamente ao eixo do elemento. Segundo MANTILLA (1984), seus componentes podem ser definidos como:

- Lâmina: apresentam espessura variável, de acordo com o tipo de peça, podendo variar de 1,0 cm até 5,0 cm, nas peças retas.
- Emendas longitudinais: empregadas para a obtenção de lâminas com maior comprimento, podendo ser de topo, biseladas ou dentadas (finger-joint).
- Emendas transversais: empregadas para obtenção de largura superior às das peças disponíveis.
- Linha adesiva – é constituída por um tipo de adesivo compatível com a madeira e a finalidade da peça; existem vários tipos de adesivos, sendo os adesivos à base de caseína ou de uréia mais empregados para uso em interiores, e os adesivos à base de resina resorcinol e fenol para uso em exteriores.

A figura 1 apresenta um esquema de uma peça de MLC.

Figura 1 – Esquema de uma peça de MLC.

Segundo MANTILLA (1989), as lâminas são obtidas através da emenda de tábuas (emendas longitudinais e laterais). As emendas longitudinais nas lâminas de madeira são necessárias quando se deseja obter elementos de MLC com comprimentos superiores ao da madeira serrada, ou devido a retirada de defeitos das lâminas. As emendas de topo, biseladas e dentadas são apresentadas nas figura 2.

Figura 2 – (a) Emenda de topo, (b) Emenda biselada e (c) Emenda dentada.

As emendas de topo são de fácil execução, entretanto têm pouca eficiência. Assim, as emendas biseladas foram desenvolvidas para melhorar a eficiência das emendas, em relação às de topo. Do ponto de vista de fabricação, a emenda biselada apresenta custo superior ao das emendas de topo, pois tem maior perda de madeira devido à inclinação, que é da ordem de 1:10, e pela maior dificuldade para a sua execução.

As emendas dentadas foram desenvolvidas com o objetivo de substituir as

emendas biseladas. Atualmente, este tipo de emenda vem sendo utilizado pelos produtores de MLC. Segundo MACEDO (1996) em seu estudo sobre emendas dentadas em madeira laminada, ressalta que as emendas dentadas (finger-joints) apresentam resultados de resistências mais uniformes que os outros tipos de emenda e facilitam a produção de MLC.

A resistência das uniões de peças de madeira ligadas por adesivos depende da resistência de cada elemento envolvido na união, segundo VICK (1999). Os adesivos transferem carga de um aderente para outro por meio de uma ligação superficial (ligação adesiva).

Segundo KOLLMANN (1975), os adesivos, a adesão e os aderentes são fatores que influenciam na tecnologia da ligação, e têm grande importância em muitos campos da engenharia, inclusive para o entendimento da colagem da madeira.

Segundo SKEIST (1990), os adesivos podem ser entendidos como sendo uma substância com propriedades de aderir fortemente a um substrato, e com a capacidade de manter este substrato de um mesmo material ou de um material diferente unidos por meio de uma ligação superficial. A adesão é um dos fenômenos mais importantes para a compreensão da formação da ligação adesiva, e pode ser entendida como a interação entre duas superfícies, causada por um forte campo de forças atrativas provenientes dos constituintes de cada superfície. Aderente é o termo usado para identificar sólidos ligados pelos adesivos. Um termo mais geral e antigo é substrato, indicando qualquer corpo sólido que sirva como suporte mecânico de camadas de adesivos, filmes ou tintas.

MARTINS FERREIRA et. al. (1989), “o desenvolvimento das ligações adesivas, depende de como se dominam e se controlam os seguintes fatores envolvidos na resistência de cada elo”:

- espécies de madeira, estrutura anatômica, porosidade, densidade e anéis de crescimento;
- variação dimensional e distribuição dos nós;
- natureza da superfície a ser colada, rugosidade, textura, danos provocados pelo processamento e condições físico-químicas como, capacidade de absorção e teor de umidade.
- adesivo;
- condições de serviço, resistência a esforços estáticos e dinâmicos;
- processo de colagem;

OLMOS (1992) apresenta alguns fatores que devem ser considerados para uma melhor escolha de um tipo de adesivo, de acordo com sua aplicação:

- esforços a que a colagem estará sujeita em serviço;
- agentes químicos que possam entrar em contato com a colagem;
- exposição a que a colagem estará sujeita;
- temperatura em que a colagem será exposta;
- fatores biológicos;
- características de trabalhabilidade (aplicação, velocidade de cura, estabilidade e rendimento).

Segundo OLIVEIRA e FREITAS (1995), um adesivo, independente do tipo, deve desenvolver e manter resistência de colagem suficiente durante toda a vida útil do elemento estrutural. Também deve ser capaz de:

- fluir ou espalhar-se sobre a superfície a ser colada;
- transferir-se para outra superfície que está sendo colada;
- umidificar a superfície onde está sendo aplicado;
- solidificar por evaporação, resfriamento ou reação química;

- não onerar em excesso o produto final.

Segundo MANTILLA (1984), a resistência, a estabilidade e a durabilidade de uma estrutura de MLC dependem, em grande parte, da resistência, da rigidez e da durabilidade das ligações. Algumas das vantagens encontradas na utilização de adesivos em MLC são:

- a distribuição dos esforços em áreas mais amplas torna possível a obtenção de ligações mais leves e mais resistentes. Evita-se assim o uso de materiais de junção mecânica, muitas vezes com má adequação estética, deixando rugosidade e/ou ressaltos superficiais;
- a linha adesiva pode ser uma barreira contra a umidade, impermeabilizando paredes de vedação da linha adesiva com “conservantes” (fungicidas, cupincidas, larbicidas, etc);
- os adesivos permitem unir materiais não semelhantes, aumentando ainda mais seu campo de aplicação.

Para efetuar a construção de vigas de madeira laminada colada (MLC), é necessário que não ocorra falha de colagem, ou seja, falha de coesão ou falha de adesão. As causas de falha de colagem mais comuns são segundo OLMOS (1992).

- presença de impurezas na superfície colada;
- formulação imprópria de adesivo;
- degradação do substrato (pH do adesivo);
- formação de bolhas de ar ou vapor durante a cura (focos de concentração de tensão);
- insuficiência de adesivo;
- insuficiência de pressão e ou temperatura
- tempo excessivo de montagem;

- teor de umidade inadequado do substrato;
- adesivo inadequado.

Segundo a APWA American Wood Preservers' Association (1994), também é importante evitar os efeitos de empenamentos e trincas na madeira, decorrente de processo de secagem mal conduzido, como mostrado na figura 3:

Figura 3 – Esquema de MLC com empenamentos e trincas.

2.2 – ADESIVO POLIURETANO À BASE DE ÓLEO DE MAMONA

ARAÚJO (1998) descreve que a tendência mundial à procura de materiais biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa, fez com que as pesquisas com poliuretanos derivados de óleo de mamona se tornassem um tema atual, abrindo assim novas perspectivas para o seu desenvolvimento.

Neste trabalho, utiliza-se a resina bi-componente poliuretânica à base de óleo de mamona, constituída a partir do poliól 25040 e do pré-polímero A249, que tem a vantagem de não ser agressiva ao homem e ao meio ambiente. Além disto, o óleo de mamona utilizado na fabricação do pré-polímero é proveniente de um recurso natural e renovável, segundo ARAÚJO (1998). O Instituto de Química de São Carlos desenvolveu esta nova variação de adesivo com a finalidade de melhorar suas qualidades de viscosidade, tempo de cura, trabalhabilidade, facilitando sua aplicação em MLC.

* O óleo de mamona é obtido da semente da planta “*Ricinus communis*”, que é encontrada em regiões tropicais e sub tropicais, sendo muito abundante no Brasil. É extraído pela compressão da semente ou por extração com solvente, segundo SKEIST (1990).

Uma importante propriedade das poliuretanas é a versatilidade quanto à variação de suas estruturas. Esta variação depende do tipo de prensagem da semente, do condicionamento prévio do óleo, dos métodos de purificação de óleo prensado, segundo ARAÚJO (1992).

HENRIQUES DE JESUS (2000) apresentou uma possibilidade de aplicação de uma variação deste polímero como adesivo, determinando parâmetros de colagem para madeira laminada colada, realizando ensaios de resistência ao cisalhamento, tração paralela e normal às fibras da madeira em corpos-de-prova colados.

A proporção utilizada para o preparo deste adesivo poliuretano à base mamona foi de uma parte, em peso, de pré-polímero A249 para uma parte, em peso, de polioli B1640. Após a mistura entre os dois componentes, o adesivo perde sua trabalhabilidade em aproximadamente 7 minutos, o que dificulta sua aplicação em estruturas de MLC.

É importante ressaltar, segundo ARAÚJO (1992), que as resinas poliuretanas sempre são mencionadas como exemplo de materiais que combinam alta resistência mecânica com elevado grau de alongamento. Esta combinação de propriedades proporciona ao material altas resistências ao impacto e à abrasão.

2.2.1 - UTILIZAÇÃO DO ADESIVO À BASE DE MAMONA EM MADEIRA

Estudo desenvolvido por HENRIQUES DE JESUS (2000) em corpos-de-prova de madeira, possibilitou definir alguns parâmetros ideais de colagem (Viscosidade do adesivo (V) em minutos, Tempo de pressão (T_p) em horas, Pressão de colagem (P) em MPa e Tempo de cura (T_c) em dias), em função de se obter maior resistência à tração normal e tração paralela (finger joints) às fibras, e ao cisalhamento. A finalidade da obtenção destes parâmetros foi à utilização deste adesivo na fabricação de madeira laminada colada. Os resultados obtidos, referentes a um consumo de adesivo de 350g/m^2 , estão apresentados na tabela 1:

Tabela 1: *Parâmetros de colagem para corpos-de-prova.*

Espécies	Ensaio/parâmetros	V(min.)	T_p (h)	P(MPa)	T_c (dias)
Pinus caribea hondurensis	Cisalhamento	3	4	0,4	12
	Tração Normal	6	6	0,6	8
	Tração Paralela	0	-	9,0	4
Eucaliptus grandis	Cisalhamento	0	4	0,6	8
	Tração Normal	3	4	0,6	16
	Tração Paralela	6	-	10,0	4

É importante observar que, para os ensaios de tração paralela às fibras da madeira, a pressão de colagem é aplicada quase que instantaneamente, utilizando-se a máquina universal de ensaios da marca AMSLER, com capacidade de 250 kN de carga. Sendo assim o parâmetro T_p (h) não é objeto de estudo, para estes ensaios.

Os ensaios realizados por HENRIQUES DE JESUS (2000) mostraram que os valores médios das resistências encontradas para o Pinus e para Eucaliptus nos ensaios de cisalhamento e tração normal apresentam valores superiores aos valores médios dos corpos-de-prova maciços de controle. Isto indica que o polímero à base de mamona penetrou nas estruturas micro e macro anatômicas da madeira, reforçando-as, e levando a ruptura a ocorrer em uma região mais interna à interface

madeira adesivo. Esta penetração é verificada também pelos resultados dos ensaios de tração paralela.

HENRIQUES DE JESUS (2000) afirma que o tempo de cura apresentou pequena influência na resistência. Observa que a resistência desenvolvida aos 4 dias é adequada para o emprego em estruturas de Madeira Laminada Colada (MLC). Isto pode ser reforçado pelo fato de que o tempo decorrido entre a produção da estrutura na indústria, o seu transporte, a montagem e entrega da obra, com a posterior solicitação total da carga prevista no projeto, é superior aos tempos de cura encontrados originalmente para cada ensaio.

A tabela 2 apresenta os parâmetros de colagem recomendados por HENRIQUES DE JESUS (2000):

Tabela 2: *Parâmetros de colagem para MLC.*

Espécies	V(min.)	T _p (h)	P(MPa)	T _c (dias)
Pinus caribea hondurensis	3	4	0,4	4
Eucaliptus grandis	0	4	0,6	4

Segundo HENRIQUES DE JESUS (2000), atenção especial deve ser dada ao preparo da madeira e à confecção dos corpos-de-prova colados. As imperfeições nos cortes podem gerar superfícies imperfeitas, o que concorre para uma colagem de má qualidade. O processamento das peças coladas deve ser cuidadoso, feito com ferramentas perfeitamente afiadas e sem defeitos. Se esta recomendação não for observada, os corpos-de-prova podem ser submetidos a esforços que, atingindo as estruturas micro e macro anatômicas da madeira, poderão interferir nos resultados dos ensaios para os quais foram confeccionados.

2.3 – PRESERVATIVOS HIDROSSOLÚVEIS

Em virtude da escassez de derivados de petróleo, os preservativos hidrossolúveis vêm assumindo uma importância cada vez maior no cenário da preservação da madeira. Em geral, os preservativos hidrossolúveis mais comercializados são: arseniato de cobre cromatado (CCA); arseniato de cobre amoniacal (ACA); sais de Cobre, cromo e boro (CCB); cloreto de zinco cromatado (CZC); cromato de cobre ácido (ACC), segundo PINHEIRO (2001).

De acordo com CAVALVANTE (1983) destaca-se o emprego do preservativo hidrossolúvel tipo CCA no Brasil, que teve início em 1959, e a partir de 1975, passou a ser produzido.

Segundo LEPAGE et al. (1986), o CCA é composto por sais de cobre, cromo e arsênio em proporções adequadas. O cromo funciona como fixador, o arsênio como agente inseticida e o cobre como fungicida.

De acordo com as normas NBR-6229 “*Postes de Eucalipto preservados sob pressão*”, e a EB-474 “*Moirões de madeira preservada para cercas*” da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, este produto pode ser fabricado em três formulações, ou seja, tipo “A”, “B” e “C”. A principal diferença entre elas está na proporção entre os seus principais componentes ativos. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) propõe a seguinte distribuição, apresentada na tabela 3:

Tabela 3: *Proporção entre componentes ativos – CCA.*

Componentes	Proporção		
	Tipo “A”	Tipo “B”	Tipo “C”
CrO ₃ (Trióxido de cromo)	65,5	35,3	47,5
CuO (Óxido de cobre)	18,1	19,6	18,5
As ₂ O ₅ (Pentóxido de arsênio)	16,4	45,1	34,0

Boletim Técnico da OSMOSE (2001) apresenta um preservativo de ação

fungicida e inseticida classificado quimicamente como Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) tipo C – óxido, o Osmose K-33 C, nas concentrações de $72\% \pm 1$ e em casos especiais à $70\% \pm 1$ de ingredientes ativos. Protege a madeira contra o ataque de insetos xilófagos (cupins, brocas, carunchos, etc.), contra fungos de apodrecimento e contra a destruição por furadores marinhos, tais como o Teredo e a Limnória, regulamentado no Brasil através das normas NBR 9480 (1986). “*Moirões de madeira preservada para cercas*” e NBR 12803 (1993) “*Dormentes de madeira preservada*” da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro.

É importante ressaltar que os produtos formados quando o CCA reage com a madeira conferem à madeira repelência à água, o que, sem dúvida, é um dos fatores que conferem eficiência ao tratamento, segundo LEPAGE et al. (1986).

PINHEIRO (2001), apresenta algumas vantagens na madeira após o tratamento com o CCA:

- embora o CCA seja solúvel em água, não é lixiviável após a aplicação, pois a reação química do produto com os componentes poliméricos da madeira (celulose), resulta em compostos insolúveis retidos nas fibras, garantindo longo efeito residual;
- não deixa resíduos em sua superfície, não exala vapores e nem odores;
- não altera a combustibilidade característica do material madeira, bem como não aumenta a corrosividade a metais utilizados em contato;
- acabamentos de superfície aplicados em madeira preservada apresentam uma durabilidade comprovadamente maior que os aplicados naquelas sem tratamentos, porém o acabamento ideal é proporcionado por produtos penetrantes formadores de filmes ou películas, e que também apresentam características hidrorrepelentes;
- pode ser usado em madeiras nativas ou de reflorestamento, independentemente das peças serem roliças ou serradas.

É importante ressaltar que o tratamento com o preservativo CCA é indicado para tratamento industrial realizado em “Usina de Preservação de Madeira” (UPM) a vácuo-pressão. De acordo com LEPAGE et al. (1986), não é recomendado para processos caseiros, porque seria necessário um tempo de tratamento muito longo.

De acordo com o Boletim Técnico da OSMOSE (2001), a retenção no tratamento é determinada considerando-se a permeabilidade da peça e da espécie de madeira a ser preservada (litros/m³ tratável), o volume da peça permeável ao tratamento preservativo, a retenção de ingredientes ativos para a condição de uso. A tabela 4 apresenta as retenções mínimas de Ingredientes ativos, para uso não estrutural e para uso estrutural:

Tabela 4: Retenções mínimas de integrantes ativos.

Classes de Uso	Retenções mínimas de Ingredientes ativos em kg/m ³		Exemplos de uso
	Não Estrutural	Estrutural	
Madeira em serviço imersa em água doce (para partes imersas ora emersas).			Estacas para agricultura, mourões, postes para eletrificação e telefonia, dormentes e colunas para edificações.
1 Madeira em serviço imersa em água doce (para partes imersas ora emersas).	6,5	9,6	Estacas para flutuantes e ancoradouros
Madeira em serviço sob abrigo mas em contato com uma fonte de umidade.			Estruturas de pontes, torres de resfriamento, condutores de água não potável, diques Water Stop.

2.3.1 - USINAS DE PRESERVAÇÃO DE MADEIRA

O tratamento com CCA realizado em unidades industriais denominadas Usinas de Preservação de Madeira (UPM), segundo LEPAGE et al. (1986), deve seguir algumas etapas importantes que contribuem para um tratamento eficiente:

1. Seca e beneficiada, a madeira é introduzida na autoclave;
2. Vácuo inicial. Retira a maior parte do ar existente nos elementos anatômicos da

madeira;

3. Ainda sob vácuo, a solução de CCA é transferida para a autoclave;
4. Sob alta pressão a solução é injetada na madeira até a saturação;
5. A pressão é aliviada e a solução excedente é transferida de volta ao reservatório;
6. Vácuo Final. Retirada do excesso de produto na superfície da madeira.

2.3.2 - EFEITOS DO TRATAMENTO PRESERVATIVO HIDROSSOLÚVEL

WINANDY et al. (1992) afirmam que tratamentos preservativos à base de água geralmente reduzem as propriedades mecânicas da madeira, e que seus efeitos estão diretamente relacionado a várias características do material e do processo de pré-tratamento, tratamento, e pós-tratamento, tais como: espécies, propriedade mecânica, química ou tipo de substância química, retenção, pós-tratamento, tipo do produto, temperatura inicial de secagem. Neste artigo, o autor comenta que os dados de resistência à tração paralela às fibras da madeira são limitados, indicando que esta resistência é afetada pelo tratamento com CCA e pelo seu processo de secagem, de forma semelhante ao módulo de ruptura na flexão (MOR).

VICK (1999) diz que os tratamentos preservativos, retardadores de fogo e estabilizantes dimensionais alteram as características superficiais da madeira, reduzindo a porosidade necessária à adesão. A figura 4 mostra os poros impregnados após tratamento com CCA- Tipo C.

Figura 4 - Poros impregnados com CCA (VICK, 1999).

VICK (1999) recomenda uma série de cuidados na preparação das superfícies antes de se promover à colagem da madeira. O acabamento das superfícies para colagem pode ser realizado por lixamento ou por aparelhamento (plaina). Os danos superficiais na estrutura da madeira causados pelo lixamento ou equipamentos de corte inadequado reduzem a resistência de aderência da madeira aos adesivos, portanto é recomendado que o acabamento seja realizados com plainas de lâminas novas.

BURMEISTER (1970) comenta que a intensidade dos efeitos de vários tratamentos preservativos à base de água nas propriedades mecânicas da madeira não varia muito em diferentes espécies de madeira. O autor avaliou corpos-de-prova das espécies “European beech”, Pinus, e “Spruce”, usando 10 formulações de preservativos à base de água, a níveis de retenção que variam de 0,5 a 1,5 lb/ft³ (8 a 24 kg/m³), não tendo encontrado influência significativa do tratamento preservativo, nas propriedades: módulo de ruptura na flexão (MOR), resistência de compressão paralela às fibras e resistência ao impacto na flexão. Entre os preservativos testados se incluem o CCA, “Chromated copper borate”, e o “Chromated fluorinated arsenate”.

De acordo com BARISKA et al.(1988), a resistência à tração perpendicular às fibras da madeira, nas direções radial e tangencial, é afetada diferentemente pelo

tratamento preservativo hidrossolúvel CCA-tipo C.

WINANDY et al. (1989) compararam resultados de resistência à compressão do “Douglas-fir” e do “Southern Pine”, tratados com CCA, concluindo não existir influência do tratamento preservativo nesta resistência.

LEE (1985) avaliou a influência do tratamento com CCA na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, não tendo obtido efeito significativo do tratamento nesta resistência.

Os efeitos do tratamento preservativo à base de água nas propriedades mecânicas de madeira, sob condições padrões, especificadas na American Wood Preservers' Association (AWPA-1994) são as seguintes:

- o módulo de elasticidade (MOE) normalmente não é afetado;
- a resistência à compressão paralela às fibras, normalmente não é afetada;
- o módulo de ruptura à flexão (MOR) está freqüentemente reduzido de 0 a 20 por cento, dependendo da retenção e severidade da temperatura de secagem empregada;
- propriedades relacionadas à geração de energia são normalmente reduzidas de 10 a 50 por cento.

Os preservativos à base de água aprovada pela AWPA (1994) podem ser classificados, em relação aos seus efeitos sobre a resistência, como tendo maior ou menor efeito. De acordo com esta classificação, pode-se ordenar os tipos de preservativos, de maneira crescente quanto aos efeitos, da seguinte forma:

ACA = ACZA = ACCit < ACQ-B = Amine-Cu = CCA-C < CCA-A

Onde:

ACA: Ammoniacal Copper Arsenate (Arseniato de Cobre Amoniacal)

ACZA: Ammoniacal Copper Zinc Arsenate (Arseniato de Cobre e Zinco Amoniacal)

ACCit: Ammoniacal Copper Citrate

ACQ-B: Ammoniacal Copper Quaternary – Type B

Amine-Cu: Amine-Based Copper

CCA-C e CCA-A: Ammoniacal copper arsenate – Type C and A (Arseniato de Cobre Cromatado - Tipo C e A).

WINANDY et al. (1983) mostraram uma redução significativa na dureza, seguindo um tratamento convencional de célula cheia (Conventional full-cell treatment). Estas reduções variaram de 16% a 23%, para corpos-de-prova tratados com $0,6 \text{ lb/ft}^3$ ($9,6 \text{ kg/m}^3$) de CCA tipo C, e de 36% a 47%, para os corpos-de-prova tratados com $2,5 \text{ lb/ft}^3$ (40 kg/m^3). Neste último caso, a madeira é secada e depois tratada a 190°F (88°C). Um nível de retenção do CCA e ACA de $2,5 \text{ lb/ft}^3$ (40 kg/m^3) reduz significativamente as propriedades relacionadas à energia, de acordo com WINANDY et al. (1983) e WINANDY et al. (1985).

Em geral, o nível de retenção do preservativo à base de água menor que $1,0 \text{ lb/ft}^3$ (16 kg/m^3) parece ter pequenos efeitos negativos sobre a resistência, segundo LEE (1985), WINANDY et al (1985) e WINANDY et al. (1989).

KIM (1991) mostrou que as altas temperaturas de secagem pós-tratamento, aumentam a magnitude do efeito do tratamento CCA significativamente no módulo de elasticidade e módulo de ruptura do Pinus “Lodgepole”, quando comparado com a temperatura de secagem convencional.

Os efeitos do CCA tipo C na madeira laminada colada exposta a temperaturas altas (66°C), durante 60 e 160 dias, com 75% de umidade relativa do ar, foram avaliadas por WINANDY (1994). Os resultados indicaram que o tratamento de CCA acelerou a degradação térmica, prejudicando a resistência a flexão, quando comparada a madeira sem tratamento.

2.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para utilizar a MLC como elemento estrutural é necessário garantir a eficiência da união colada nas lâminas e nas emendas. Para isto, é importante conhecer os principais fatores que influenciam na colagem da madeira, tais como, sua umidade, estrutura anatômica, porosidade, densidade, rugosidade, textura, capacidade de absorção e tipo do adesivo utilizado.

O adesivo de mamona do tipo bi-componente, constituído a partir do poliól B1640 e do pré-polímero A249, descrito na revisão bibliográfica, apresentou resultados satisfatórios em corpos-de-prova, quando submetidos a ensaios mecânicos de resistência ao cisalhamento, à tração normal e à tração paralela as fibras da madeira. Porém, seu comportamento em vigas de MLC precisa ser melhor estudado, devido as suas limitações quanto à trabalhabilidade.

O Instituto de Química de São Carlos desenvolveu uma nova versão deste adesivo poliuretano a base de mamona, constituído a partir do poliól 25040 e do pré-polímero A249, com melhores qualidades de viscosidade, tempo de cura, trabalhabilidade, facilitando sua aplicação em MLC. Esta variação, já citada na revisão bibliográfica, será objeto de estudo neste trabalho, sendo determinados os parâmetros ideais de colagem, considerando a sua utilização em MLC.

Também é importante estudar a resistência de madeiras impregnadas com preservativos contra fungos e insetos, e a influência do tratamento preservativo na eficiência da colagem de MLC. Existem poucos artigos referentes a estes assuntos, principalmente quando se trata de espécies de madeiras nativas preservadas com o preservativo hidrossolúvel CCA tipo C, o mais utilizado no Brasil.

3 – DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE COLAGEM

Neste capítulo é apresentado o estudo desenvolvido para determinar os valores mais adequados para a viscosidade e para a pressão de colagem, para o adesivo poliuretano à base de mamona. Também é avaliada a influência do tratamento preservativo com CCA na madeira nestes parâmetros.

3.1 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1 - MADEIRA

Foi escolhida a espécie de madeira *Pinus Hondurensis* - *Pinus caribea* var. *hondurensis*, uma conífera. A escolha dessa espécie foi devido a sua baixa densidade, o que propicia boa colagem e retenção do preservativo CCA, além do fato desta madeira ser proveniente de áreas de reflorestamento.

3.1.2 - ADESIVO

Foi utilizada a resina bi-componente poliuretânica à base de óleo de mamona, constituída a partir de um poliól 25040 e um pré-polímero A249, conforme descrito

no item 2.2 deste trabalho. Foi utilizada a relação estequiométrica de mistura de 1 parte em massa do poliól 25040 para 1 parte em massa de pré-polímero A249 e um consumo de adesivo de 350g/m^2 . Esta condição possibilita que a resina, após polimerização completa (24 h) em condições ambientais apresente uma resistência mecânica à compressão de 30 a 40 MPa, segundo ARAÚJO (1998).

3.1.3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios realizados tiveram como objetivo investigar alguns parâmetros de colagem para o adesivo poliuretano a base de mamona, verificando sua eficiência na madeira sem tratamento preservativo e na madeira tratada com o preservativo CCA. Foram avaliadas as resistências na lâmina de cola quanto ao cisalhamento, à tração paralela e à tração normal às fibras.

Os corpos-de-prova foram confeccionados de acordo com as recomendações da norma brasileira NBR 7190/97.

As variáveis analisadas foram a viscosidade e a pressão de colagem. O parâmetro viscosidade do adesivo foi tomado em função do tempo decorrido desde a mistura dos componentes até aplicação do adesivo, considerando que a viscosidade aumenta, ao longo do tempo, até a polimerização completa.

Foi feito um planejamento experimental, com a finalidade de verificar a influência de cada uma destas variáveis e suas interações, buscando determinar os valores ideais para os parâmetros de colagem.

Os ensaios foram efetuados com os seguintes valores de viscosidade e de pressão de colagem:

- para o ensaio de cisalhamento e de tração normal às fibras adotaram-se as variações

de 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 e 1,6 MPa para a pressão de colagem e adotaram-se as variações de 4, 6, 8, 10 e 12 minutos para a viscosidade, totalizando 25 combinações.

- para o ensaio de resistência à tração paralela às fibras utilizaram-se três valores de pressão de colagem (9,0 MPa, 11,0 MPa, 13,0 MPa) e três valores de viscosidade correspondentes a 2, 4 e 6 minutos, totalizando 9 combinações.

O valor inferior para a pressão de colagem, nos ensaios de cisalhamento e tração normal, foi recomendado na literatura, segundo MACÊDO (1996) e MANTILLA CARRASCO (1989). O valor inferior de pressão de colagem para o ensaio de tração paralela, foi recomendado na literatura, segundo STRICKLER (1967). Ensaios preliminares realizados, não apresentados neste trabalho, utilizando pressões inferiores às citadas, conduziram a resultados de resistência insatisfatórios. Por este motivo, nos ensaios principais foram utilizados valores iguais ou superiores a estes.

Os valores de viscosidade avaliados por HENRIQUES DE JESUS (2000), para o adesivo bi-componente (poliol B16040 e pré-polímero A249), são correspondentes aos tempos de 0, 3 e 6 minutos. Neste trabalho, utiliza-se uma variação do adesivo poliuretano à base de mamona, que apresenta tempo de trabalhabilidade maior, em relação à variação empregada por HENRIQUES DE JESUS (2000). Por este motivo, adotaram-se tempos iguais a 4, 6, 8, 10 e 12 minutos para a viscosidade.

Estas combinações de pressão de colagem e viscosidade têm como objetivo verificar a eficiência do adesivo poliuretano à base de mamona na resistência na linha de cola frente a um aumento de pressão de colagem e tempo de aplicação.

Foram avaliadas quatro variações de corpos-de-prova, denominadas da seguinte maneira:

- (TC) – Corpos-de-prova tratados com o preservativo CCA e posteriormente colados com o adesivo de mamona;
- (C) – Corpos-de-prova colados com o adesivo de mamona;
- (MT) – Corpos-de-prova maciços tratados com o preservativo CCA;
- (M) – Corpos-de-prova maciços, para efeito comparativo.

Foram confeccionados 744 corpos-de-prova, distribuídos de acordo com a tabela 5 a seguir:

Tabela 5: *Variações dos corpos-de-prova dos ensaios realizados.*

Ensaio	M	MT	C	TC	Total parcial
Cisalhamento	6	6	150	150	312
Tração normal	6	6	150	150	312
Tração Paralela	6	6	54	54	120
Total Geral					744

Para cada tipo de ensaio realizado, foram confeccionados 6 corpos-de-prova semelhantes, extraídos de 6 diferentes peças.

A Tabela 6 mostra os valores de viscosidade e pressão de colagem para cada tipo de ensaio de tração paralela às fibras da madeira, para os corpos-de-prova colados.

Tabela 6: *Viscosidade e pressão de colagem - tração paralela às fibras.*

TIPO DE ENSAIO		VARIAÇÕES		Número de corpos-de-prova por ensaio
TRAÇÃO PARALELA		Viscosidade (minutos)	Pressão de colagem (MPa)	
C	TC			
101	110	2	9	6
102	111	4	9	6
103	112	6	9	6
104	113	2	11	6
105	114	4	11	6
106	115	6	11	6
107	116	2	13	6
108	117	4	13	6
109	118	6	13	6

A Tabela 7 mostra os valores de viscosidade e de pressão de colagem, para cada tipo de ensaio de cisalhamento e de tração normal às fibras da madeira, para os

corpos-de-prova colados.

Tabela 7: *Viscosidade e pressão de colagem - cisalhamento e tração normal às fibras.*

TIPO DE ENSAIO					Número de	
CISALHAMENTO		TRAÇÃO NORMAL		Viscosidade (minutos)	Pressão de colagem (MPa)	corpos-de-prova por ensaio
C	TC	C	TC			
1	26	51	76	4	0,8	6
2	27	52	77	6	0,8	6
3	28	53	78	8	0,8	6
4	29	54	79	10	0,8	6
5	30	55	80	12	0,8	6
6	31	56	81	4	1,0	6
7	32	57	82	6	1,0	6
8	33	58	83	8	1,0	6
9	34	59	84	10	1,0	6
10	35	60	85	12	1,0	6
11	36	61	86	4	1,2	6
12	37	62	87	6	1,2	6
13	38	63	88	8	1,2	6
14	39	64	89	10	1,2	6
15	40	65	90	12	1,2	6
16	41	66	91	4	1,4	6
17	42	67	92	6	1,4	6
18	43	68	93	8	1,4	6
19	44	69	94	10	1,4	6
20	45	70	95	12	1,4	6
21	46	71	96	4	1,6	6
22	47	72	97	6	1,6	6
23	48	73	98	8	1,6	6
24	49	74	99	10	1,6	6
25	50	75	100	12	1,6	6

3.1.4 – FABRICAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

A seguir, são apresentados os procedimentos utilizados para extração dos corpos-de-prova, secagem da madeira, etapas de tratamento da madeira e processo de colagem dos corpos-de-prova.

3.1.4.1 – EXTRAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Os corpos-de-prova de cisalhamento foram obtidos de 6 peças de madeira de seção de 6 cm x 15 cm e comprimento de 220 cm. De cada peça foram retirados 50 corpos-de-prova de cisalhamento para a determinação da resistência da lâmina de cola e 2 corpos-de-prova de cisalhamento maciços, totalizando 312 corpos-de-prova.

Os 50 corpos-de-prova (C e TC), retirados de cada peça, para determinação da resistência na lâmina da cola, foram distribuídos de forma aleatória nos tipos de ensaios propostos (ensaios denominados 1 a 50), por meio de sorteio.

Um dos 2 corpos-de-prova maciços, retirados de cada peça, foi ensaiado sem tratamento preservativo (M), enquanto que o outro foi ensaiado com tratamento preservativo CCA (MT).

Os corpos-de-prova de tração normal (ensaios denominados 51 a 100) para determinação da resistência da lâmina de cola, bem como os dois corpos-de-prova maciços, foram extraídos e distribuídos da mesma forma que os corpos-de-prova de cisalhamento.

Os corpos-de-prova de tração paralela foram obtidos de 6 peças diferentes de madeira, de seção de 6 cm x 15 cm e comprimento de 250 cm. De cada peça foram retirados 18 corpos-de-prova de tração paralela para a determinação da resistência do finger-joint, e 2 corpos-de-prova de tração paralela maciços, todos com a mesma forma e dimensões prescritas pela norma brasileira NBR 7190/97, totalizando 120 corpos-de-prova.

Os 18 corpos-de-prova de tração paralela retirados de cada peça, para caracterização do adesivo, foram distribuídos de forma aleatória nos tipos de ensaios propostos (ensaios denominados 101 a 118), por meio de sorteio.

A distribuição dos corpos-de-prova maciços foi feita de forma análoga à dos

ensaios de cisalhamento.

3.1.4.2 – SECAGEM DA MADEIRA

A secagem dos corpos-de-prova foi feita de forma controlada, para evitar fissuras e empenamentos na madeira. Primeiramente, numeraram-se todos os corpos-de-prova extraídos, conforme seu respectivo tipo de ensaio, respeitando a distribuição realizada, conforme descrito no item 3.1.4.1. Posteriormente, os corpos-de-prova foram entabicados para uma secagem inicial (ao ar) e, em seguida, entabicados na climatizadora, e submetidos a uma temperatura de 30 °C. Os corpos-de-prova foram secados até o teor de umidade igual a 12%.

Os corpos-de-prova relacionados aos ensaios com tratamento preservativo, sofreram um novo processo de secagem, semelhante ao descrito, após a realização do tratamento preservativo.

Os corpos-de-prova foram embalados em sacos plásticos para manterem a umidade de 12%, até os dias pré-determinados para a colagem.

A figura 5 e 6 ilustram as etapas utilizadas no procedimento de secagem dos corpos-de-prova.

(a)

(b)

Figura 5 – Entabicação ao ar (a), Climatizadoras (b).

Figura 6 –Entablicamento nas climatizadoras (a) e (b); Corpos-de-prova a 12% (c), Armazenagem dos corpos-de-prova já classificados e embalados (d) e Corpos-de-prova separados para a colagem (e).

3.1.4.3 –ETAPAS DE TRATAMENTO DA MADEIRA

Utilizou-se a Usina de Preservação de Madeira (UPM) do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) para realização do tratamento preservativo, mostradas nas figura 7 e 8.

Figura 7 – UPM (a), Reservatório com CCA (b).

(a)

(b)

Figura 8 –Compressor (a) e a Autoclave (b).

Os corpos-de-prova relacionados aos ensaios com tratamento foram introduzidos na autoclave. Iniciou-se o vácuo inicial para retirar a maior parte do ar existente no interior das células da madeira, ainda sob vácuo, a solução de CCA foi transferida para a autoclave. Depois, sob alta pressão, a solução foi injetada na madeira até a saturação. A pressão foi aliviada e a solução excedente foi transferida de volta ao reservatório. Posteriormente, aplicou-se um vácuo final para retirar o excesso do produto na madeira.

3.1.4.4 - PROCESSO DE COLAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Para realizar a aplicação do adesivo poliuretano à base de mamona bi-componente nos corpos-de-prova foi necessário misturar os componentes, que dão origem ao adesivo, dentro de sacos plásticos para evitar a incorporação de bolhas de ar ao mesmo, que contribui para uma colagem ineficiente. Após a mistura, o adesivo foi aplicado na superfície por intermédio de espátulas, nos corpos-de-prova de tração normal às fibras da madeira e cisalhamento, ou por pincel, nos corpos-de-prova de tração paralela.

É importante comentar que se utilizou um tempo de montagem aberta de 2 minutos aproximadamente, correspondente ao tempo decorrido entre a aplicação do

adesivo nos corpos-de-prova e sua união, para todos os corpos-de-prova.

Posteriormente utilizou-se um tempo de montagem fechada de 10 minutos, aproximadamente. Este tempo é o decorrido entre o posicionamento dos corpos-de-prova nas guias, prendê-los com sargentos, posicioná-los nos pórticos e aplicar a pressão de colagem.

O tempo de cura para todos os corpos-de-prova colados foi de 8 dias.

A figura 9 indica o procedimento de aplicação do adesivo poliuretano à base de mamona, mostrando os seguintes passos:

- a) Preparação das embalagens plásticas contendo os dois componentes do adesivo na quantidade adequada, separados um do outro;
- b) Homogeneização dos componentes;
- c) Corte de uma das extremidades da embalagem que contém o adesivo já misturado, formando uma espécie de “aplicador” do adesivo;
- d) Aplicação do adesivo sobre a superfície (ambas as superfícies) com auxílio do “aplicador”;
- e) Distribuição do adesivo sobre as superfícies a serem coladas, por intermédio de uma espátula de madeira;
- f) Colagem das superfícies, após o tempo de montagem aberta, estando a peça pronta para a aplicação da pressão de colagem.

Figura 9 - Procedimento de preparação e aplicação do adesivo poliuretano a base de mamona.

Para a aplicação da pressão de colagem nos corpos de prova de tração normal e cisalhamento, foram utilizadas quatro prensas constituídas de pequenos pórticos, com um anel dinamométrico para medir a força aplicada, conforme mostrado na figura 10.

Figura 10 - Guia dos corpos-de-prova presos com sargento (a) e as Prensas utilizadas na colagem (b).

A guia presa com o sargento evita o deslizamento relativo das peças de madeira durante a aplicação da pressão, enquanto o adesivo ainda não havia atingido sua polimerização completa.

Para a aplicação da pressão de colagem dos corpos-de-prova de tração paralela às fibras, foi utilizada a máquina universal de ensaios da marca AMSLER, conforme mostrado na figura 11.

Figura 11 - Máquina universal AMSLER (a) e Detalhe da guia parafusada para manter o alinhamento do corpo-de-prova (b).

Os corpos-de-prova de tração normal e cisalhamento foram colados com a seção transversal de 0,5 cm superiores ao valor final, sendo cortados nas dimensões finais depois da cura do adesivo.

3.1.5 - MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios para a avaliação da resistência do adesivo à tração na direção paralela, tração normal às fibras e ao cisalhamento foram realizados por intermédio de corpos-de-prova confeccionados segundo a NBR 7190/97. Para a realização destes ensaios utilizou-se a máquina universal de ensaios da marca AMSLER, com capacidade de 250 kN.

3.2 - RESULTADOS OBTIDOS

Nas tabelas 8 a 16 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados:

Tabela 8: Resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova maciços.

Tipo de Ensaios	Repetições (MPa)						Média
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y _m
M	10,07	10,08	10,17	10,21	10,28	11,20	10,33
MT	11,21	12,21	12,42	12,42	12,43	13,02	12,28

Tabela 9: Resistência à tração normal em corpos-de-prova maciços.

Tipo de Ensaios	Repetições (MPa)						Média
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y _m
M	3,32	3,42	3,43	3,86	3,91	3,99	3,66
MT	3,02	3,14	3,55	3,62	4,07	4,45	3,64

Tabela 10: Resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova colados, sem preservativo.

Tipo de Ensaios	Viscosidade (min)	Pressão de colagem (MPa)	Repetições (MPa)						Média
			Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y _m
1	4	0,8	9,64	9,67	9,70	10,22	10,33	11,49	10,17
2	6	0,8	10,58	10,60	10,62	11,16	12,21	12,33	11,25
3	8	0,8	9,97	10,33	10,84	11,14	11,43	11,52	10,87
4	10	0,8	10,66	11,03	11,11	11,15	11,46	11,96	11,23
5	12	0,8	10,98	11,43	11,85	12,92	13,23	13,29	(12,28)
6	4	1,0	8,81	9,40	9,55	9,85	10,27	11,16	9,84
7	6	1,0	10,11	10,30	10,58	10,77	10,99	12,58	10,89
8	8	1,0	9,17	9,95	10,87	11,18	11,42	12,32	10,82
9	10	1,0	7,88	7,97	8,11	8,38	8,87	9,58	8,47
10	12	1,0	9,74	10,04	11,18	11,52	12,05	12,17	(11,12)
11	4	1,2	8,44	9,24	9,44	9,47	9,59	10,75	9,49
12	6	1,2	8,14	8,46	8,85	9,51	10,33	10,51	9,30
13	8	1,2	8,42	8,48	8,67	9,60	9,93	10,04	9,19
14	10	1,2	10,46	10,76	11,32	12,11	12,26	12,36	(11,55)
15	12	1,2	10,20	10,59	10,97	11,99	12,62	12,68	11,51
16	4	1,4	8,47	8,68	10,95	11,62	12,04	12,68	10,74
17	6	1,4	11,65	11,94	12,07	12,67	12,68	13,00	12,34
18	8	1,4	11,14	12,04	12,49	12,86	13,27	14,07	(12,64)
19	10	1,4	10,74	11,17	11,57	13,06	13,07	13,61	12,20
20	12	1,4	9,93	10,17	10,73	10,78	10,79	11,07	10,58
21	4	1,6	11,04	11,42	11,58	11,68	12,47	12,58	11,79
22	6	1,6	9,13	9,34	9,36	10,20	10,86	11,00	9,98
23	8	1,6	9,50	9,83	10,12	10,56	10,62	12,44	10,51
24	10	1,6	9,99	10,34	10,86	11,22	12,24	12,74	11,23
25	12	1,6	10,00	11,24	12,25	12,33	12,78	12,90	(11,92)

Tabela 11: Resistência à tração paralela em corpos-de-prova maciços.

Tipo de Ensaios	Repetições (MPa)						Média
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y _m
M	53,07	55,35	66,91	68,56	77,78	78,32	66,67
MT	57,67	61,36	64,39	67,50	70,17	71,51	65,43

Tabela 12: Resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova colados, com preservativo CCA.

Tipo de Ensaios	Viscosidade (min)	Pressão de colagem (MPa)	Repetições (MPa)						Média
			Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y _m
26	4	0,8	8,22	8,34	9,00	9,16	9,96	10,28	9,16
27	6	0,8	10,06	10,12	10,55	11,22	11,29	11,44	10,78
28	8	0,8	6,08	9,95	10,43	10,77	11,10	12,45	10,13
29	10	0,8	8,06	8,94	9,18	10,81	12,15	12,57	10,29
30	12	0,8	9,88	10,32	10,62	10,85	10,86	12,19	10,79
31	4	1,0	9,04	9,44	9,59	9,76	9,91	10,97	9,78
32	6	1,0	10,12	10,20	10,38	10,57	10,91	13,21	10,90
33	8	1,0	9,43	9,79	10,12	10,72	11,07	12,11	10,54
34	10	1,0	11,62	11,65	12,47	13,52	13,70	14,31	12,88
35	12	1,0	11,13	11,79	12,19	12,26	12,54	13,30	12,20
36	4	1,2	11,35	11,67	11,72	12,43	12,76	13,63	12,26
37	6	1,2	11,17	11,83	12,29	13,04	13,34	13,93	12,60
38	8	1,2	9,35	9,60	10,22	11,14	11,24	11,87	10,57
39	10	1,2	10,05	11,27	11,41	11,70	11,86	12,51	11,47
40	12	1,2	11,16	11,94	12,22	12,40	12,88	13,59	12,36
41	4	1,4	11,24	11,48	11,56	11,64	12,34	12,51	11,79
42	6	1,4	9,85	9,87	10,41	10,48	10,98	11,30	10,48
43	8	1,4	10,91	10,97	10,99	11,52	11,85	12,39	11,44
44	10	1,4	9,71	10,38	10,65	11,55	11,89	12,28	11,07
45	12	1,4	10,49	10,64	11,83	11,93	13,01	13,29	11,86
46	4	1,6	11,20	11,33	11,98	12,14	12,39	12,59	11,94
47	6	1,6	9,27	9,92	10,10	11,43	11,64	11,88	10,70
48	8	1,6	11,28	11,40	12,06	12,21	12,70	13,60	12,21
49	10	1,6	11,94	12,32	12,40	12,67	13,49	13,79	12,77
50	12	1,6	11,49	11,89	12,15	12,54	12,74	13,49	12,38

Tabela 13: Resistência à tração paralela em corpos-de-prova colados, sem preservativo.

Tipo de Ensaios	Viscosidade (min)	Pressão de colagem (MPa)	Repetições (MPa)						Média
			Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y _m
101	2	9	57,27	58,37	60,06	61,85	62,25	65,05	60,81
102	4	9	45,42	53,60	58,18	59,69	64,48	66,91	58,05
103	6	9	54,79	55,29	56,66	61,32	66,69	69,03	60,63
104	2	11	40,69	46,63	51,24	64,78	71,26	76,77	58,56
105	4	11	48,36	56,84	64,40	66,24	66,79	69,78	62,07
106	6	11	43,99	53,03	53,86	64,00	68,47	72,77	59,35
107	2	13	43,45	59,96	61,31	67,79	68,86	74,69	62,68
108	4	13	52,95	54,62	56,41	58,22	63,88	67,80	58,98
109	6	13	50,84	51,52	56,38	57,79	61,60	65,40	57,25

Tabela 14: Resistência à tração normal em corpos-de-prova colados, sem preservativo.

Tipo de Ensaio	Viscosidade (min)	Pressão de colagem (MPa)	Repetições (MPa)						Média
			Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	
51	4	0,8	3,40	3,51	3,57	3,59	3,68	3,91	3,61
52	6	0,8	3,19	3,20	3,50	3,76	3,79	3,85	3,55
53	8	0,8	3,26	3,44	3,55	3,74	3,91	3,93	3,64
54	10	0,8	3,17	3,28	3,46	3,54	3,58	3,64	3,44
55	12	0,8	3,22	3,31	3,40	3,58	3,92	4,01	3,57
56	4	1,0	3,35	3,42	3,54	3,57	3,73	3,99	3,60
57	6	1,0	3,11	3,30	3,43	3,86	3,97	3,99	3,61
58	8	1,0	3,25	3,38	3,53	4,04	4,17	4,29	3,78
59	10	1,0	3,62	3,69	3,69	3,84	3,87	4,07	3,80
60	12	1,0	2,98	3,14	3,39	3,49	3,73	4,23	3,49
61	4	1,2	3,12	3,51	3,66	3,73	3,83	3,96	3,63
62	6	1,2	2,93	3,18	3,27	3,34	3,86	3,96	3,42
63	8	1,2	3,25	3,36	3,53	3,56	3,75	4,08	3,59
64	10	1,2	3,36	3,55	3,70	3,79	3,86	3,99	3,71
65	12	1,2	3,35	3,37	3,52	3,99	3,99	4,15	3,73
66	4	1,4	3,24	3,58	3,66	3,78	3,82	4,17	3,71
67	6	1,4	2,81	3,37	3,45	3,95	3,99	4,02	3,60
68	8	1,4	3,10	3,17	3,70	3,84	3,88	4,00	3,62
69	10	1,4	3,26	3,44	3,71	3,99	4,07	4,25	3,79
70	12	1,4	2,75	3,57	3,58	4,05	4,06	4,33	3,72
71	4	1,6	3,12	3,13	3,55	3,64	3,69	4,37	3,58
72	6	1,6	3,05	3,14	3,18	3,27	3,49	4,20	3,39
73	8	1,6	3,14	3,45	3,47	3,53	3,55	3,60	3,46
74	10	1,6	3,38	3,47	3,71	3,98	4,15	4,16	3,81
75	12	1,6	3,51	3,63	3,73	3,78	3,87	3,93	3,74

Tabela 15: Resistência à tração paralela em corpos-de-prova colados, com preservativo CCA.

Tipo de Ensaio	Viscosidade (min)	Pressão de colagem (MPa)	Repetições (MPa)						Média
			Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	
110	2	9	47,63	47,97	50,17	51,87	67,00	76,23	56,81
111	4	9	54,82	55,62	56,74	60,50	65,30	65,36	59,73
112	6	9	50,30	53,82	56,83	61,25	66,75	74,44	60,56
113	2	11	46,45	53,17	55,79	57,73	71,48	72,65	59,55
114	4	11	46,74	55,11	60,03	62,10	70,60	72,81	61,23
115	6	11	47,31	48,08	55,75	60,55	66,11	67,38	57,53
116	2	13	50,96	53,42	58,45	63,20	63,27	71,06	60,06
117	4	13	48,70	50,27	60,04	63,59	72,06	72,64	61,22
118	6	13	49,87	51,19	53,10	53,78	54,81	58,30	53,51

Tabela 16: Resistência à tração normal em corpos-de-prova colados, com preservativo CCA.

Tipo de Ensaio	Viscosidade (min)	Pressão de colagem (MPa)	Repetições (MPa)						Média Y_m
			Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	
76	4	0,8	3,29	3,35	3,42	3,45	3,73	4,10	3,55
77	6	0,8	2,94	3,06	3,07	3,21	3,34	3,48	3,18
78	8	0,8	3,09	3,31	3,51	3,52	4,28	4,31	3,67
79	10	0,8	3,13	3,15	3,20	3,25	3,35	3,63	3,29
80	12	0,8	3,20	3,29	3,56	3,78	3,91	3,93	3,61
81	4	1,0	3,17	3,25	3,34	3,80	4,12	4,13	3,64
82	6	1,0	2,70	2,73	2,79	2,79	3,69	3,88	3,10
83	8	1,0	3,37	3,44	3,47	3,64	3,67	4,24	3,64
84	10	1,0	3,18	3,22	3,26	3,36	3,58	3,77	3,39
85	12	1,0	2,91	3,26	3,26	3,54	3,60	4,18	3,46
86	4	1,2	2,12	2,46	2,50	3,10	3,29	3,68	2,86
87	6	1,2	3,29	3,48	3,62	3,91	4,26	4,33	3,81
88	8	1,2	3,65	3,66	3,78	3,79	3,94	4,03	3,81
89	10	1,2	3,00	3,18	3,39	3,64	4,20	4,27	3,61
90	12	1,2	3,54	3,59	3,60	3,72	3,92	4,07	3,74
91	4	1,4	2,90	3,18	3,39	3,92	3,98	4,28	3,61
92	6	1,4	3,41	3,45	3,48	3,89	3,97	4,28	3,75
93	8	1,4	3,39	3,49	3,58	3,85	3,91	4,12	3,72
94	10	1,4	3,16	3,31	3,59	3,87	3,91	4,00	3,64
95	12	1,4	3,16	3,17	3,48	3,71	3,73	3,84	3,52
96	4	1,6	3,20	3,33	3,37	3,40	3,45	3,51	3,38
97	6	1,6	3,34	3,40	3,43	3,68	3,93	4,22	3,67
98	8	1,6	3,24	3,30	3,32	3,88	3,95	3,98	3,61
99	10	1,6	3,21	3,50	3,50	3,89	4,08	4,09	3,71
100	12	1,6	3,04	3,32	3,60	3,71	3,81	3,96	3,57

3.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, é feita uma análise do coeficiente de variação dos valores de resistência obtidos, com o objetivo de verificar a variabilidade.

Posteriormente, analisaram-se os dados por intermédio de um modelo geral linear, realizando-se uma análise de resíduos deste modelo. Com isto, pode ser verificada a igualdade de variância, utilizando-se gráficos de resíduos contra os valores estimados, e a normalidade da distribuição dos resultados, utilizando-se gráficos dos escores normais.

Também foi efetuada comparação de médias entre amostras de tamanho iguais, utilizando-se o Método de Tukey.

As tabelas 17 a 26 apresentam os coeficientes de variação obtidos.

Tabela 17: *Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova maciços.*

Tipo de Ensaios	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV (%)
M	10,33	9,88	10,79	0,43	4,17
MT	12,28	11,66	12,91	0,59	4,82

Tabela 18: *Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova colados, sem tratamento.*

Tipo de Ensaios	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV (%)
1	10,17	9,43	10,41	0,71	6,97
2	11,25	10,39	12,11	0,82	7,31
3	10,87	10,22	11,52	0,62	5,68
4	11,23	10,77	11,69	0,44	3,92
5	12,28	11,24	13,33	0,99	8,07
6	9,84	8,99	10,69	0,81	8,21
7	10,89	9,96	11,82	0,89	8,15
8	10,82	9,65	11,99	1,11	10,31
9	8,47	7,78	9,15	0,65	7,72
10	11,12	10,05	12,19	1,02	9,18
11	9,49	8,71	10,27	0,74	7,82
12	9,30	8,27	10,33	0,98	10,54
13	9,19	8,41	9,98	0,75	8,15
14	11,55	10,69	12,41	0,82	7,08
15	11,51	10,39	12,63	1,07	9,28
16	10,74	8,88	12,60	1,77	16,50
17	12,34	11,79	12,88	0,52	4,24
18	12,64	11,58	13,71	1,01	8,02
19	12,20	10,96	13,45	1,19	9,75
20	10,58	10,12	11,03	0,43	4,11
21	11,79	11,16	12,43	0,61	5,15
22	9,98	9,12	10,85	0,82	8,25
23	10,51	9,43	11,60	1,04	9,85
24	11,23	10,10	12,36	1,08	9,57
25	11,92	10,75	13,08	1,11	9,28

Tabela 19: *Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração normal de corpos-de-prova maciços.*

Tipo de Ensaios	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
M	3,66	3,34	3,96	0,30	8,08
MT	3,64	3,07	4,21	0,55	14,99

Tabela 20: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova colados, com tratamento.

Tipo de Ensaio	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
26	9,16	8,29	10,04	0,83	9,08
27	10,78	10,13	11,43	0,62	5,71
28	10,13	7,87	12,39	2,16	21,31
29	10,29	8,35	12,22	1,84	17,92
30	10,79	9,97	11,61	0,78	7,24
31	9,78	9,10	10,47	0,65	6,65
32	10,90	9,67	12,12	1,17	10,72
33	10,54	9,52	11,56	0,97	9,24
34	12,88	11,69	14,07	1,13	8,78
35	12,20	11,44	12,97	0,72	5,94
36	12,26	11,37	13,15	0,85	6,94
37	12,60	11,53	13,68	1,02	8,13
38	10,57	9,52	11,62	1,00	9,47
39	11,47	10,61	12,33	0,82	7,13
40	12,36	11,50	13,23	0,83	6,68
41	11,79	11,26	12,33	0,51	4,30
42	10,48	9,87	11,09	0,58	5,54
43	11,44	10,81	12,07	0,60	5,22
44	11,07	10,04	12,11	0,99	8,90
45	11,86	10,65	13,08	1,16	9,77
46	11,94	11,35	12,53	0,56	4,73
47	10,70	9,57	11,84	1,08	10,09
48	12,21	11,30	13,11	0,86	7,06
49	12,77	12,01	13,53	0,72	5,64
50	12,38	11,65	13,12	0,70	5,68

Tabela 21: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova colados, sem tratamento.

Tipo de Ensaio	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
101	60,81	57,83	63,78	2,84	4,66
102	58,05	49,89	66,20	7,77	13,38
103	60,63	54,23	67,03	6,10	10,06
104	58,56	43,37	73,75	14,47	24,71
105	62,07	53,67	70,46	8,00	12,89
106	59,35	47,94	70,77	10,87	18,31
107	62,68	51,30	74,06	10,84	17,30
108	58,98	52,96	65,00	5,73	9,72
109	57,25	51,31	63,20	5,67	9,89

Tabela 22: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova maciços.

Tipo de Ensaio	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
M	66,67	55,40	77,93	10,73	16,10
MT	65,43	59,85	71,02	5,32	8,13

Tabela 23: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração normal de corpos-de-prova colados, sem tratamento.

Tipo de Ensaio	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
51	3,61	3,43	3,79	0,17	4,78
52	3,55	3,24	3,86	0,30	8,40
53	3,64	3,36	3,92	0,27	7,34
54	3,44	3,25	3,64	0,19	5,38
55	3,57	3,23	3,92	0,33	9,17
56	3,60	3,36	3,84	0,23	6,34
57	3,61	3,21	4,01	0,38	10,45
58	3,78	3,31	4,24	0,44	11,69
59	3,80	3,62	3,97	0,17	4,36
60	3,49	3,02	3,96	0,45	12,79
61	3,63	3,33	3,94	0,29	8,06
62	3,42	3,00	3,85	0,40	11,76
63	3,59	3,28	3,90	0,29	8,21
64	3,71	3,47	3,95	0,23	6,09
65	3,73	3,36	4,10	0,35	9,48
66	3,71	3,39	4,03	0,31	8,29
67	3,60	3,10	4,10	0,48	13,33
68	3,62	3,21	4,02	0,38	10,63
69	3,79	3,38	4,19	0,38	10,12
70	3,72	3,13	4,31	0,56	15,05
71	3,58	3,10	4,07	0,46	12,82
72	3,39	2,94	3,83	0,42	12,50
73	3,46	3,28	3,63	0,16	4,75
74	3,81	3,45	4,17	0,34	8,93
75	3,74	3,58	3,90	0,15	4,11

Tabela 24: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração normal de corpos-de-prova colados, com tratamento.

Tipo de Ensaios	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
76	3,55	3,24	3,88	0,31	8,59
77	3,18	2,97	3,39	0,20	6,35
78	3,67	3,14	4,20	0,51	13,89
79	3,29	3,09	3,48	0,19	5,64
80	3,61	3,28	3,94	0,31	8,64
81	3,64	3,18	4,10	0,44	12,05
82	3,10	2,53	3,66	0,54	17,31
83	3,64	3,31	3,97	0,32	8,71
84	3,39	3,15	3,64	0,23	6,85
85	3,46	3,01	3,91	0,43	12,41
86	2,86	2,24	3,48	0,59	20,73
87	3,81	3,37	4,26	0,42	11,08
88	3,81	3,65	3,97	0,15	3,98
89	3,61	3,06	4,17	0,53	14,62
90	3,74	3,52	3,96	0,21	5,69
91	3,61	3,05	4,17	0,53	14,71
92	3,75	3,38	4,12	0,36	9,48
93	3,72	3,43	4,02	0,28	7,54
94	3,64	3,28	4,00	0,34	9,42
95	3,52	3,21	3,83	0,30	8,40
96	3,38	3,26	3,49	0,11	3,21
97	3,67	3,30	4,03	0,35	9,51
98	3,61	3,24	3,99	0,36	9,90
99	3,71	3,33	4,09	0,36	9,70
100	3,57	3,22	3,93	0,34	9,43

Tabela 25: Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova colados, sem tratamento.

Tipo de Ensaios	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
101	60,81	57,83	63,78	2,84	4,66
102	58,05	49,89	66,20	7,77	13,38
103	60,63	54,23	67,03	6,10	10,06
104	58,56	43,37	73,75	14,47	24,71
105	62,07	53,67	70,46	8,00	12,89
106	59,35	47,94	70,77	10,87	18,31
107	62,68	51,30	74,06	10,84	17,30
108	58,98	52,96	65,00	5,73	9,72
109	57,25	51,31	63,20	5,67	9,89

Tabela 26: *Intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação para o ensaio de resistência à tração paralela de corpos-de-prova colados, com tratamento.*

Tipo de Ensaios	Ym (MPa)	Intervalo de confiança (95%)		Desvio padrão	Coeficiente de variação CV(%)
110	56,81	44,29	69,34	11,93	21,00
111	59,73	54,73	64,72	4,76	7,97
112	60,56	51,22	69,91	8,90	14,70
113	59,55	48,60	70,49	10,43	17,51
114	61,23	51,04	71,43	9,71	15,86
115	57,53	48,42	66,64	8,68	15,09
116	60,06	52,34	67,78	7,36	12,25
117	61,22	50,39	72,04	10,31	16,84
118	53,51	50,41	56,60	2,95	5,51

Os valores dos coeficientes de variação para as propriedades da madeira são da ordem de 18%, com a madeira com o teor de umidade de 12%, segundo pesquisas desenvolvidas por SALES (1996), ROCCO LAHR (1990) e FREITAS (1978).

Nota-se, nas tabelas citadas anteriormente, que todos os coeficientes de variação são inferiores ao coeficiente de variação de 18%, exceto para cinco ensaios: 28, 86, 104, 106 e 110, com os respectivos coeficientes de variação: 21,31%, 20,73%, 24,71%, 18,31% e 21,00%.

Pode-se afirmar que os coeficientes de variação para os 118 tipos de ensaios realizados demonstram; mesmo com cinco exceções, que os ensaios foram bem conduzidos e que a dispersão dos valores é devido às propriedades da madeira.

A seguir é verificada a distribuição normal dos dados, por intermédio do “General Linear Model” do MINITABDEMO (2002). Uma das ferramentas mais significantes para a verificação da adequação de um modelo de regressão é a análise dos resíduos. Com esta análise é possível verificar, por meio de gráficos, se as suposições sobre os resíduos do modelo se satisfazem, isto é, verificar se as suposições de igualdade de variância, de normalidade e de independência, se

cumprem, segundo MARTÍNEZ (2001).

Por intermédio deste modelo, é possível avaliar a suposição de igualdade de variância, plotando-se gráficos dos resíduos contra os valores estimados. Sendo esta válida, a dispersão de resíduos nos gráficos não revelam nenhum padrão óbvio, isto é, distribuem-se de maneira aleatória, ao longo do eixo dos valores estimados.

Para verificar a distribuição normal, utilizam-se gráficos dos escores normais. Sendo esta válida, os pontos dos Escores Normais x Resíduos estão localizados ao longo de uma reta.

As figuras 12 a 23 mostram estes gráficos (gráfico dos resíduos contra os valores estimados) para cada situação analisada.

Figura 12 - Análise de resíduos - cisalhamento, colado, sem tratamento (dados da tabela 10).

Figura 13 - Análise dos escores normais - cisalhamento, colado, sem tratamento (dados da tabela 10)

Figura 14 - Análise de resíduos - cisalhamento, colado, com tratamento (dados da tabela 12).

Figura 15 - Análise dos escores normais - cisalhamento, colado, com tratamento (dados da tabela 12)

Figura 16 - Análise de resíduos - tração normal, colado, sem tratamento (dados da tabela 14).

Figura 17 - Análise dos escores normais – tração normal, colado, sem tratamento (dados da tabela 14)

Figura 18 - Análise de resíduos - tração normal, colado, com tratamento (dados da tabela 16).

Figura 19 - Análise dos escores normais – tração normal, colado, com tratamento (dados da tabela 16).

Figura 20 - Análise de resíduos - tração paralela, colado, sem tratamento (dados da tabela 13).

Figura 21 - Análise dos escores normais – tração paralela, colado, sem tratamento (dados da tabela 13).

Figura 22 - Análise de resíduos - tração paralela, colado, com tratamento (dados da tabela 15).

Figura 23 - Análise dos escores normais – tração paralela, colado, com tratamento (dados da tabela 15).

Analisando a variância pelos gráficos dos resíduos, pode-se concluir que a variância é constante. Observa-se, na figura 12, a presença de um valor em destaque com alto valor de resíduo (primeira réplica do ensaio 28, com resistência ao cisalhamento igual a 6,08 MPa, com pressão de colagem 0,8 MPa e viscosidade 8 min). Na figura 3.10, se observa um comportamento linear, indicando que os resíduos seguem uma distribuição normal, a menos do valor destacado anteriormente na figura 12. Porém, isto não é considerado problemático para a utilização do “General Linear Model” proposto.

De maneira geral, a situação de análise de variância e normalidade da distribuição se repete nos demais casos. Portanto, pode-se concluir que a variância em todos os ensaios foi constante, confirmando a suposição de normalidade.

Como se tem uma distribuição normal, pode-se utilizar o método de Tukey, apresentado no anexo A, para comparações de médias entre amostras de tamanhos iguais, ao nível de significância de 0,05. Serão feitos quatro tipos de comparações:

- Madeira maciça tratada (**MT**) e a madeira maciça sem tratamento (**M**);
- Corpos-de-prova colados sem tratamento (**C**) e os corpos-de-prova maciços de controle (**M**);

- Corpos-de-prova tratados colados (TC) e os corpos-de-prova maciços com tratamento (MT);
- Corpos-de-prova tratados colados (TC) e os corpos-de-prova colados sem tratamento preservativo (C);

Estas quatro situações serão melhor abordadas nos próximos itens 3.3.1 a 3.3.4.

3.3.1 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA MT E M

Foram comparadas as médias entre a madeira maciça tratada (MT) e a madeira maciça sem tratamento de controle (M), com a finalidade de verificar a influência do tratamento preservativo. As tabelas 27 a 29 apresentam as comparações feitas.

Tabela 27: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento MT x M.

MT		M		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
MT	12,28	M	10,33	1,95	0,6658	1,2832 2,6168	Diferente	1,19

Tabela 28: Comparação de médias da resistência à tração normal MT x M.

MT		M		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
MT	3,64	M	3,66	0,02	0,5485	-0,5503 0,5770	Igual	1,00

Tabela 29: Comparação de médias da resistência dos finger-joints.

MT		M		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
MT	65,43	M	66,67	1,24	10,8913	-12,1240 9,6610	Igual	0,98

Na tabela 27 pode ser verificado que as médias de resistência ao cisalhamento são diferentes, e que a média nos corpos-de-prova **MT** foi superior à média dos corpos-de-prova **M**. Nas tabelas 28 e 29, referentes aos ensaios de resistência à tração normal e à tração paralela, verifica-se que as médias dos corpos-de-prova **MT** são iguais as médias dos corpos-de-prova **M**. Com isto pode-se concluir que:

- Não existiu influência significativa do tratamento preservativo nas propriedades de resistência à tração normal e tração paralela às fibras da madeira.
- Para o ensaio de cisalhamento verifica-se que a resistência dos corpos-de-prova **MT** foi superior aos corpos-de-prova **M**.

3.3.2 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA **C** E **M**

Foram comparadas as médias das resistências dos corpos-de-prova colados sem tratamento (**C**) e dos corpos-de-prova maciços de controle (**M**), com a finalidade de verificar a eficiência do adesivo em relação à madeira maciça. As tabelas 30 a 32 apresentam estas comparações. Para melhor visualização, as figuras 22 e 23 apresentam os gráficos "relação de médias x pressão de colagem" e "relação de médias x viscosidade", para o ensaio de cisalhamento.

Tabela 30: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento $C \times M$.

C		M		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y_m	Tipo de Ensaio	Y_m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
1	10,17	M	10,33	0,16	0,7538	-0,9155	0,5955	Igual
2	11,25			0,91	0,8410	0,0723	1,7577	Diferente
3	10,87			0,53	0,6833	-0,1488	1,2221	Igual
4	11,23			0,89	0,5622	0,3327	1,4540	Diferente
5	12,28			1,95	0,9840	0,9640	2,9327	Diferente
6	9,84			0,49	0,8336	-1,3279	0,3380	Igual
7	10,89			0,55	0,8965	-0,3434	1,4501	Igual
8	10,82			0,48	1,0869	-0,6041	1,5708	Igual
9	8,47			1,87	0,7117	-2,5810	-1,1590	Diferente
10	11,12			0,78	1,0094	-0,2253	1,7886	Igual
11	9,49			0,85	0,7811	-1,6284	-0,0650	Diferente
12	9,30			1,03	0,9755	-2,0103	-0,0597	Diferente
13	9,19			1,15	0,7851	-1,9309	-0,3591	Diferente
14	11,55			1,21	0,8426	0,3699	2,0501	Diferente
15	11,51			1,17	1,0475	0,1274	2,2192	Diferente
16	10,74			0,40	1,6560	-1,2520	2,0620	Igual
17	12,34			2,00	0,6181	1,3835	2,6165	Diferente
18	12,64			2,31	0,9994	1,3096	3,3104	Diferente
19	12,20			1,87	1,1490	0,7179	3,0188	Diferente
20	10,58			0,25	0,5583	-0,3123	0,7989	Igual
21	11,79			1,46	0,6763	0,7830	2,1370	Diferente
22	9,98			0,35	0,8444	-1,1975	0,4908	Igual
23	10,51			0,18	1,0208	-0,8443	1,1977	Igual
24	11,23			0,90	1,0516	-0,1557	1,9490	Igual
25	11,92			1,58	1,0800	0,5015	2,6618	Diferente

C X M **Figura 22** – Relação de médias (CxM) x Pressão de colagem - cisalhamento

Figura 23 – Relação de médias (CxM) x Viscosidade – cisalhamento.

Tabela 31: Comparação de médias da resistência à tração normal C x M.

C		M		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
51	3,61	M	3,66	0,05	0,3040	-0,3569 0,2669	Igual	0,99
52	3,55			0,11	0,3772	-0,4889 0,2756	Igual	0,97
53	3,64			0,02	0,3594	-0,3797 0,3463	Igual	0,99
54	3,44			0,22	0,3105	-0,5265 0,1065	Igual	0,94
55	3,57			0,09	0,3944	-0,4827 0,3194	Igual	0,98
56	3,60			0,06	0,3377	-0,3966 0,2866	Igual	0,98
57	3,61			0,05	0,4314	-0,4815 0,3915	Igual	0,99
58	3,78			0,12	0,4800	-0,3630 0,3063	Igual	1,03
59	3,80			0,14	0,3033	-0,1662 0,4496	Igual	1,04
60	3,49			0,17	0,4831	-0,6488 0,3255	Igual	0,95
61	3,63			0,03	0,3722	-0,3996 0,3596	Igual	0,99
62	3,42			0,24	0,4494	-0,6862 0,2228	Igual	0,94
63	3,59			0,07	0,3756	-0,4473 0,3140	Igual	0,98
64	3,71			0,05	0,3339	-0,2852 0,3918	Igual	1,01
65	3,73			0,07	0,4165	-0,3467 0,4934	Igual	1,02
66	3,71			0,05	0,3821	-0,3338 0,4405	Igual	1,01
67	3,60			0,06	0,5071	-0,5691 0,4558	Igual	0,98
68	3,62			0,04	0,4368	-0,4812 0,4012	Igual	0,99
69	3,79			0,13	0,4350	-0,3095 0,5729	Igual	1,03
70	3,72			0,06	0,5725	-0,5092 0,6459	Igual	1,02
71	3,58			0,08	0,4933	-0,5684 0,4251	Igual	0,98
72	3,39			0,27	0,4676	-0,7374 0,2041	Igual	0,93
73	3,46			0,20	0,3022	-0,5060 0,1094	Igual	0,94
74	3,81			0,15	0,4050	-0,2563 0,5630	Igual	1,04
75	3,74			0,08	0,2974	-0,2168 0,3902	Igual	1,02

Tabela 32: Comparação de médias da resistência dos finger-joints C x M.

C		M		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
101	60,81	M	66,67	5,86	10,0930	-15,9500 4,2370	Igual	0,91
102	58,05			8,62	12,0514	-20,6700 3,4300	Igual	0,87
103	60,63			6,04	11,2228	-17,2600 5,1900	Igual	0,91
104	58,56			8,10	16,3760	-24,4800 8,2800	Igual	0,88
105	62,07			4,60	12,1728	-16,7700 7,5700	Igual	0,93
106	59,35			7,31	13,8866	-21,2000 6,5800	Igual	0,89
107	62,68			3,99	13,8722	-17,8600 9,8800	Igual	0,94
108	58,98			7,69	11,0622	-18,7500 3,3800	Igual	0,88
109	57,25			9,41	11,0282	-20,4400 1,6200	Igual	0,86

Na tabela 30, verifica-se que as médias dos corpos-de-prova **C** são iguais as médias dos corpos-de-prova **M** para 11 ensaios de resistência ao cisalhamento, superiores para 10, e inferiores para 4 tipos de ensaios. Entretanto, estes 4 resultados obtidos ainda podem ser considerados satisfatórios, considerando que as respectivas relações de médias são 0,82; 0,92; 0,90 e 0,89. Observa-se que estes valores foram obtidos para as pressões de colagem de 1,0 e 1,2 MPa, parecendo ser contraditórios aos resultados esperados fisicamente.

Nas tabela 31 e 32, referentes aos ensaios de resistência à tração normal e tração paralela, verifica-se que as médias dos corpos-de-prova **C** são iguais as médias dos corpos-de-prova **M**. Com esta análise, pode-se concluir que:

- Não ocorreu diferença significativa na resistência entre os corpos-de-prova colados e maciços, nos ensaios de tração normal e de tração paralela às fibras da madeira, para todas as combinações de pressão e viscosidade utilizadas.
- Para o ensaio de cisalhamento, a resistência dos corpos-de-prova colados foi igual ou superior à resistência dos corpos-de-prova maciços, para a maioria das combinações de pressão e viscosidade. Nas quatro situações em que isto não ocorreu,

os resultados obtidos possuem uma relação de médias entre colados e maciços superior a 0,82.

Do ponto de vista da produção, é mais conveniente se ter menor valor para a pressão de colagem, por se exigir menor pressão de colagem, e maior valor para o tempo de cura do adesivo, por permitir maior versatilidade para a montagem de peças com maiores dimensões.

Considerando estes aspectos, e em função dos resultados obtidos, recomenda-se a utilização de uma pressão de colagem igual a 0,8 MPa, para a laminação das vigas. Para a confecção das lâminas (finger joints), recomenda-se a utilização de uma pressão igual a 9 MPa. Quanto à viscosidade, recomenda-se a utilização do menor tempo estudado neste trabalho, isto é, 4 minutos, para a confecção das lâminas e para a laminação das vigas. Outro aspecto a salientar é o fato de poder se aplicar a pressão de colagem, mesmo decorrido um tempo após a aplicação do adesivo, sem que haja perda de resistência.

3.3.3 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA TC E MT

Foi feita comparação de médias entre os corpos-de-prova tratados colados (TC) e os corpos-de-prova maciços com tratamento (MT), com a finalidade de verificar a eficiência do adesivo na madeira tratada com CCA em relação à madeira tratada maciça com CCA. As tabelas 33 a 35 a seguir apresentam estas comparações. Para melhor visualização, as figuras 24 e 26 apresentam os gráficos "relação de médias x pressão de colagem" e "relação de médias x viscosidade", para o ensaio de cisalhamento.

Tabela 33: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento TC x MT.

TC		MT		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
26	9,16	MT	12,28	3,13	0,9286	-4,0554 -2,1946	Diferente	0,75
27	10,78			1,51	0,7770	-2,2825 -0,7275	Diferente	0,88
28	10,13			2,15	2,0341	-4,1890 -0,1210	Diferente	0,82
29	10,29			2,00	1,7596	-3,7590 -0,2410	Diferente	0,84
30	10,79			1,50	0,8917	-2,3898 -0,6069	Diferente	0,88
31	9,78			2,50	0,8013	-3,3022 -1,6978	Diferente	0,80
32	10,90			1,39	1,1904	-2,5774 -0,1960	Diferente	0,89
33	10,54			1,74	1,0411	-2,7824 -0,7076	Diferente	0,86
34	12,88			0,59	1,1620	-0,5679 1,7546	Igual	1,05
35	12,20			0,08	0,8523	-0,9365 0,7698	Igual	0,99
36	12,26			0,02	0,9456	-0,9685 0,9185	Igual	1,00
37	12,60			0,31	1,0746	-0,7612 1,3912	Igual	1,03
38	10,57			1,72	1,0576	-2,7735 -0,6565	Diferente	0,86
39	11,47			0,82	0,9202	-1,7372 0,1005	Igual	0,93
40	12,36			0,08	0,9242	-0,8455 1,0050	Igual	1,01
41	11,79			0,49	0,7089	-1,2006 0,2206	Igual	0,96
42	10,48			1,80	0,7563	-2,5592 -1,0474	Diferente	0,85
43	11,44			0,85	0,7643	-1,6118 -0,0815	Diferente	0,93
44	11,07			1,21	1,0452	-2,2553 -0,1614	Diferente	0,90
45	11,86			0,42	1,1838	-1,6054 0,7654	Igual	0,97
46	11,94			0,35	0,7425	-1,0905 0,3971	Igual	0,97
47	10,70			1,58	1,1179	-2,6980 -0,4587	Diferente	0,87
48	12,21			0,07	0,9541	-1,0282 0,8748	Igual	0,99
49	12,77			0,48	0,8477	-0,3654 1,3321	Igual	1,04
50	12,38			0,10	0,8356	-0,7382 0,9348	Igual	1,01

TC X MT **Figura 24** – Relação de médias (TCxMT) x Pressão de colagem - cisalhamento.

Figura 25 – Relação de médias (TCxMT) x Viscosidade- cisalhamento.

Tabela 34: Comparação de médias da resistência à tração normal TC x MT.

TC		MT		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado	
76	3,55	MT	3,64	0,09	0,5672	-0,6533 0,4833	Igual	0,98
77	3,18			0,46	0,5286	-0,9861 0,0695	Igual	0,87
78	3,67			0,03	0,6772	-0,6497 0,7063	Igual	1,01
79	3,29			0,36	0,5251	-0,8803 0,1669	Igual	0,90
80	3,61			0,03	0,5729	-0,6020 0,5420	Igual	0,99
81	3,64			0,00	0,6374	-0,6423 0,6289	Igual	1,00
82	3,10			0,55	0,6955	-1,2410 0,1510	Igual	0,85
83	3,64			0,00	0,5730	-0,5765 0,5698	Igual	1,00
84	3,39			0,25	0,5357	-0,7854 0,2921	Igual	0,93
85	3,46			0,18	0,6332	-0,8147 0,4481	Igual	0,95
86	2,86			0,78	0,7326	-1,5149 -0,0518	Diferente	0,79
87	3,81			0,17	0,6281	-0,4543 0,8010	Igual	1,05
88	3,81			0,17	0,5160	-0,3475 0,6808	Igual	1,05
89	3,61			0,03	0,6915	-0,7177 0,6611	Igual	0,99
90	3,74			0,10	0,5323	-0,4331 0,6298	Igual	1,03
91	3,61			0,03	0,6927	-0,7262 0,6596	Igual	0,99
92	3,75			0,10	0,5907	-0,4859 0,6959	Igual	1,03
93	3,72			0,08	0,5560	-0,4757 0,6390	Igual	1,02
94	3,64			0,00	0,5881	-0,5883 0,5850	Igual	1,00
95	3,52			0,13	0,5646	-0,6902 0,4368	Igual	0,97
96	3,38			0,26	0,5076	-0,7698 0,2398	Igual	0,93
97	3,67			0,03	0,5889	-0,5634 0,6134	Igual	1,01
98	3,61			0,03	0,5934	-0,6230 0,5630	Igual	0,99
99	3,71			0,07	0,5966	-0,5243 0,6643	Igual	1,02
100	3,57			0,07	0,5840	-0,6516 0,5150	Igual	0,98

Tabela 35: Comparação de médias da resistência dos finger-joints TC x MT.

TC		MT		Comparação de médias pelo método de Tukey				Relação de médias	
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado		
110	56,81	MT	65,43	8,62	11,8791	-20,5000	3,2600	Igual	0,87
111	59,73			5,71	6,4942	-12,2020	0,7820	Igual	0,91
112	60,56			4,87	9,4295	-14,2980	4,5610	Igual	0,93
113	59,55			5,89	10,6462	-16,5340	4,7570	Igual	0,91
114	61,23			4,20	10,0705	-14,2710	5,8680	Igual	0,94
115	57,53			7,90	9,2575	-17,1610	1,3550	Igual	0,88
116	60,06			5,37	8,2558	-13,6300	2,8830	Igual	0,92
117	61,22			4,22	10,5509	-14,7680	6,3340	Igual	0,94
118	53,51			11,93	5,5327	-17,4580	-6,3920	Diferente	0,82

Na tabela 33, verifica-se que as médias dos corpos-de-prova de **TC** são iguais às médias dos corpos-de-prova **MT** para 12 ensaios de cisalhamento, e inferiores para 12 ensaios. Entretanto, estes resultados obtidos ainda podem ser considerados satisfatórios.

Na tabela 35, verifica-se que as médias dos corpos-de-prova **TC** com as médias dos corpos-de-prova **MT** são iguais para 8 ensaios de resistência à tração paralela, e inferior para um ensaio, com relação de média igual a 0,82, resultado ainda satisfatório, pois a geometria da emenda dentada reduz a área líquida dos corpos-de-prova em aproximadamente 16%, conforme previsto na norma European Committee for Standardization – “*Finger jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements*” (1995). Assim, a resistência esperada para os corpos-de-prova colados é 84% da resistência dos corpos-de-prova maciços, considerando este aspecto. Outro fator a ser considerado na redução da resistência é a alta concentração de esforços na região dos “dentes” da emenda (MACEDO, 1998).

Na tabela 34, pode ser verificado que as médias dos corpos-de-prova **TC** comparadas com as médias dos corpos-de-prova **MT** são iguais para 24 ensaios de

resistência à tração normal, e inferior para um ensaio, com relação de média de 0,79.

Analisando-se os comentários feitos sobre as tabelas 33 a 35 pode-se concluir que:

- Não ocorreu diferença significativa na resistência entre os corpos-de-prova TC e os corpos-de-prova MT, nos ensaios de tração normal e de tração paralela às fibras da madeira, para as combinações de pressão e viscosidade utilizadas, exceto para os ensaios 86 e 118.
- Para o ensaio de cisalhamento, a resistência dos corpos-de-prova TC foi igual à resistência dos corpos-de-prova de MT. Nas demais situações que isto não ocorreu, os resultados obtidos possuem uma relação de médias entre TC e MT entre 0,75 e 0,93.

Considerando os aspectos apresentados no item 3.3.2 – “Comparação de médias entre corpos-de-prova **C** e **M**”, e em função dos resultados obtidos, recomenda-se a utilização de uma pressão de colagem igual a 1,6 MPa, para a laminação das vigas. Para a confecção das lâminas (finger joints), recomenda-se a utilização de uma pressão igual a 9 MPa. Quanto à viscosidade, recomenda-se a utilização do menor tempo estudado neste trabalho, isto é, 4 minutos, para a confecção das lâminas e para a laminação das vigas.

3.3.4 – COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE CORPOS-DE-PROVA **TC** E **C**

Foi feita a comparação de médias entre os corpos-de-prova tratados colados (TC) e os corpos-de-prova colados sem tratamento preservativo (C), com a finalidade de verificar a influência do tratamento preservativo na colagem. As tabelas 36 a 38 a seguir apresentam estas comparações. Para melhor visualização, as figuras 26 e 27

apresentam os gráficos "relação de médias x pressão de colagem" e "relação de médias x viscosidade", para o ensaio de cisalhamento.

Tabela 36: Comparação de médias da resistência ao cisalhamento TC x C.

TC		C		Comparação de médias pelo método de Tukey					Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado		
26	9,16	1	10,17	1,02	0,9962	-2,0113	-0,0187	Diferente	0,90
27	10,78	2	11,25	0,47	0,9342	-1,4030	0,4630	Igual	0,96
28	10,13	3	10,87	0,74	2,0437	-2,7830	1,2990	Igual	0,93
29	10,29	4	11,23	0,94	1,7217	-2,6660	0,7790	Igual	0,92
30	10,79	5	12,28	1,50	1,1493	-2,6455	-0,3478	Diferente	0,88
31	9,78	6	9,84	0,06	0,9436	-1,0002	0,8902	Igual	0,99
32	10,90	7	10,89	0,01	1,3339	-1,3240	1,3440	Igual	1,00
33	10,54	8	10,82	0,27	1,3519	-1,6260	1,0690	Igual	0,97
34	12,88	9	8,47	4,41	1,1876	3,2257	5,6010	Diferente	1,52
35	12,20	10	11,12	1,08	1,1360	-0,0543	2,2243	Igual	1,10
36	12,26	11	9,49	2,77	1,0311	1,7434	3,7999	Diferente	1,29
37	12,60	12	9,30	3,30	1,2892	2,0090	4,5910	Diferente	1,35
38	10,57	13	9,19	1,38	1,1376	0,2423	2,5177	Diferente	1,15
39	11,47	14	11,55	0,08	1,0507	-1,1302	0,9735	Igual	0,99
40	12,36	15	11,51	0,85	1,2246	-0,3709	2,0843	Igual	1,07
41	11,79	16	10,74	1,05	1,6744	-0,6200	2,7300	Igual	1,10
42	10,48	17	12,34	1,85	0,7111	-2,5656	-1,1411	Diferente	0,85
43	11,44	18	12,64	1,21	1,0690	-2,2755	-0,1378	Diferente	0,90
44	11,07	19	12,20	1,13	1,4050	-2,5320	0,2790	Igual	0,91
45	11,86	20	10,58	1,28	1,1229	0,1596	2,4137	Diferente	1,12
46	11,94	21	11,79	0,14	0,7526	-0,6099	0,8965	Igual	1,01
47	10,70	22	9,98	0,72	1,2320	-0,5090	1,9590	Igual	1,07
48	12,21	23	10,51	1,70	1,2292	0,4702	2,9231	Diferente	1,16
49	12,77	24	11,23	1,54	1,1762	0,3602	2,7132	Diferente	1,14
50	12,38	25	11,92	0,47	1,1921	-0,7262	1,6595	Igual	1,04

TC X C

Figura 26 – Relação de médias (TCxC) x Pressão de colagem - cisalhamento.

Figura 27 – Relação de médias (TCxC) x Viscosidade- cisalhamento.

Tabela 37: Comparação de médias da resistência à tração normal TC x C.

TC		C		Comparação de médias pelo método de Tukey					Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado		
76	3,55	51	3,61	0,06	0,3214	-0,3736 0,2669	Igual	0,98	
77	3,18	52	3,55	0,36	0,3274	-0,6921 -0,0379	Diferente	0,90	
78	3,67	53	3,64	0,03	0,5203	-0,4915 0,5549	Igual	1,01	
79	3,29	54	3,44	0,16	0,2397	-0,3979 0,0779	Igual	0,95	
80	3,61	55	3,57	0,04	0,4145	-0,3743 0,4509	Igual	1,01	
81	3,64	56	3,60	0,03	0,4505	-0,4155 0,4855	Igual	1,01	
82	3,10	57	3,61	0,51	0,5967	-1,1111 0,0844	Igual	0,86	
83	3,64	58	3,78	0,14	0,4945	-0,6340 0,3574	Igual	0,96	
84	3,39	59	3,80	0,41	0,2552	-0,6611 -0,1422	Diferente	0,89	
85	3,46	60	3,49	0,03	0,5644	-0,5992 0,5292	Igual	0,99	
86	2,86	61	3,63	0,77	0,6041	-1,3780 -0,1754	Diferente	0,79	
87	3,81	62	3,42	0,39	0,5317	-0,1401 0,9234	Igual	1,11	
88	3,81	63	3,59	0,22	0,3037	-0,0825 0,5225	Igual	1,06	
89	3,61	64	3,71	0,09	0,5227	-0,6166 0,4266	Igual	0,97	
90	3,74	65	3,73	0,01	0,3744	-0,3640 0,3874	Igual	1,00	
91	3,61	66	3,71	0,10	0,5581	-0,6588 0,4588	Igual	0,97	
92	3,75	67	3,60	0,15	0,5417	-0,3939 0,6906	Igual	1,04	
93	3,72	68	3,62	0,11	0,4304	-0,3247 0,5414	Igual	1,03	
94	3,64	69	3,79	0,14	0,4722	-0,6169 0,3235	Igual	0,96	
95	3,52	70	3,72	0,21	0,5778	-0,7857 0,3690	Igual	0,94	
96	3,38	71	3,58	0,21	0,4294	-0,6355 0,2221	Igual	0,94	
97	3,67	72	3,39	0,28	0,4980	-0,2217 0,7784	Igual	1,08	
98	3,61	73	3,46	0,16	0,3588	-0,2036 0,5136	Igual	1,04	
99	3,71	74	3,81	0,10	0,4522	-0,5476 0,3542	Igual	0,97	
100	3,57	75	3,74	0,17	0,3397	-0,5069 0,1703	Igual	0,96	

Tabela 38: Comparação de médias da resistência dos finger joints TC x C.

TC		C		Comparação de médias pelo método de Tukey					Relação de médias
Tipo de Ensaio	Y _m	Tipo de Ensaio	Y _m	Diferença média absoluta	DMS	Intervalo	Resultado		
110	56,81	101	60,81	4,00	11,1533	-15,1500	7,1600	Igual	0,93
111	59,73	102	58,05	1,68	8,2871	-6,6090	9,9620	Igual	1,03
112	60,56	103	60,63	0,06	9,8129	-9,8770	9,7470	Igual	1,00
113	59,55	104	58,56	0,98	16,2135	-15,2300	17,2000	Igual	1,02
114	61,23	105	62,07	0,84	11,4439	-12,2800	10,6000	Igual	0,99
115	57,53	106	59,35	1,82	12,6471	-14,4700	10,8300	Igual	0,97
116	60,06	107	62,68	2,62	11,9109	-14,5300	9,3000	Igual	0,96
117	61,22	108	58,98	2,24	10,7291	-8,4910	12,9650	Igual	1,04
118	53,51	109	57,25	3,75	5,8057	-9,5520	2,0590	Igual	0,93

Na tabela 36, verifica-se que as médias de resistência nos corpos-de-prova TC, do ensaio ao cisalhamento, são iguais ou superiores às médias de resistência dos corpos-de-prova C para maioria das combinações de pressão de colagem e viscosidade.

Observa-se, ainda, um aumento inesperado da relação de médias, para as pressões de colagem iguais a 1,0 MPa e 1,2 MPa, em comparação com as demais (ver figura 2.6). Conforme comentado anteriormente no item 3.3.2, as pressões de colagem iguais a 1,0 e 1,2 MPa tiveram resultados de resistência ao cisalhamento inferiores aos esperados, para os corpos-de-prova C. Isto motiva que, ao se comparar os corpos-de-prova TC e C, ocorre um aumento de relação de médias, para estes valores de pressão de colagem.

Na tabela 38, verifica-se que as médias de resistência do ensaio de tração paralela para os corpos-de-prova TC comparado com as médias dos corpos-de-prova C são iguais para todas as combinações de pressão de colagem e viscosidade.

Na tabela 37, verifica-se que as médias de resistência nos ensaios de tração normal dos corpos-de-prova TC com a média dos corpos-de-prova C são iguais para 22 combinações de pressão de colagem e viscosidade, e inferiores para 3

combinações. Entretanto, estas três combinações podem ser consideradas satisfatórias, pois suas respectivas relações de médias são: 0,90; 0,89 e 0,79.

Analisando-se os comentários feitos sobre as tabelas 36 a 38 pode-se concluir que:

- Não ocorreu diferença significativa na resistência entre os corpos-de-prova TC e C, para o ensaio de tração paralela às fibras da madeira, para as combinações de pressão de colagem e viscosidade utilizadas, indicando não haver influência significativa do tratamento preservativo, nesta resistência.
- Para o ensaio de tração normal, a resistência dos corpos-de-prova TC foi igual à resistência dos corpos-de-prova C, para a maioria das combinações de pressão de colagem e de viscosidade. Nas três situações que isto não ocorreu, os resultados obtidos possuem uma relação de médias entre TC e C superior a 0,79. Isto também indica que não ocorreu influência significativa do tratamento preservativo nesta resistência.
- Para o ensaio de cisalhamento, observa-se uma influência significativa para o tratamento preservativo em grande parte dos casos. Nota-se que, para a pressão de colagem igual a 1,6 MPa, ocorreram os melhores resultados para a resistência dos corpos-de-prova TC, em relação aos corpos-de-prova C. Isto pode ser explicada pelo fato dos poros serem impregnados com o preservativo CCA, dificultando a penetração do adesivo, sendo necessário aplicar uma pressão de colagem superior à aplicada na madeira sem tratamento.

4 – VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Este capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho estrutural de vigas de madeira laminada colada (MLC) fabricadas com o adesivo poliuretano à base de mamona, por intermédio de ensaios de flexão. Também foram confeccionadas vigas de MLC utilizando-se o adesivo comercial a base de resorcinol-formol para comparação. Salienta-se que esta avaliação do desempenho é apenas comparativa, entre o adesivo à base de mamona e o adesivo comercial.

Para o procedimento de colagem das vigas confeccionadas com o adesivo poliuretano à base de mamona utilizaram-se os parâmetros de colagem ideais obtidos para corpos-de-prova da espécie *Pinus*. Utilizaram-se duas espécies de madeira com densidades diferentes (*Pinus caribea* e *Eucaliptos grandis*). Para a espécie *Eucaliptos grandis* é importante ressaltar que deverão ser efetuadas pesquisas para a determinação de parâmetros de colagem ideais, considerando que estes podem ser diferentes dos obtidos para o *Pinus*, já que esta espécie de madeira possui uma densidade superior a espécie *Pinus caribea*, dificultando assim a penetração do adesivo poliuretano à base de mamona.

4.1 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1 - MADEIRA

Foram escolhidas duas espécies de madeira de reflorestamento: o *Pinus caribea hondurensis*, uma conífera, e o *Eucaliptus grandis*, uma folhosa. De acordo com as informações da "NBR 7190 -Projeto de Estruturas de Madeira", da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997), estas espécies se enquadram nas classes de resistência C-25 (coníferas) e C-30 (dicotiledôneas), respectivamente. A escolha dessas espécies foi devido à sua abundância na região Sul e Sudeste, e pela localização nestas regiões das indústrias que produzem MLC e por serem algumas das espécies das mais empregadas na construção de estruturas de MLC no Brasil.

Para a confecção das vigas de MLC, foram utilizadas lâminas com dimensões nominais iguais a 1,5 x 5,5 x 230 cm, com teor de umidade em torno de 12%.

Preliminarmente, as lâminas foram caracterizadas quanto à rigidez. O Anexo B apresenta o método de ensaio utilizado para a caracterização das lâminas. Os valores estão apresentados no item "4.1.3.1 - Configuração das vigas".

4.1.2 - ADESIVOS

Os adesivos utilizados foram a resina poliuretânica originária de óleo vegetal (*Ricinus communis*), constituída a partir de um poliól 25040 e um pré-polímero A249, já descrita no capítulo II no item "2.2 – Adesivo poliuretano à base de

mamona” deste trabalho, e o adesivo à base de resorcinol formaldeído, conhecido no país com o nome comercial de CASCOPHEN RS-216-M.

4.1.3 – MONTAGEM DAS VIGAS

4.1.3.1 – CONFIGURAÇÃO DAS VIGAS

Foram confeccionadas 12 vigas retas de madeira laminada colada, sendo seis confeccionadas com a espécie *Eucaliptus Grandis* e outras seis com a espécie *Pinus caribea var. hondurensis*.

Para cada espécie, foram confeccionadas três vigas com dimensões iguais a 5,5x15x230 cm (10 lâminas de 1,5 x 5,5 cm) e três vigas com dimensões iguais a 5,5x10,5x230 cm (7 lâminas de 1,5 x 5,5 cm). Duas das vigas de mesma dimensões foram feitas com o adesivo à base de mamona, sendo a outra feita com o adesivo a base de resorcinol formaldeído.

As vigas de MLC foram confeccionadas com as lâminas de módulo de elasticidade mais elevados posicionadas nas extremidades da seção transversal da viga, sendo as de menor módulo dispostas no centro.

As tabelas 39 a 42 mostram as propriedades das lâminas utilizadas em cada viga. A ordem de apresentação da lâmina corresponde à ordem de disposição na seção transversal da viga.

Tabela 39: *Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Pinus" (5x15x230cm).*

Número da viga	Número das lâminas	Base b (mm)	Altura h (mm)	E (MPa)
1	1	53,6	13,7	1362,3
	2	52,7	13,9	1002,7
	3	53,4	14,0	958,1
	4	53,3	13,8	805,8
	5	52,5	14,1	774,4
	6	54,3	13,7	798,2
	7	50,4	13,7	809,5
	8	52,8	14,1	974,9
	9	53,1	13,6	1010,0
	10	53,0	13,7	1370,4
2	11	52,4	13,6	1321,4
	12	54,1	14,0	1014,9
	13	52,0	13,7	957,3
	14	53,4	13,7	809,8
	15	53,2	13,9	705,4
	16	52,3	14,0	752,0
	17	53,8	13,9	812,9
	18	52,3	13,6	957,7
	19	53,5	14,3	1019,7
	20	52,4	13,5	1350,4
3	21	53,1	13,8	1252,4
	22	53,4	14,1	1035,5
	23	53,8	13,6	952,0
	24	54,0	13,6	813,3
	25	49,6	14,1	681,3
	26	52,7	13,9	685,4
	27	50,6	13,8	825,4
	28	53,1	14,0	952,4
	29	53,5	13,8	1061,5
	30	53,1	13,6	1315,0

Tabela 40: *Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Pinus" (5x10,5x230cm).*

Número da viga	Número das lâminas	Base b (mm)	Altura h (mm)	E (MPa)
4	31	54,4	13,9	1083,2
	32	51,8	13,8	931,6
	33	53,1	14,0	827,3
	34	52,4	13,4	672,4
	35	53,7	14,0	864,0
	36	52,5	13,6	945,5
	37	53,7	13,8	1177,8
5	38	53,9	14,0	1214,0
	39	53,6	14,0	929,2
	40	53,2	13,9	864,3
	41	53,2	14,1	657,4
	42	53,6	13,8	867,9
	43	53,9	13,7	931,3
	44	53,5	14,1	1214,6
6	45	51,0	13,9	1216,7
	46	53,7	14,1	906,0
	47	53,8	14,2	870,8
	48	53,1	14,1	649,5
	49	50,6	13,7	884,3
	50	53,8	13,9	915,5
	51	53,7	13,9	1223,0

Tabela 41: *Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Eucaliptus" (5x15x230cm).*

Número da viga	Número das lâminas	Base b (mm)	Altura h (mm)	E (MPa)
7	52	59,8	15,0	2653,4
	53	59,4	12,5	2161,3
	54	57,3	14,7	2151,4
	55	59,0	12,5	1625,9
	56	59,6	15,0	1603,4
	57	57,5	12,5	1619,2
	58	57,5	14,9	1635,3
	59	58,7	12,4	2152,0
	60	60,6	12,5	2163,1
	61	60,0	14,8	2796,7
	62	58,7	14,8	2615,0
8	63	58,5	14,8	2167,1
	64	59,4	14,8	2098,7
	65	59,3	12,5	1716,8
	66	59,4	12,7	1517,4
	67	59,4	15,3	1568,7
	68	58,7	14,9	1726,4
	69	56,4	15,3	2130,8
	70	57,9	15,0	2180,3
	71	58,4	14,0	2624,5
	72	58,3	14,9	2548,4
9	73	58,5	14,2	2205,4
	74	58,1	15,0	2028,4
	75	58,7	15,0	1730,7
	76	61,6	11,1	1482,4
	77	55,1	11,7	1882,5
	78	57,4	13,1	1735,9
	79	57,5	14,5	2042,0
	80	58,5	14,5	2214,7
	81	57,3	14,9	2605,0

Tabela 42: *Propriedades das lâminas utilizadas - vigas de "Eucaliptus" (5x10,5x230cm)*

Número da viga	Número das lâminas	Base b (mm)	Altura h (mm)	E (MPa)
10	82	56,3	15,1	2216,0
	83	57,7	15,0	1947,2
	84	59,4	14,9	1750,0
	85	59,6	12,7	1450,3
	86	58,0	15,3	1765,9
	87	59,3	12,5	2009,5
	88	57,8	15,1	2244,1
	89	58,7	15,0	2244,3
11	90	58,2	12,4	1861,4
	91	59,6	15,0	1768,4
	92	59,9	11,2	1359,7
	93	59,0	15,0	1780,8
	94	60,2	15,0	1932,6
	95	58,9	14,9	2253,6
	96	58,0	15,1	2261,5
12	97	58,5	12,4	1846,3
	98	56,6	12,8	1789,1
	99	60,9	15,3	1268,2
	100	58,3	14,9	1824,2
	101	59,5	14,9	1853,0
	102	58,0	15,2	2273,9

4.1.3.2 - PROCEDIMENTO DE COLAGEM DAS VIGAS

Para a confecção das vigas foram adotados alguns procedimentos importantes quanto à seleção da madeira e processamento como: classificação visual da madeira, processamento das peças por intermédio de ferramentas perfeitamente afiadas e sem defeitos, obtendo-se superfícies planas e perpendiculares entre si. Este procedimento inicial garantiu uma colagem eficiente, reduzindo-se as imperfeições nas superfícies a serem coladas.

A aplicação do CASCOPHEN foi realizada seguindo-se as recomendações do produto para aplicação manual.

A aplicação do adesivo poliuretano à base de mamona foi feita seguindo-se as recomendações apresentadas no item “3.1.4.4 – Processo de colagem dos corpos-de-prova”. Para facilitar a aplicação utilizou-se uma embalagem de adesivo por lâmina. O tempo de aplicação do adesivo em cada lâmina foi de um minuto e meio aproximadamente.

As vigas com 7 lâminas foram confeccionadas aproximadamente em 20 minutos e cerca de 25 minutos para as vigas compostas de 10 lâminas.

Foi utilizada pressão de colagem igual a 0,8 MPa, aplicada por intermédio de placas de aço, parafusos e porcas, e controlada com o auxílio de um torquímetro pré-calibrado.

Esta pressão foi aplicada por um tempo de 12 horas para as vigas coladas com o adesivo resorcinol formaldeído, e igual a 24 horas para as vigas coladas com o adesivo à base de mamona. Depois disto, às vigas foram retiradas da pressão e aplainadas lateralmente. A figura 24 mostra o esquema de aplicação da pressão de colagem.

Para a aplicação dos ciclos de carregamento previstos na NBR 7190/97, devido à impossibilidade de se obter o valor da força de ruptura previamente, foi adotado como valor correspondente ao patamar superior deste ciclo, a força que causasse deslocamento vertical no centro do vão igual a 0,7cm (correspondente ao valor do vão da viga dividido por 300).

Foram medidos os deslocamentos por meio de relógios comparadores com sensibilidade de centésimo de milímetro, nos pontos indicados na figura 23. Os relógios colocados nos apoios permitem medir possíveis esmagamentos. No último ciclo de carregamento, após a retirada dos relógios, as vigas foram levadas à ruptura.

4.2 - RESULTADOS OBTIDOS

Com a finalidade de ilustrar o procedimento utilizado na análise para determinação do EI_{exp} um exemplo da leitura de deslocamentos verticais é apresentado na tabela 43.

Tabela 43: Exemplo dos resultados de leitura de deslocamentos verticais na viga 1.

Ponto do ciclo	Carregamento Carga (kN)	Leitura de deslocamentos verticais				
		Relógio 1 0,01 mm	Relógio 2 0,01 mm	Relógio 3 0,01 mm	Relógio 4 0,01 mm	Relógio 5 0,01 mm
1	0,85	5	137	160	135	0
5	4,27	8	643	735	654	22
15	4,27	8	648	737	658	22
21	0,85	11	155	170	185	22
31	0,85	10	148	167	181	22
45	4,27	11	641	735	653	23
55	4,27	11	647	737	659	22
61	0,85	11	157	172	158	22
71	0,85	11	149	170	155	22
72	1,71	12	282	324	286	22
73	2,56	12	401	460	408	22
74	3,42	12	524	600	532	22
75	4,27	12	645	740	656	22
76	5,13	12	765	875	776	22
77	5,98	12	880	1010	900	22

Os relógios 1 e 5 foram utilizados para medir os deslocamentos verticais nos apoios para corrigir as leituras dos relógios 2, 3 e 4, considerando como posição sem deformação da viga a linha reta que une a posição deslocada nos apoios. A tabela 43 ilustra um exemplo da leitura de deslocamentos verticais corrigidos. Utilizou-se o último ciclo de carregamento para calcular a regressão linear da relação Força x Deslocamento de acordo com a tabela 44.

Tabela 44: *Valores corrigidos dos deslocamentos verticais na viga 1.*

Ponto do ciclo	Força (kN)	Relógio 2 cm	Relógio 3 cm	Relógio 4 cm
71	0,85	0,13	0,15	0,14
72	1,71	0,27	0,31	0,27
73	2,56	0,39	0,44	0,39
74	3,42	0,51	0,58	0,51
75	4,27	0,63	0,72	0,64
76	5,13	0,75	0,86	0,76
77	5,98	0,86	0,99	0,88

De posse dos valores de força aplicada e o correspondente deslocamento vertical no meio do vão, foram determinados os módulos de elasticidade a flexão EI_{exp} de vigas bi-apoiadas, de acordo com a seguinte equação:

$$EI_{exp} = \frac{23 \cdot k \cdot L^3}{1296}$$

1

Sendo "L" o vão e "k" o valor do coeficiente angular da reta obtido pela Regressão Linear da relação Força x Deslocamento obtida experimentalmente no último ciclo de carregamento.

Com a finalidade de ilustrar o procedimento utilizado para determinação do EI_{exp} (Relógio 3), apresenta-se na tabela 45 um exemplo dos valores do R^2 , do erro padrão, de k, obtidos na análise de regressão linear. As leituras dos deslocamentos nos pontos 2 e 4 foram utilizadas apenas para controle do ensaio, obtendo-se os

valores de EI a partir destas leituras, para comparação. Estes valores, que não estão apresentados, não diferiram entre si de maneira significativa.

Tabela 45: Cálculo do EI efetivo da viga 1 de *Pinus caribea* var. *hondurensis*.

Viga 1	Resultados da regressão			
	R ²	Erro padrão	Coef. k	EI (kN.cm ²)
	0,998	0,072	5,937	1121847

Os resultados experimentais das forças de ruptura (F_r) e dos momentos de ruptura (M_r) obtidos nos ensaios de flexão realizados nas vigas confeccionadas são apresentados na tabela 46.

Tabela 46: Valores obtidos para as cargas de ruptura das vigas (kN) e momento de ruptura (kN.m).

Viga	Dimensão (cm)	Espécie	Adesivo	F_r (kN)	M_r (kN.m)	EI_{exp} (kN.cm ²)
1	(4,81x13,86x230)	Pinus	Cascophen	27,60	10,12	1.121.847
2	(4,73x13,70x230)	Pinus	Mamona	24,90	9,13	1.144.379
3	(4,83x13,68x230)	Pinus	Mamona	20,70	7,59	1.152.353
4	(4,92x9,65x230)	Pinus	Cascophen	10,30	3,78	353.560
5	(4,73x9,92x230)	Pinus	Mamona	12,70	4,66	413.155
6	(4,67x9,91x230)	Pinus	Mamona	12,70	4,66	407.865
7	(5,33x13,77x230)	Eucalyptus	Cascophen	47,20	17,31	2.348.687
8	(5,46x14,55x230)	Eucalyptus	Mamona	55,70	20,42	2.883.513
9	(5,51x13,65x230)	Eucalyptus	Mamona	50,90	18,66	2.280.682
10	(5,32x9,85x230)	Eucalyptus	Cascophen	20,70	7,59	775.624
11	(5,49x9,92x230)	Eucalyptus	Mamona	20,20	7,41	845.774
12	(5,55x10,07x230)	Eucalyptus	Mamona	23,90	8,76	891.854

As formas de ruptura das vigas são apresentadas nas figuras 26 a 29.

Figura 26 - Forma de ruptura das vigas de *Pinus Caribea* var. *Hondurenses*.

Figura 27 – Detalhe da ruptura das vigas de *Pinus Caribea* var. *Hondurenses*.

Figura 28 - Forma de ruptura das vigas de *Eucaliptus Grandis*.

Figura 29 - Detalhe de ruptura das vigas de *Eucaliptus Grandis*.

4.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item apresenta-se os cálculos dos valores teóricos da rigidez à flexão, que foram utilizados para verificar a eficiência da laminação, que pode ser entendida como a relação entre a rigidez experimental (EI_{exp}) e a rigidez teórica (EI_{teo}). Também será apresentada uma análise do comportamento estrutural e do processo de montagem das vigas laminadas.

4.3.1 - DETERMINAÇÃO DO VALOR TEÓRICO DA RIGIDEZ À FLEXÃO (EI_{teo})

A determinação EI_{teo} das vigas foi realizada com base nos valores de módulo de elasticidade, altura e posicionamento das lâminas nas vigas, já que a largura da seção transversal é constante. Seja uma viga genérica, como a mostrada na figura 30.

Figura 30 - Seção transversal genérica de uma viga em MLC.

Cada uma das lâminas possui um valor de altura h_i e de módulo de elasticidade E_i , obtido na fase de caracterização dos materiais. A largura b é

constante, pois a viga foi desgrossada após a colagem.

Foi utilizado o método da seção transformada para o cálculo da rigidez, considerando o módulo de elasticidade de cada lâmina (E_i). Para a homogeneização do material da seção transformada, foi utilizado o valor médio do módulo de elasticidade das lâminas da viga (E_m). Assim, a largura equivalente de cada lâmina ($b_{eq,i}$), é determinada pela equação 2:

$$b_{eq,i} = \frac{E_i}{E_m} \cdot b \quad 2$$

O valor teórico da rigidez à flexão (EI_{teo}) da viga é calculado a partir da seção transformada, como indicado na equação 5.

$$E \cdot I_{teo} = E_m \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_{eq,i} \cdot h_i^3}{12} + b_{eq,i} \cdot h_i \cdot y_i^2 \right) \quad 3$$

Sendo y_i a distância do centro de gravidade da lâmina até o centro de gravidade da seção.

Com a finalidade de ilustrar o cálculo dos valores de EI_{teo} , um exemplo é apresentado na tabela 47:

Tabela 47: Cálculo do EI_{teo} da viga 1 de *Pinus Hondurenses*.

Número da viga	Número da lâmina	b (mm)	h (mm)	E_i (kN/cm ²)	$b_{eq,i}$ (mm)	Y (cm)	I_r (cm ⁴)	EI (kN.cm ²)
1	1	48,12	13,71	1362	66,44	0,69	354,25	349.517
	2	48,12	13,94	1003	48,90	2,07	160,86	158.710
	3	48,12	13,97	958	46,73	3,46	78,56	77.506
	4	48,12	13,75	806	39,30	4,85	23,77	23.455
	5	48,12	14,11	774	37,77	6,24	3,25	3.208
	6	48,12	13,67	798	38,93	7,63	3,61	3.558
	7	48,12	13,68	809	39,48	9,00	24,43	24.108
	8	48,12	14,06	975	47,55	10,39	81,93	80.831
	9	48,12	13,63	1010	49,26	11,77	159,72	157.582
	10	48,12	13,66	1370	66,84	13,14	355,33	350.577
		E_m		987		EI_{teo}		1.229.053

A tabela 48 apresenta os valores de E_m , EI_{teo} e seus respectivos valores de EI_{exp} das vigas.

Tabela 48: Valores teóricos e experimentais de rigidez à flexão de todas as vigas ensaiadas.

Viga	Dimensão (cm)	Espécie	Adesivo	$E_m(kN.cm^2)$	$EI_{teo}(kN.cm^2)$	$EI_{exp}(kN.cm^2)$
1	(4,81x13,86x230)	Pinus	Cascophen	987	1.229.053	1.121.847
2	(4,73x13,70x230)	Pinus	Mamona	970	1.194.839	1.144.379
3	(4,83x13,68x230)	Pinus	Mamona	957	1.208.571	1.152.353
4	(4,92x9,65x230)	Pinus	Cascophen	929	378.723	353.560
5	(4,73x9,92x230)	Pinus	Mamona	954	407.084	413.155
6	(4,67x9,91x230)	Pinus	Mamona	952	400.838	407.865
7	(5,33x13,77x230)	Eucalyptus	Cascophen	2056	2.754.262	2.348.687
8	(5,46x14,55x230)	Eucalyptus	Mamona	2035	3.206.107	2.883.513
9	(5,51x13,65x230)	Eucalyptus	Mamona	2047	2.757.487	2.280.682
10	(5,32x9,85x230)	Eucalyptus	Cascophen	1912	956.632	775.624
11	(5,49x9,92x230)	Eucalyptus	Mamona	1886	927.944	845.774
12	(5,55x10,07x230)	Eucalyptus	Mamona	1874	994.012	891.854

4.3.2 - EFICIÊNCIA DA LAMINAÇÃO DAS VIGAS

A eficiência da laminação pode ser entendida como a relação entre a rigidez experimental e a rigidez teórica. Assim, a eficiência $\eta(\%)$ é obtida por:

$$\eta(\%) = 100 \cdot \frac{EI_{exp}}{EI_{teo}} \quad 4$$

A tabela 49 e 50 indicam os valores de eficiência obtidos para as vigas do estudo.

Tabela 49: Valores de eficiência das vigas da espécie *Pinus Caribea*

Viga	1	2	3	4	5	6
Adesivo	Cascophen	Mamona	Mamona	Cascophen	Mamona	Mamona
Relação vão/altura	16,9	16,0	16,1	22,8	22,2	22,2
$EI_{exp} (kN.cm^2)$	1.121.847	1.144.379	1.152.353	353.560	413.155	407.865
$EI_{teo} (kN.cm^2)$	1.229.053	1.194.839	1.208.571	378.723	407.084	400.838
$\eta (\%)$	91,3	95,8	95,3	93,4	101,5	101,8

Tabela 50: Valores de eficiência das vigas da espécie *Eucalyptus grandis*.

Viga	7	8	9	10	11	12
Adesivo	Cascophen	Mamona	Mamona	Cascophen	Mamona	Mamona
Relação vão/altura	16,0	15,1	16,1	22,3	22,2	21,8
EI_{exp} (kN.cm ²)	2.348.687	2.883.513	2.280.682	775.624	845.774	891.854
EI_{teo} (kN.cm ²)	2.754.262	3.206.107	2.757.487	956.637	927.944	994.011
η (%)	85,3	89,9	82,7	81,1	91,1	89,7

Para todas as vigas não se considerou o efeito da cortante no cálculo do módulo de elasticidade experimental. A NBR 7190/97 considera-se que o efeito do esforço cortante nas deformações verticais em vigas não é significativo para relação vão/altura superior a 21. Assim, a menor eficiência observada para as vigas com menor relação vão/altura pode ser creditada a este motivo. Por este motivo, a comparação foi feita entre vigas com mesma relação vão/altura.

Na tabela 49, observa-se que as vigas de *Pinus Caribea* confeccionadas com o adesivo poliuretano à base de mamona, obtiveram eficiência superior às vigas confeccionadas com o adesivo Cascophen, comparando vigas com a mesma relação vão/altura.

Algumas vigas de *Pinus Caribea* confeccionadas com o adesivo poliuretano à base de mamona obtiveram eficiência superior à 100%. Isto pode ser creditado ao aspecto salientado por HENRIQUES DE JESUS (2000), que obteve relações entre a resistência dos corpos-de-prova colados e maciços maiores que 100%. Segundo este autor, pode-se entender que isto evidencia uma melhora das características de resistência da madeira nas regiões onde ocorre penetração do adesivo, aumentando assim a resistência final da peça.

Para as vigas da espécie *Eucalyptus Grandis*, se observou uma eficiência inferior, pelo fato da mesma ser mais densa que a espécie *Pinus Caribea*, o que dificulta a adesão. Porém, verifica-se que as vigas de mesma relação vão/altura

confeccionadas com o adesivo de mamona apresentam eficiência superior as vigas de mesma relação vão/altura coladas com o adesivo Cascophen. Observa-se também que a viga 10 (colada com Cascophen) apresentou eficiência inferior à esperada, comparando-se com os resultados obtidos nas outras vigas.

Quanto à forma de ruptura observada nas vigas, basicamente evidencia-se a falha do elemento estrutural devido às tensões normais geradas na flexão. A ruptura por cisalhamento foi observada após a ocorrência da ruptura devido às tensões normais, como propagação da ruptura. Isto evidencia um comportamento adequado do adesivo.

Apenas em poucos casos esta forma de ruptura por cisalhamento ocorreu na linha da cola. Na grande maioria das vezes a ruptura se propagou por cisalhamento da madeira. Não se evidenciou trecho significativo de fragilidade (ruptura) na linha de cola, separando a viga, para nenhum dos dois adesivos.

O adesivo poliuretano à base de mamona apresentou características de viscosidade e de vida útil satisfatórias para a execução da colagem das vigas retas confeccionadas. Observou-se que o adesivo apresentou 33 minutos de vida útil após a mistura.

Sua viscosidade é similar ao adesivo comercial à base de resorcinol formaldeído, podendo ser distribuída sobre a superfície a ser colada com facilidade. A utilização de espátulas neste processo se mostrou adequado. Recomenda-se, para a preparação e aplicação do adesivo sobre a superfície de colagem, o procedimento utilizado na pesquisa.

Quanto à confecção das vigas, pode-se afirmar que só foi possível executá-las durante a vida útil do adesivo, devido aos procedimentos de aplicação do adesivo e planejamento da colagem utilizados neste trabalho.

Apesar de ser viável a utilização do adesivo de mamona seguindo estes procedimentos, deve-se comentar que o processo de colagem é mais complexo do que o adesivo a base de resorcinol formaldeído, devido principalmente ao menor tempo de montagem disponível para o adesivo em estudo.

O sistema de aplicação de pressão utilizado na confecção das vigas desta pesquisa foi satisfatório. Entretanto, não é adequado para a fabricação em processo industrial. Acredita-se porém que, sob este aspecto, o sistema usualmente utilizado para outros adesivos seja adequado para o adesivo de mamona, uma vez que o tempo e a pressão de colagem são similares aos valores utilizados para os mesmos.

5 - CONCLUSÕES FINAIS

No decorrer deste trabalho são apresentadas diversas conclusões. A seguir, estão apresentadas as principais, relacionadas à obtenção de parâmetros de colagem adequados para a nova variação do adesivo à base de mamona, e à confecção de vigas laminadas utilizando este adesivo.

Com relação aos parâmetros de colagem, observou-se que a nova variação de adesivo poliuretano à base de mamona, composto pelo poliol 25040 e pré-polímero A249, apresentou resultados satisfatório em termos de resistência, tanto na madeira sem tratamento preservativo, quanto na madeira tratada com o preservativo CCA, nos ensaios de tração paralela às fibras, de tração normal às fibras e de cisalhamento.

Para a madeira sem tratamento, recomenda-se a utilização de uma pressão de colagem igual a 9 MPa, para a confecção das lâminas (finger-joint). Para laminação das vigas, recomenda-se à utilização de uma pressão igual a 0,8 MPa. Quanto à viscosidade, recomenda-se a utilização do menor tempo estudado neste trabalho, isto é, 4 minutos, para a confecção das lâminas e para a laminação das vigas. É importante salientar, que se pode aplicar a pressão de colagem, mesmo decorrido um tempo após a aplicação do adesivo, sem que haja perda de resistência.

Para a madeira com tratamento, recomenda-se a utilização de uma pressão de colagem igual a 9 MPa, para a confecção da lâminas (finger-joint). Para laminação das vigas, recomenda-se à utilização de uma pressão igual a ~~1,8~~ MPa. Quanto à

~~1,8~~
1,6 MPa.

viscosidade, recomenda-se a mesma utilizada para madeira sem tratamento.

Outro aspecto que pode ser observado para a madeira tratada, quando compara-se corpos-de-prova CxM do ensaio de cisalhamento, observa-se uma influência significativa para o tratamento preservativo em grande parte dos casos. Nota-se que, para a pressão de colagem igual a 1,6 MPa, ocorreram os melhores resultados para a resistência dos corpos-de-prova TC, em relação aos corpos-de-prova C. Isto pode ser explicada pelo fato dos poros serem impregnados com o preservativo CCA, dificultando a penetração do adesivo, sendo necessário aplicar uma pressão de colagem superior à aplicada na madeira sem tratamento.

Outro aspecto que pode ser salientado é com relação à influência do tratamento preservativo nas propriedades de resistência analisadas, para a madeira maciça. Não existiu influência significativa do tratamento preservativo na resistência à tração normal e à tração paralela às fibras da madeira. Para o caso da resistência ao cisalhamento, observou-se valores superiores para os corpos-de-prova tratados em relação aos corpos-de-prova sem tratamento.

Quanto à confecção das vigas, a nova variação de adesivo poliuretano à base de mamona, composto pelo poliol 25040 e pré-polímero A249, mostrou-se bem mais adequada para a execução da colagem, quando comparada ao adesivo utilizado na pesquisa de HENRIQUES DE JESUS (2000), por apresentar maior tempo de utilização. Sua viscosidade é similar ao adesivo à base de resorcinol formaldeído, podendo ser distribuída sobre a superfície a ser colada, com facilidade.

A execução da colagem de vigas utilizando o adesivo de mamona apresenta maior quantidade de detalhes a serem seguidos, quando comparada ao adesivo Cascophen.

Quanto à rigidez à flexão, as vigas de *Pinus Caribea* confeccionadas com o

adesivo o poliuretano à base de mamona, obtiveram eficiência superior às vigas confeccionadas com o adesivo Cascophen, comparando vigas com a mesma relação vão/altura. Em algumas vigas, confeccionadas com o adesivo poliuretano, verificou-se que ocorreu uma melhora das características de rigidez, provavelmente devido à penetração do adesivo, aumentando assim a rigidez individual de cada lâmina.

Quanto à forma de ruptura observada nas vigas, basicamente evidencia-se a falha do elemento estrutural devido às tensões normais geradas na flexão. A ruptura por cisalhamento foi observada após a ocorrência da ruptura devido às tensões normais, como propagação da ruptura. Isto evidencia um comportamento adequado do adesivo.

Apenas em poucos casos esta forma de ruptura por cisalhamento ocorreu na linha da cola. Na grande maioria das vezes a ruptura se propagou por cisalhamento da madeira. Não se evidenciou trecho significativo de fragilidade (ruptura) na linha de cola, separando a viga, para nenhum dos dois adesivos.

Como conclusão final, pode-se afirmar pela viabilidade de utilização da variação do adesivo à base de mamona, na fabricação de vigas de madeira laminadas coladas, em termos de desempenho estrutural.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION (1987), "*Ckecking in glued laminated timber*". AITC - American Institute of Timber Construction - Technical note 11.

ARAÚJO, L.C.R. (1992). "*Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos*". São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, L.C.R. (1998). "*Contribuição ao estudo dos poliuretanos flexíveis derivados de óleo de mamona determinando suas propriedades físicas e químicas*". São Carlos-SP. Tese de Doutorado, 103p. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

ASTM D198-84. (1984). "*Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes*". American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA.

AWPA. (1994). "*The AWPA Book of Standards*". American Wood Preservers' Association, Woodstock, MD.

BARISKA, M., PIZZI, A., CONRADIE, W.R. (1988). "*Structural weakening of CCA-treated timber*". *Holzforschung* 42(5): 339-345.

BOLETIM TÉCNICO CASCOPHEN,(2000). "*Adesivo à base de resorcinol-formol, para cura à temperatura ambiente, especialmente indicado para colagens de madeira à prova d'água*". São Paulo. Alba Química Indústria e Comércio Ltda.

- BURMEISTER, A. (1970). "*Long-term effect of wood preservatives on physical and mechanical wood properties*". Holz als Roh and Werkstoff, Ger., 28(12): 478-485.
- CAVALVANTE, M.S. (1983). "*Implantação e desenvolvimento da preservação de madeira no Brasil*". São Paulo, IPT, Divisão de Madeiras (Pesquisa & Desenvolvimento, n.14).
- CLARO NETO, S. (1997). "*Caracterização físico-química de um poliuretano derivado do óleo de mamona utilizado para implantes ósseos*". São Carlos-SP. Tese de Doutorado, 127p. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1995). "*Finger jointed structural timber CEN-EN 385 – Performance requirements and minimum production requirements*". Bruxelas. 17p.
- HENRIQUES DE JESUS, J.M. (2000). "*Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)*". São Carlos-SP. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- HOUWINK, R., SALOMON, G. (1965). "Adhesion and Adhesives". Amsterdam. Elsevier, V.1 Adhesives.
- KIM, G.H. (1991). "*The effects of drying schedules on the bending properties of lodgepole pine dimension lumber treated with CCA*". Mokchae Konghak 19(2): 65-71.

- KOLLMANN, F. (1975). *"Principles of wood seances and technology"*. Berlin, Springer Verlag, V.2, Wood based materials.
- LE BUA COURRIER DU BOIS (1987). *"Le bois lamelle-colle"*. Realisations spectaculaires en bois lamelle-colle. Bruxelles, Belgique n^o 77, p.21-23.
- LEE, A.W.C. (1985). *"Effect of CCA-treating and air-drying on the properties of South Pine lumber and plywood"*. Wood Fiber Sci. 17(2): 209-213.
- LEPAGE, E.S. et al. (1986). *"Manual de preservação de madeiras"*. São Paulo, IPT, v.1 . p.305-314; v.2. p.463-470.
- MACEDO, A.N. (1996). *"Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada: calibração de método de ensaio"*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 113p.
- MANTILLA CARRASCO, E.V. (1984). *"Ligações estruturais de madeira por adesivos"*. São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado, 2v - 221p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MANTILLA CARRASCO, E.V. (1989). *"Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de Madeira Laminada Colada (MLC)"*. São Carlos-SP. Tese de Doutorado, 348p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MARTÍNEZ, E.M. (2001). *"Desenvolvimento de um modelo estatístico para aplicação no estudo de fadiga em emendas dentadas de madeira".)*. Tese de Doutorado. Instituto de Física e Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP. Universidade de São Paulo.

MARTINS FERREIRA, C.E., MANTILLA CARRASCO, E.V., HELMEISTER, J.C. (1989). "*Tecnologia de adesivos poliuretanos: propriedades e aplicações em madeira*". In: **Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira**, 6, Anais. São Carlos, USP/EESC - EBRAMEM, v.6, p.39-75.

MINITABDEMO (2002). "Statistical and graphical analysis software package" www.minitab.com, V13, United States.

NATTERER, J (1991), "*Quality criteria for timber design*". United Kingdom, sep/1991. International Timber Engineering Conference London. Proceedings. Vol2: 19-26.

NBR 12803 (1993) "*Dormentes de madeira preservada*". Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro.

NBR 6229 (1980). "*Postes de Eucalipto preservados sob pressão*". Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro.

NBR 7190 (1997). "*Projeto de Estruturas de Madeira*". Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro.

NBR 9480, EB 474 (1986). "*Moirões de madeira preservada para cercas*". Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, J. T.; FREITAS, A. R. (1995), "*Painéis à base de madeira*" São Paulo, Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP.

OLMOS, M.A.C. (1992). *“Equipamento e processo de fabricação de chapas aglomeradas a partir de resíduos de madeira”*. São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

OSMOSE, (2001). *“Preservativo de ação fungicida e inseticida”*. São Paulo. Boletim Técnico Osmose k-33 c Montana Química S.A.

PINHEIRO, R.V. (2001). *“Influência da preservação contra a demanda biológica nas propriedades de resistência e de elasticidade da madeira”*. São Carlos-SP. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

PLEPIS, A. M. G., (1991) *“Caracterização térmica e Viscoelástica de Resinas Poliuretanas Derivadas de Óleo de Mamona”*, São Carlos. Tese de Doutorado – Instituto de Física e Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

ROCCO, F. A.; SALES, A. (1998). *“Materiais Derivados de Madeira: Processos e aplicações”*. Notas de Aula, segundo semestre. LaMEM – EESC/IQSC/IFSC – USP.

SKEIST, I.,(1990). *“Handbook of adhesives”*. New York 3ed.. Van Nostrand Reinhold p.598-610.

STRICKLER, M. D. (1997). *“Impression finger jointing of lumber. Research Report n 62/15-104 Institute of Technology, Washington State University.*

VICK, C.B. Bonding Wood and Wood Products IN: *“Wood Handbook: Wood as an Engineering Material”*, Washington, 1999. Forest Products Laboratory USDA/FS. Cap.9.

WINANDY, J.E. (1988). "Effects of treatment and redrying on the mechanical properties of wood". IN: Wood protection techniques and the use of treated wood in construction. M. Hamel ed. Forest Products Research Society Madison WI. 54-62.

WINANDY, J.E. (1989). "*The effects of CCA preservative treatment and redrying on the bending properties of 2 by 4 Southem Pine Lumber*". Forest Prod. J. 39(9): 14-21.

WINANDY, J.E. (1994). "*Effects of long-term elevated temperature on CCA-treated Southem Pine Lumber*". Forest Prod. J. 44(6): 49-55.

WINANDY, J.E. BOONE, R.S., and BENDTSEN, B. A. (1985). "*The interaction of CCA preservative treatment and redrying: effects on the mechanical properties of Southem Pine*". Forest Prod. J. 35(5): 62-68.

WINANDY, J.E., BARNES, H.M.; MICHELL, P.H. (1992). "*The effect of initial and post-treatment drying temperature on the tensile strength of CCA-treated Southem Pine*". J. Mater. Civil Eng. 4(3): 240-251.

WINANDY, J.E., BENDTSEN, B.A., BOONE, R.S. (1983). "*The effect of time-delay between CCA preservative treatment and redrying on the toughness of small clear specimens of Southem Pine*". Forest Prod.J.33(6): 53-58.

WINANDY, J.E., BOONE, R.S. (1988). "*The effects of CCA preservative treatment and redrying on the bending properties of 2 by 6 Southem Pine Lumber*". Wood Fib. Sci. 20(3): 50-64.

ANEXO A

COMPARAÇÃO DE MÉDIAS – MÉTODO DE TUKEY

No caso de comparações múltiplas entre amostras de tamanhos iguais, o procedimento mais eficiente parece ser o proposto por Tukey, que utiliza valores críticos da amplitude studentizada, que se denota por q (valores críticos de q são tabelados no caso de população normal); Para efeito da aplicação do método de Tukey, os valores tabelados da amplitude studentizada são utilizados conforme descrito a seguir.

Para obter o valor da diferença mínima significativa (dms) pelo método de Tukey, basta calcular:

$$dms = q \sqrt{QMR/r}$$

A1

onde:

- q é o valor tabelado ao nível de significância estabelecido,
- QMR é o quadrado médio do resíduo da análise de variância e
- r é o número de repetições de cada um dos tratamentos.

O valor do QMR é determinado por meio de uma análise de variância, seguindo-se os seguintes passos:

a) graus de liberdade:

de tratamento: $k-1$

do total: $n-1$

do resíduo: $n-k$

Onde :

k – tratamentos

r – repetições de um mesmo tratamento

n – número total de repetições

b) o valor de C

O valor de C , dado pelo total geral elevado ao quadrado e dividido pelo número de observações. O valor C é conhecido como correção:

$$C = \frac{(\sum y)^2}{n} \quad A2$$

c) soma de quadrados total (SQT):

$$SQT = \sum y^2 - C \quad A3$$

d) soma dos quadrados de tratamentos (SQT_r):

$$SQT_r = \frac{\sum T^2}{r} - C \quad A4$$

Onde, T_i é a soma dos valores da i -ésima amostra

e) soma do quadrado de resíduo (SQR):

$$SQR = SQT - SQT_r$$

A5

f) quadrado médio de tratamentos (QMT_r):

$$QMT_r = \frac{SQT_r}{k - 1}$$

A6

g) quadrado médio de resíduo (QMR):

$$QMR = \frac{SQR}{n - k}$$

A7

Depois de encontrar o valor do dms, utilizando os passos anteriores, deve-se compara-lo ao valor absoluto da diferença das médias analisadas.

$$|x_1 - x_2| \text{ e dms}$$

Quando o valor absoluto da diferença entre duas médias é igual ou superior ao dms, as médias são consideradas estatisticamente diferentes, ao nível de significância estabelecido.

ANEXO B

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS LÂMINAS

Para a caracterização das lâminas de madeira, que apresentavam umidade em torno de 12%, foi determinado o módulo de elasticidade por meio de ensaios de flexão, com força concentrada no meio do vão de 120cm, sendo medidos os deslocamentos verticais no centro do vão. Este vão foi adotado em função da baixa espessura de cada lâmina em relação ao seu comprimento total. As flechas foram medidas no meio do vão, por meio de relógio comparador com sensibilidade de 0,01 mm, para forças aplicadas iguais a 3 N e 13 N para a espécie *Pinus Caribea*, e 3 N a 18 N para a espécie *Eucaliptus Grandis*. Para estes valores não houve a ocorrência de flechas excessivas, garantindo-se que o material se apresentava na fase elástica linear. Devido ao baixo valor das cargas envolvidas, não foi possível efetuar os ciclos de carregamento previstos na NBR 7190-97. Para cada lâmina os ensaios foram feitos três vezes, sendo utilizado o valor médio das flechas

O valor do módulo de elasticidade foi obtido pela seguinte equação B1:

$$E = \frac{\Delta P \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta v} \quad B1$$

Sendo:

E é o módulo de elasticidade, obtido em kN/cm².

ΔP é o intervalo de cargas aplicadas, igual a 0,010 kN para o *Pinus caribea hondurensis* e 0,015 kN para o *Eucaliptus grandis*.

L é o vão, com valor constante e igual a 120 cm.

I é o momento de inércia da seção transversal da lâmina, dado em cm⁴.

Δv é o intervalo de deslocamento relativo às cargas aplicadas, em cm.