

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

Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas

Maximiliano dos Anjos Azambuja

Tese apresentada à Área Interunidades em  
Ciência e Engenharia de Materiais, da  
Universidade de São Paulo, para obtenção  
do título de Doutor em Ciência e  
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

*São Carlos*

2006.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 – Objetivos .....	2
1.2 - Estrutura da Tese .....	2
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 - MADEIRA LAMINADA COLADA.....	4
2.1.1 – Breve histórico .....	4
2.1.2 - Madeira de reflorestamento.....	5
2.1.3 – Componentes básicos de vigas de MLC .....	7
2.1.4 - Aspectos favoráveis e limitações da MLC .....	7
2.1.5 – Aspectos de fabricação de MLC .....	8
2.1.6 – Recomendações para a avaliação de adesivos segundo a norma ASTM D4688 .....	13
2.1.6 – Classificação das lâminas .....	14
2.1.7 – Controle de qualidade do produto acabado.....	20
2.1.8 – Ensaio em vigas de MLC.....	21
2.2 – ADESIVOS APLICADOS EM MADEIRA .....	24
2.2.1 - Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	25
2.2.2 – Aplicação de adesivos poliuretanos em madeira e outros substratos.....	28
2.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	34
<b>3 – ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA EM EMENDAS DENTADAS COM DIMENSÃO ESTRUTURAL .....</b>	<b>35</b>
3.1 – MATERIAIS .....	35
3.1.1 - Madeira.....	35
3.1.2 - Adesivos .....	37
3.2 – MÉTODOS.....	38
3.2.1 - Classificação visual da madeira .....	39

3.2.2 - Classificação mecânica da madeira .....	41
3.2.3 - Plano experimental.....	42
3.2.4 - Confeção das emendas dentadas e procedimento de colagem .....	43
3.2.5 - Ensaio de tração em peças estruturais.....	46
3.2.7 - Forma de Análise dos dados .....	47
<b>3.3 - RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>49</b>
3.3.1 - Classificação visual e mecânica.....	49
3.3.2 - Ensaio de caracterização da madeira.....	49
3.3.3 - Tração paralela em peças de tamanho estrutural .....	50
<b>3.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
3.4.1 - Comparação entre os adesivos .....	53
3.4.2 - Comparação entre os tratamentos e o controle.....	59
3.4.3 - Comparação dos perfis vertical e horizontal .....	62
3.4.4 - Análise dos modos de ruptura.....	63
<b>4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE PARA ADESIVOS ESTRUTURAIS.....</b>	<b>65</b>
4.1 - MATERIAIS.....	65
4.1.1 - Madeiras .....	65
4.1.2 - Adesivos .....	65
4.2 – MÉTODOS.....	65
4.2.1 – Confeção dos corpos-de-prova colados.....	66
4.2.2 – Tratamento dos corpos-de-prova.....	67
4.2.3 - Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola e de resistência da emenda dentada .....	69
4.2.4 - Ensaio de tração paralela às fibras .....	69
4.2.5 - Plano experimental .....	70
4.2.6 – Forma de análise dos dados.....	71
4.3 - RESULTADOS OBTIDOS .....	74
4.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	79
4.4.1 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola .....	79
4.4.2 - Resultados dos ensaios de tração paralela às fibras – espécie Pinus .....	87
<b>5 – VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA.....</b>	<b>97</b>
5.1 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	97
5.1.1 - Madeira.....	97
5.1.2 - Adesivos .....	97
5.1.3 – Montagem das vigas .....	98

5.1.4 - Método de ensaio para caracterização das vigas .....	101
5.1.5 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola .....	103
5.2 - RESULTADOS OBTIDOS .....	104
5.2.1 – Ensaio de Flexão .....	104
5.2.2 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola .....	108
5.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	109
5.3.1 - Ensaio de flexão das vigas .....	109
5.3.1.1 - Avaliação da rigidez à flexão .....	109
5.3.1.2 - Avaliação da ruptura das vigas .....	113
5.3.2 - Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola .....	115
<b>6 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>117</b>
<b>7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de emendas longitudinais (a) emenda de topo, (b) emenda biselada e (c) emenda dentada. ....	8
Figura 2.2 - Emenda dentada com os parâmetros geométricos identificados.....	9
Figura 2.3 – (a) perfil vertical e (b) perfil horizontal. ....	10
Figura 2.4 - Distância mínima entre nó e a emenda dentada. ....	10
Figura 2.5 - Distância mínima entre o corte e o nó. ....	11
Figura 2.6 – Diagonal máxima do esmoado ( $a_{w,max} = \sqrt{A/5}$ ). ....	11
Figura 2.7 - Pressão de colagem em função do comprimento da emenda (DIN 68 140).....	12
Figura 2.8 - Linha radial representativa em peça sem medula. ....	17
Figura 2.9 - Equipamento para a determinação do MOE por vibração transversal.....	18
Figura 2.10 – (a) Lote II - vigas laminadas horizontalmente e (b) Lote III – vigas laminadas multidirecionalmente. ....	21
Figura 2.11 - Configuração para o teste de flexão a quatro pontos.....	22
Figura 2.12 – Emendas dentadas e ruptura viga <i>Eucalyptus grandis</i> .....	23
Figura 2.13 – Configuração do teste de cisalhamento em viga em 5 pontos.....	23
Figura 2.14 – (a) Falhas de cisalhamento na viga, e (b) e (c) parte da falha na seção transversal. ....	23
Figura 2.15 - Curva de decomposição térmico do polímero em atmosfera de N <sub>2</sub> .....	26
Figura 2.16 – Curva do ensaio de tração para amostra do polímero.....	26
Figura 2.17 – Valores médios de resistência ao cisalhamento para os adesivos poliuretanos e adesivo resorcinol-formaldeído: (a) Yellow Birch e (b) Douglas-Fir.....	31
Figura 2.18 - Falha na madeira de adesivos poliuretanos C e D sem e com fundo preparador, e adesivo RF, para Yellow birch (a) e Douglas-fir (b). ....	32
Figura 2.19 - Seção transversal de vigas laminadas da espécie Yellow birch (a) 53,5% de separação de lâminas para o adesivo poliuretano D sem fundo preparador e (b) 5,8% de separação de lâmina para o mesmo adesivo com fundo preparador. ....	32
Figura 2.20 - Seção transversal de vigas laminadas da espécie Douglas fir (a) 71,1% de separação de lâminas para o adesivo poliuretano C sem fundo preparador e (b) 2,1% de separação de lâmina para o mesmo adesivo com fundo preparador. ....	32
Figura 3.1 - Talhão Horto Florestal de Itirapina, SP. ....	36
Figura 3.2 - Secagem ao ar (madeira serrada). ....	36
Figura 3.3: Linha radial representativa para contagem do número de anéis e avaliação da porcentagem de madeira de inverno. ....	39
Figura 3.4: Exemplo de peça com 4 m classificada como SS e N1 em diferentes trechos. ....	40
Figura 3.5: Proporção de cerne na seção transversal da espécie Eucalipto. ....	40
Figura 3.6: Lotes classificados – (a) Pinus e (b) Eucalipto. ....	41
Figura 3.7: Ensaio de classificação mecânica – (a) vibração transversal e (b) flexão estática. ....	41
Figura 3.8 – Parâmetros geométricos das facas asas. ....	43
Figura 3.9 - processo de fabricação das emendas.....	44

Figura 3.10 - Facas asas posicionadas em espiral e emendas dentadas verticais .....	44
Figura 3.11 - Aplicação do adesivo e posicionamento do corpo-de-prova.....	45
Figura 3.12 - Detalhe do aplicador de carga, manômetro e posicionamento da peça a ser emendada.....	45
Figura 3.13 - Prensa manual.....	46
Figura 3.14 - Lote de lâminas com emendas.....	46
Figura 3.15 - Ensaio de tração em peças com dimensões estruturais.....	46
Figura 3.16 – (a) Máquina de ensaio DARTEC M1000/RC e (b) máquina universal de ensaio AMSLER.....	47
Figura 3.17 - Exemplos de rupturas ocorridas em cada modo.....	50
Figura 3.18 - Histograma de freqüências, para a espécie Pinus (perfil vertical).....	53
Figura 3.19 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Pinus (perfil vertical).....	54
Figura 3.20 - Resíduos versus valor estimado, para a espécie Pinus (perfil vertical).....	54
Figura 3.21 – Esquema gráfico da diferença de resistência entre os adesivos.....	56
Figura 3.22 - Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos, para a espécie Pinus.....	56
Figura 3.23 - Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos, para a espécie Eucaliptos.....	59
Figura 3.24 - Comportamento da resistência à tração com o aumento das faixas de módulo de elasticidade (Bloco).....	61
Figura 3.25 - Valores médios de resistência para cada bloco, para a espécie Pinus.....	62
Figura 3.26 - Gráfico de freqüência de ocorrência dos modos de ruptura.....	64
Figura 4.1 – Esquema de prensagem das lâminas de cisalhamento.....	66
Figura 4.2 – Corpos-de-prova de cisalhamento distribuídos e numerados.....	66
Figura 4.3 – Lâminas coladas entablicados para cura.....	67
Figura 4.4 – Corpos-de-prova colados de tração paralela.....	67
Figura 4.5 - Compressor para vácuo-pressão (a) e autocalve (b).....	68
Figura 4.6 – Corpos-de-prova nas prateleiras da climatizadora.....	68
Figura 4.7 – (a) Corpo-de-prova da NBR 7190/97 e (b) corpo-de-prova proposto.....	70
Figura 4.8 – Formas de ruptura à tração (sem emendas).....	74
Figura 4.9 - Valores médios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para os diferentes tratamentos, para a espécie Pinus.....	80
Figura 4.10 - Valores médios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para os diferentes tratamentos, para a espécie Eucalipto.....	82
Figura 4.11 – Distribuição percentual em função da Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante, espécie Pinus.....	85
Figura 4.12 – Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante, espécie Eucalipto.....	86
Figura 4.13 - Valores médios de resistência de emendas dentadas à tração paralela às fibras da madeira para os diferentes tratamentos, para espécie Pinus.....	89
Figura 4.14 - Gráfico de freqüência de ocorrência dos modos de ruptura “Seco”.....	91

Figura 4.15 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura “Saturado”.....	91
Figura 4.16 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura “Fervido”.....	92
Figura 4.17 - Valores médios de resistência à tração paralela às fibras da madeira para os diferentes tratamentos, para espécie Pinus.....	94
Figura 4.18 – Porcentagem dos modos de ruptura.....	95
Figura 5.1 – Prensagem das vigas de MLC.....	101
Figura 5.2 – Vigas de madeira laminada colada.....	101
Figura 5.3 - Esquema estático do ensaio das vigas de MLC.....	102
Figura 5.4 – Variações de apoios testados.....	102
Figura 5.5 - Esquema estático do ensaio das vigas de MLC.....	103
Figura 5.6 - Esquema estático das vigas de MLC ensaiadas.....	103
Figura 5.7 – (a) Esquema do corpo-de-prova de cisalhamento estrutural e (b) corpo-de-prova de Pinus.....	104
Figura 5.8 – Forma A: Ruptura predominante por cisalhamento na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas.....	106
Figura 5.9 – Forma B: Ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola, alternadamente, e em proporções semelhantes.....	106
Figura 5.10 – Forma D: Ruptura por tração na borda inferior, propagando por cisalhamento.....	107
Figura 5.11 – Forma E: Esmagamento na região do apoio.....	107
Figura 5.12 – Ruptura por cisalhamento na área cisalhante: Pinus (a) e Eucalipto (b).....	109
Figura 5.13 - Seção transversal genérica de uma viga em MLC.....	110
Figura 5.14 – Distribuição percentual em função da Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante.....	116
Figura C-1: Histograma de frequências, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical).....	139
Figura C-2: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical).....	139
Figura C-6: Resíduos versus valor estimado, para espécie Eucaliptos (perfil vertical).....	141
Figura C-7: Histograma de frequências, para espécie Pinus.....	141
Figura C-8: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para espécie Pinus.....	142
Figura C-9: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para espécie Pinus.....	142
Figura C-10: Histograma de frequências dos resíduos, para a espécie Eucalipto.....	142
Figura C-11: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucalipto.....	143
Figura C-12: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para a espécie Eucalipto.....	143
Figura C-13: Histograma de frequências dos resíduos.....	143
Figura C-14: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	144
Figura C-15: Gráfico dos resíduos versus valores estimados.....	144
Figura C-16: Histograma de frequências dos resíduos.....	144
Figura C-17: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	145
Figura C-18: Gráfico dos resíduos versus valores estimados.....	145

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Área plantada com <i>Pinus</i> e <i>Eucalipto</i> , no Brasil (ha) – 2000 .....	6
Tabela 2.2: Características geométricas dos perfis estruturais usados nas emendas dentadas pela indústria de MLC Norte-americana. ....	9
Tabela 2.3: Modos de ruptura em ensaios de tração paralela (ASTM D4688-99). ....	14
Tabela 2.4: Limitação da dimensão dos nós em função da proporção da área da seção transversal ocupada. ....	15
Tabela 2.5: Classes de densidade definidas na ASTM D245-93 .....	16
Tabela 2.6: Necessidades mínimas para a produção de MLC.....	20
Tabela 2.7: Síntese dos resultados obtidos .....	22
Tabela 2.8: Resultados de resistência ao cisalhamento para as vigas. ....	24
Tabela 3.1: Valores médios de densidade aparente , resistência à compressão paralela, resistência à tração paralela e módulo de elasticidade para o <i>Pinus hondurensis</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> . Fonte: NBR 7190/97. ....	36
Tabela 3.2 – Limites relativos à proporção da área da seção transversal ocupada pelo nó.....	40
Tabela 3.3: Organização do planejamento do experimento em blocos.....	42
Tabela 3.4: Comparações entre adesivos, perfis e controle.....	48
Tabela 3.5: Resistência à compressão ( $f_{co}$ ), umidade (U) e densidade ( $\rho$ ) - <i>Pinus hondurensis</i> ..50	
Tabela 3.6: Resistência à compressão ( $f_{co}$ ), umidade (U) e densidade ( $\rho$ ) – <i>Eucalyptus grandis</i> 50	
Tabela 3.7: Resistência (MPa) das lâminas à tração - <i>Pinus hondurensis</i> .....	51
Tabela 3.8: Resistência (MPa) das lâminas à tração - <i>Eucalyptus grandis</i> .....	52
Tabela 3.9: Tabela ANOVA, para espécie <i>Pinus</i> (perfil vertical).....	55
Tabela 3.10: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.....	55
Tabela 3.11: Tabela ANOVA, para espécie <i>Eucalipto</i> (perfil vertical). ....	57
Tabela 3.12: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.....	58
Tabela 3.13: Resistências à tração, médias e diferenças com relação ao controle ( <i>Pinus</i> ). ....	60
Tabela 3.14: Resistências à tração, médias e diferenças com relação ao controle ( <i>Eucalipto</i> ). ....	60
Tabela 3.15: Eficiência entre as resistências médias dos adesivos e o controle. ....	60
Tabela 3.16: Tabela ANOVA (perfil vertical e horizontal). ....	63
Tabela 3.17: Frequência dos modos de ruptura, <i>Pinus</i> (P) e <i>Eucalipto</i> (E). ....	63
Tabela 4.1: Quantidade de corpos-de-prova testados (cisalhamento na lâmina de cola e resistência da emenda dentada). ....	70
Tabela 4.2: Quantidade de corpos-de-prova testados (tração paralela às fibras).....	71
Tabela 4.3: Matriz de planejamento – Cisalhamento na lâmina de cola.....	72
Tabela 4.4: Matriz de planejamento – Resistência de emendas dentadas coladas. ....	73
Tabela 4.5: Matriz de planejamento – Resistência à tração paralela. ....	73
Tabela 4.6: Resistência (MPa) ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira - <i>Pinus</i> .....	75



Tabela 4.7: Resistência (MPa) ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira - Eucalipto	76
Tabela 4.8: Resistência (MPa) de emendas dentadas à tração e modos de ruptura - Pinus.	77
Tabela 4.9: Resistência (MPa) à tração paralela as fibras da madeira, para a espécie Pinus.	78
Tabela 4.10: Tabela ANOVA para resistência ao cisalhamento na lâmina colada, espécie Pinus.	79
Tabela 4.11: Diferença entre os valores médios das resistências para os adesivos/tratamentos.	80
Tabela 4.12: Tabela ANOVA para resistência ao cisalhamento na lâmina colada, espécie Eucalipto.	81
Tabela 4.13: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.	82
Tabela 4.14: Razão entre as resistências médias dos adesivos.	83
Tabela 4.15: Perda de resistência - razão entre resistências com base no tratamento seco.	84
Tabela 4.16: Tabela ANOVA para resistência das emendas dentadas (PU Mamona, Purbond e Cascophen).	87
Tabela 4.17: Diferença entre as resistências médias dos corpos-de-prova de tração sem emendas.	88
Tabela 4.18: Razão entre as resistências médias dos adesivos.	89
Tabela 4.19: Perda de resistência - razão entre resistências com base no tratamento seco.	90
Tabela 4.20: Frequência dos modos de ruptura, espécie Pinus.	90
Tabela 4.21: Tabela ANOVA para resistência à tração (sem emendas).	93
Tabela 4.22: Diferença entre as resistências médias dos corpos-de-prova de tração sem emendas.	93
Tabela 4.23: Frequência dos modos de ruptura, sem emendas.	95
Tabela 4.24: Eficiência dos adesivos PU Mamona, Purbond e Cascophen.	96
Tabela 5.1: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas 1 a 7, espécie Pinus.	99
Tabela 5.2: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas 8 a 14, espécie Eucalipto.	100
Tabela 5.3: Deslocamentos verticais na viga 1, para o último ciclo de carregamento.	104
Tabela 5.4: Deslocamentos $\delta_{3,abs}$ e $\delta_{3,rel}$ .	105
Tabela 5.5: Relações F/v e forças de ruptura.	105
Tabela 5.6: Formas de ruptura.	107
Tabela 5.7: Resistência (MPa) ao cisalhamento e % de falha na madeira (corpos-de-prova retirados das vigas).	108
Tabela 5.8: Resistência (MPa) ao cisalhamento (estrutural) e % de falha na madeira (corpos-de-prova retirados das vigas).	109
Tabela 5.9: Cálculo do $EI_{teo}$ da viga 1 de <i>Pinus</i> .	111
Tabela 5.10: Resultados teóricos e experimentais de rigidez à flexão.	111
Tabela 5.11: Valores de eficiência das vigas da espécie Pinus Caribea.	112
Tabela 5.12: Valores obtidos para $F_r$ (kN), $M_{max}$ (kN.m), $\tau_{max}$ (MPa) e $\sigma_{max}$ (MPa).	114
Tabela 5.13: Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola.	115
Tabela 6.1: Eficiência ( $\eta$ ) das emendas coladas.	117

Tabela 6.2: Razão entre as resistências médias dos adesivos.....	119
Tabela 6.3: Eficiência dos adesivos para as emendas dentadas em corpos-de-prova, para os tratamentos seco, saturado e fervido – Espécie: Pinus .....	119

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

