

**EMPREGO DE ESPÉCIES TROPICAIS
ALTERNATIVAS NA PRODUÇÃO DE
ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA
LAMINADA COLADA**

André Luiz Zangiácomo

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos
2003



Cabeça Explodida!- Salvador Dali

Aos meus pais Odécio e Dinivanda e aos meus irmãos Daniel e Kelly.

A GRADECIMENTOS

Este trabalho é o fruto de cada sorriso, de cada palavra, de cada olhar, enfim, é o resultado da relevante contribuição destas pessoas, as quais eu faço questão de tornar pública. Os meus sinceros agradecimentos:

Aos meus pais Odécio e Dinivanda (Décio e Vanda), por serem os primeiros professores de minha vida e por terem me dado a oportunidade de estudar. Ao meu irmão Daniel (Mi) pelo companheirismo e pela boa música de sua bateria, e à minha irmã Kelly, pela sua carinhosa companhia e pelos momentos de risadas juntos.

Ao Professor Doutor Francisco Antonio Rocco Lahr pela sua valiosíssima amizade e orientação nesta pesquisa. Acima de tudo, Ser Humano.

À Tia Maria, e às primas Marlene e Marli, pelo incentivo. Desculpem a ausência.

Aos funcionários do LaMEM, Jaime, Arnaldo, Silvio, Cido, Samuel, Bragatto, Roberto e Tânia, pela enorme ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega Mariano, pela fundamental contribuição no planejamento e na análise estatística.

Aos companheiros do LaMEM pelas amizades, trocas de informações, colaborações, piadas e todos os dias de convivência.

Ao Centro Acadêmico “Armando de Salles Oliveira” (CAASO), pelo convívio político, social e cultural. Aos amigos do Grupo de Som - CAASO, do MTB FOR FUN – CAASO e do Bando de Expressão Cômico Cultural do CAASO.

Aos amigos e moradores da “República dos Cachassauros Largados”, engenheiros Marú, Bicudo, Farelo, Sardinha, Fernandinho, Spin e Tonho. Pelos momentos de devaneios, pelas alegrias, diversões, etc. E por sempre compartilharem comigo das

seguintes frases: “De quem é essa louça suja?” e “Quem é que lava o banheiro essa semana?”.

Aos amigos de Americana por me apoiarem e me receberem nos finais de semana.

Aos membros integrantes da banca do Exame de Qualificação professores José Samuel Giongo e Raquel Gonçalves pelas valiosas sugestões.

Ao professor Gilberto e aos funcionários do Laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do IQSC – USP pelo auxílio e preparação do poliol e do prepolímero empregados nesta pesquisa.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

E a todos aqueles que de uma forma ou de outra depositaram suas ajudas anonimamente na composição desta obra.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Metodologia	2
CAPÍTULO 2.....	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 Breve Histórico	4
2.2 Algumas pesquisas a respeito da MLC no Brasil.....	8
2.3 Vantagens da MLC	9
2.4 Madeiras da Floresta Amazônica	9
2.5 Ensaio Não Destrutivo	10
2.6 Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	11
CAPÍTULO 3.....	12
ENSAIOS PRELIMINARES	
3.1 Materiais	12
3.1.1 Espécies	12
3.1.2 Adesivos.....	13

3.1.3 Equipamentos	13
3.2 Métodos	15
3.2.1 Ensaios.....	15
3.2.2 Obtenção dos corpos-de-prova.....	15
3.2.3 Preparo dos adesivos e processo de colagem	17
3.3 Planejamento estatístico	18
3.4 Resultados	19
3.5 Análise dos resultados.....	21
3.6 Conclusões preliminares.....	28
CAPÍTULO 4.....	30
ENSAIOS PRINCIPAIS	
4.1 Materiais	30
4.1.1 Espécie.....	30
4.1.2 Adesivos.....	31
4.1.3 Equipamentos	32
4.2 Métodos	33
4.2.1 Obtenção das lâminas	33
4.2.2 Ensaios das lâminas	34
4.2.2.1 Flexão estática nas lâminas	35
4.2.2.2 Vibração transversal.....	36
4.2.2.3 Ultra-som	38
4.2.3 Critérios para a montagem dos elementos estruturais	40
4.2.4 Colagem das vigas	41
4.2.5 Ensaios das vigas	43
4.2.5.1 Flexão estática.....	43
4.2.5.2 Vibração transversal.....	46
4.2.5.3 Ultra-som	47
4.2.6 Planejamento estatístico	48

CAPÍTULO 5.....	50
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	
5.1 Valores obtidos nos ensaios com as lâminas	51
5.1.1 Flexão estática.....	51
5.1.2 Vibração transversal.....	52
5.1.3 Ultra-som	53
5.1.4 Análises dos resultados obtidos para as lâminas.....	54
5.1.4.1 Flexão estática versus vibração transversal.....	55
5.1.4.2 Flexão estática versus ultra-som	56
5.1.4.3 Vibração transversal versus ultra-som	57
5.2 Resultados obtidos para as vigas	57
5.2.1 Disposição das lâminas nas vigas	61
5.2.2 Valores calculados.....	62
5.2.3 Valores obtidos nos ensaios	64
5.2.3.1 Flexão estática.....	64
5.2.3.2 Vibração transversal.....	66
5.2.3.3 Ultra-som	66
5.2.4 Análise dos resultados.....	67
5.2.4.1 Análise fatorial	68
5.2.4.2 Correlações e análises de variância	72
CAPÍTULO 6.....	76
CONCLUSÕES	
CAPÍTULO 7.....	78
7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
7.2 OBRAS CONSULTADAS.....	81
APÊNDICE	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma viga de MLC	5
Figura 2 – Ponte em arco construída com madeira laminada colada	7
Figura 3 – Estrutura de cobertura em madeira laminada colada	7
Figura 4 – Serra utilizada no corte das peças.....	14
Figura 5 – Cortador tipo asa para emendas dentadas.....	14
Figura 6 – Furadeira.....	14
Figura 7 – Máquina Universal de ensaios AMSLER.....	14
Figura 8 – Máquina Universal de ensaios Dartec	15
Figura 9 - Confeção de corpo-de-prova para ensaio de tração normal.....	16
Figura 10 – Aplicação de adesivo.....	18
Figura 11 – Processo de colagem	18
Figura 12 – Corpo-de-prova submetido a ensaio de tração paralela	20
Figura 13 – Corpo-de-prova submetido a ensaio de cisalhamento.....	20
Figura 14 – Corpo-de-prova submetido a ensaio de tração normal.....	21
Figura 15– Aspecto da madeira Cedrinho	31
Figura 16 – Tábuas de Cedrinho	31
Figura 17 – Adesivos utilizados nas colagens	32
Figura 18 – Esquema de corte das tábuas para obtenção das lâminas	34
Figura 19 – Esquema de ensaio de flexão estática para as lâminas.....	35
Figura 20 – Esquema do ensaio de determinação do módulo de elasticidade por meio de vibração transversal	37
Figura 21 – Detalhe do equipamento de vibração transversal.....	37
Figura 22 – Equipamento de vibração transversal	37
Figura 23 – Lâmina em ensaio.....	38
Figura 24 – Detalhe da célula de carga	38
Figura 25 – Esquema de ensaio para determinação da constante dinâmica por meio de ultra-som.....	39
Figura 26 – Aparelho de ultra-som Sylvatest	39

Figura 27 – Lâminas para montagem da peça estrutural.....	42
Figura 28 – Dispositivo para prensagem das vigas	42
Figura 29 – Distribuição do adesivo nas lâminas.....	42
Figura 30 – Detalhe da distribuição	42
Figura 31 – Aplicação da pressão com uso de torquímetro.....	43
Figura 32 – Vigas sob pressão	43
Figura 33 – Vigas sob pressão.....	43
Figura 34 – Vista lateral de uma viga colada	43
Figura 35 – Esquema de ensaio de flexão estática de 4 pontos	45
Figura 36 – Ensaio de flexão estática de 4 pontos em uma viga	45
Figura 37 – Detalhe de aplicação de força no ensaio.....	46
Figura 38 – Vista lateral do ensaio de flexão estática.	46
Figura 39 – Elemento estrutural preparado para ensaio de vibração transversal	46
Figura 40 – Viga sofrendo impacto em ensaio de vibração transversal.....	47
Figura 41 – Esquema de ensaio de ultra-som em viga de MLC	48
Figura 42 – Médias dos ensaios.....	55
Figura 43 – Correlação para as lâminas: flexão x vibração.....	56
Figura 44 – Correlação para as lâminas: flexão x ultra-som	56
Figura 45 – Correlação para as lâminas: ultra-som x vibração	57
Figura 46 – Esquema da viga sem colar.....	58
Figura 47 – Distribuição das lâminas nas vigas	62
Figura 48 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados da tabela 17	69
Figura 49 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos da tabela 17	70
Figura 50 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais (tabela 17)	70
Figura 51– Dados obtidos na análise fatorial	71
Figura 52 – Correlação para as vigas: flexão x vibração	73
Figura 53 – Correlação para as vigas: flexão x ultra-som.....	73
Figura 54 – Correlação para as vigas: ultra-som x vibração.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões médias obtidas para a Envira branca (em MPa)	19
Tabela 2 – Tensões médias obtidas para o Cambará (em MPa).....	19
Tabela 3 – Tensões médias obtidas para a Castanheira (em MPa).....	19
Tabela 4 – Tensões médias obtidas para o Cedrinho (em MPa).....	20
Tabela 5 – Análise de variância da Envira Branca.....	22
Tabela 6 – Análise de variância do Cambará.....	23
Tabela 7 – Análise de variância da Castanheira	25
Tabela 8 – Análise de variância do Cedrinho.....	27
Tabela 9 – Matriz planejamento para análise estatística	49
Tabela 10 – Módulos de elasticidade das lâminas obtidos por flexão estática ...	52
Tabela 11 – Módulos de elasticidade das lâminas, obtidos por vibração transversal.....	53
Tabela 12 – Constantes dinâmicas das lâminas obtidas por ultra-som	54
Tabela 13 – Resultados calculados obtidos para as vigas.....	63
Tabela 14 – Valores obtidos por ensaios de flexão estática	65
Tabela 15 – Valores obtidos nos ensaios de vibração transversal	66
Tabela 16 – Valores obtidos em ensaios por ultra-som	67
Tabela 17 – Resultados obtidos nos ensaios, matriz planejamento, valores estimados, resíduos e escores normais.....	68
Tabela 18 – Valores de E obtidos nos ensaios de flexão estática e vibração transversal e de C_{LL} obtidos nos ensaios de ultra-som	72
Tabela 19 – Análises de variância das médias dos ensaios versus calculados	75

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DIN – Deutsches Institut für Normung

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

EUA – Estados Unidos da América

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IQSC – Instituto de Química de São Carlos

LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira

LPF – Laboratório de Produtos Florestais

MLC – Madeira Laminada Colada

NBR – Norma Brasileira Registrada

SET – Departamento de Engenharia de Estruturas

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{LL}	-	constante dinâmica obtida por meio de ensaio de ultra-som
E	-	módulo de elasticidade
$E_{médio}$	-	média aritmética calculada para os módulos de elasticidade
E_p	-	média ponderada calculada para os módulos de elasticidade
E_{vt}	-	módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio de vibração transversal
DP	-	desvio padrão
CV	-	coeficiente de variação
p	-	p-valor
$F_{observado}$	-	valor observado
f_c	-	valor crítico
F	-	força concentrada aplicada
K	-	constante do anel dinamométrico

RESUMO

ZANGIÁCOMO, A. L. (2003). *Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada*. São Carlos, 2003. 78p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Apesar da versatilidade da madeira, seu emprego fica, às vezes, dificultado por não serem totalmente conhecidas as suas propriedades e seu desempenho em diferentes condições de serviço. Neste trabalho, procura-se contribuir para um melhor aproveitamento das espécies tropicais alternativas, em especial no emprego para produção de elementos estruturais de madeira laminada colada, uma vez que o Brasil possui grande potencial dessas espécies, mas ainda sub-utilizadas. Neste contexto, realiza-se a determinação das propriedades físicas, de resistência e de rigidez de algumas espécies e determinam-se também as rigidezes de elementos estruturais obtidos da espécie cujos corpos-de-prova apresentam os melhores resultados. Ensaia-se vigas montadas com dois tipos de adesivos, duas intensidades de pressão e duas distribuições de lâminas. Adota-se a metodologia experimental recomendada no ANEXO B da NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Analisam-se os resultados obtidos a partir de conceitos estatísticos. A espécie Cedrinho (*Erismia sp*) apresentou as melhores respostas, das quais pode-se concluir que os adesivos Cascophen e à base de mamona não influenciaram as propriedades de rigidez das vigas, o mesmo acontecendo para as duas intensidades de pressão, 0,8 MPa e 1,2 MPa. As propriedades de rigidez das vigas de MLC podem ser influenciadas pela distribuição das lâminas ao longo da altura da seção transversal.

Palavras-chave: madeira, estruturas de madeira, madeira laminada colada.

A BSTRACT

ZANGIÁCOMO, A. L. (2003). *Employment of alternative tropical timber species in glued laminated timber structural elements production*. São Carlos, 2003. 78p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Despite the wood versatility, its application is, sometimes, difficult because of its properties and performances under different work conditions are not completely known. The present work seeks to contribute for a better utilization of the alternative tropical wood species, especially in the employment to the production of structural elements of glued laminated timber, once that Brazil has a great potential of these species which are under applied. In this context, the determination of the physical properties, the strength and the stiffness of some alternative tropical species are realized, and the stiffness of structural elements made of the species which presented the best results in specimens tests are determined. Beams are tested with two adhesives classes, two pressure intensities and two ways of lamination. Experimental methods suggested in ANEXO B, NBR 7190:1997 – Timber Structures Design (Brazilian Technical Codes Association) were used. The species Cedrinho (*Erisma sp*) presents the best results, and conclusions are made: Cascophen and castor oil adhesives did not influence the beams stiffness properties; the same thing happens for the two pressure intensities, 0,8 MPa and 1,2 MPa. The glulam beams stiffness properties can be influenced by the ways of lamination.

Keywords: wood, timber structures, glued laminated timber

CAPÍTULO 1

“Queira, basta ser sincero e desejar profundo, você será capaz de sacudir o mundo, vai, tente outra vez.

Tente, e não diga que a vitória está perdida, se é de batalhas que se vive a vida, tente outra vez.”

Raul Seixas (1975)

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O emprego da madeira na construção de estruturas, no Brasil, nem sempre ocorre em condições satisfatórias no tocante à tecnologia agregada ao material, apesar de sua versatilidade e de sua disponibilidade. Mesmo considerando estes aspectos favoráveis, seu emprego fica, às vezes, dificultado por não serem totalmente conhecidas suas propriedades físico-mecânicas e seu desempenho em diferentes condições de serviço.

Para o adequado aproveitamento da madeira como material estrutural, é indispensável o conhecimento das suas características de resistência e de rigidez. Isto deve ocorrer com todas as espécies, inclusive as alternativas, cujo potencial seja mais promissor, consideradas as múltiplas possibilidades de uso. Entre estes usos, vem ganhando cada vez mais espaço no mercado internacional, com reflexos imediatos na construção civil brasileira, o emprego de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC), solução compatível para uma vasta gama de problemas estruturais.

Paralelamente, vem sendo observada a conscientização da necessidade de um melhor aproveitamento dos recursos naturais provenientes das Florestas Tropicais, em particular no que concerne à Floresta Amazônica, com a disseminação dos conceitos de manejo sustentado e comercialização de material certificado. Cada vez menos se compactua com a exploração seletiva e predatória, que conduziu à exaustão diversas espécies de uso consagrado. Também está sendo gradativamente abandonado o procedimento desaconselhável de se queimar, nos próprios locais de extração, as numerosas árvores de espécies pouco conhecidas, ou mesmo desconhecidas, em particular as que fornecem madeira com densidade inferior a $0,75 \text{ g/cm}^3$, a 12% de umidade. Deve ser lembrado que é nesta faixa de densidades que se encontram as espécies potencialmente indicadas para emprego na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada.

Informações publicadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (1998) mostram um significativo decréscimo na taxa de desmatamento na Floresta Amazônica. No período compreendido entre 1978 e 1987, 21.130 km^2 foram consumidos por ano. Nos dez anos seguintes, este número caiu para 16.777 km^2 , e as perspectivas são de que se reduza ainda mais esta taxa nos próximos anos. Assim sendo, passa a crescer a disponibilidade de espécies de menor densidade, evidenciando a urgência para o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa, seja de cunho teórico, seja de abordagem teórico-experimental, que permitam o adequado conhecimento de sua aplicabilidade às mais diversificadas situações práticas, incluindo-se entre elas a MLC.

1.2 Objetivo

O trabalho aqui proposto tem como objetivo gerar subsídios que contribuam para o emprego de espécies tropicais, com densidade até $0,75 \text{ g/cm}^3$, a 12% de umidade, valor de referência da NBR 7190:1997, na produção de peças estruturais de MLC.

1.3 Metodologia

Esta pesquisa foi dividida em duas fases. Na primeira, são realizados ensaios em corpos-de-prova colados obtidos de quatro espécies de madeira: são determinadas a

resistência à tração das emendas dentadas, a resistência da lâmina de cola à tração normal e a resistência ao cisalhamento da lâmina de cola. Para efeito de comparação, são realizados também ensaios para a determinação da resistência à tração paralela às fibras, resistência à tração normal às fibras e resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova de madeira maciça. Na segunda fase, determinam-se por meio de ensaios de flexão estática, de vibração transversal e de ultra-som, as rigidezes de elementos estruturais obtidos da espécie cujos corpos-de-prova apresentam os melhores resultados. São ensaiadas vigas montadas com dois tipos de adesivos, duas intensidades de pressão e duas distribuições de lâminas. Os experimentos são conduzidos de acordo com a metodologia recomendada no ANEXO B da NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e os resultados obtidos são analisados a partir de conceitos estatísticos (análises de variância das médias, correlações e análise fatorial).

CAPÍTULO 2

“Quarenta anos de idade: velho demais para trabalhar, jovem demais para se aposentar.”

Homem desempregado em entrevista na TV

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve Histórico

Elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC) são formados por peças de madeira obtidas com lâminas de determinada seção, solidarizadas entre si sob pressão, com o emprego de adesivos (figura 1).

A MLC tem seus usos mais freqüentes em estruturas de cobertura, elementos estruturais principais para pontes, torres de transmissão, edifícios, embarcações, banzos de escadas e corrimão, equipamentos decorativos planos ou em relevos, esquadrias e móveis. Isto se deve ao fato da MLC adaptar-se a uma significativa variedade de formas e apresentar alta resistência a solicitações mecânicas em função de seu peso próprio relativamente baixo.

A técnica de laminar peças de madeira com pequenas dimensões para se obter elementos estruturais mais avantajados teve origem na Alemanha, no final do século XIX, quando Hetzer obteve a primeira patente deste processo de produção. No entanto, o Sistema Hetzer, como passou a ser conhecido, ganhou evidência apenas a partir de 1913, quando se expandiu o emprego da MLC na construção de estruturas de coberturas de fábricas e escolas, bem como na montagem de pontes.

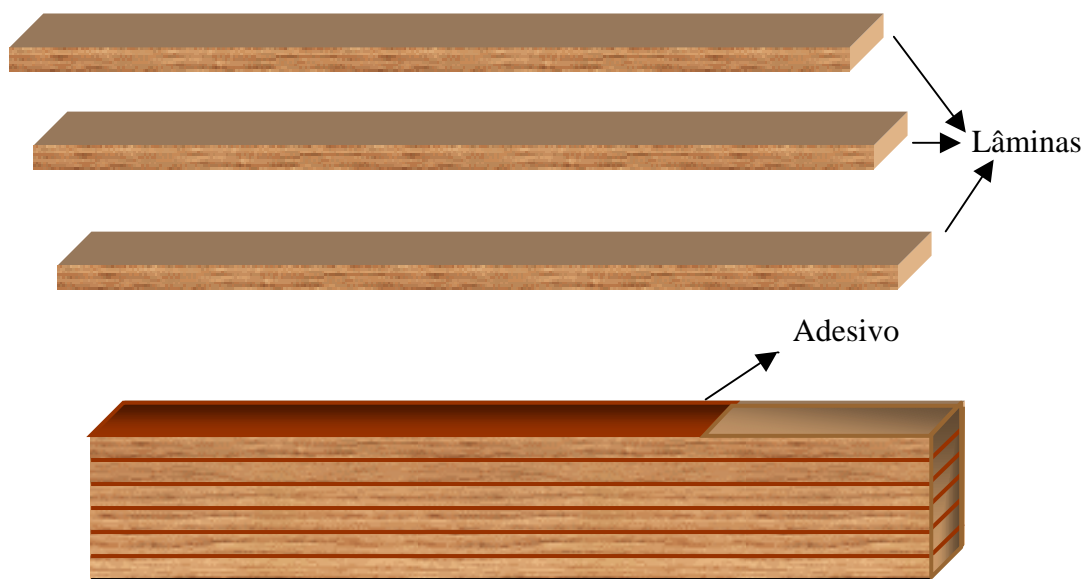


Figura 1 – Esquema de uma viga de MLC

Ganha impulso, então, o processo de aceitação dessa técnica por parte de outros países da Europa, como Dinamarca, Noruega, Suécia, Áustria, e, principalmente, Suíça, onde ocorreu grande disseminação de seu emprego.

Coube a Max Hanish, arquiteto e engenheiro alemão, trazer a tecnologia da MLC para a América. Após ensaios realizados nos Estados Unidos da América (EUA), para verificação da confiabilidade da MLC, foram instaladas algumas indústrias no Canadá e EUA.

Informações mais detalhadas sobre construções pioneiras em MLC, bem como relacionadas às bases teóricas para o dimensionamento de elementos estruturais, podem ser encontradas em publicações consideradas clássicas no assunto, mencionando-se, entre outras, as de SELBO & FREAS (1954), CHUGG (1964) e MOODY (1970).

No Brasil, a primeira indústria de MLC, a ESMARA Estruturas de Madeira Ltda, foi fundada em 1934, em Curitiba-PR, com tecnologia trazida por alemães. Mais tarde, outra empresa de mesmo nome foi fundada em Viamão-RS. Têm-se obras marcantes destas duas empresas na Região Sul, com vastos arquivos de projetos.

Merecem citações outras indústrias também da Região Sul, como a PRÉ-MONTAL Estruturas de Madeira Ltda (PREMON), fundada em Curitiba-PR, em 1977,

executando a maioria de seus projetos nas décadas de 70/80; a EMADEL Estruturas de Madeira Ltda, fundada em Araucária-PR, em 1981; e a BATTISTELLA Indústria e Comércio Ltda, situada em Lages-SC, atuando no setor madeireiro há mais de 40 anos e que, atualmente, possui uma linha de produção de casas e estruturas pré-fabricadas, com largo uso de elementos estruturais de MLC.

A LAMINARCO Madeira Industrial Ltda, fundada na década de 60 e localizada em São Paulo-SP, segundo BONO (1996), foi a primeira empresa produtora de MLC na Região Sudeste. Foi montada e gerenciada pelo engenheiro Vinício Walter Callia, pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), pioneiro nos estudos e publicações sobre o assunto.

Já estão instaladas algumas produtoras de peças estruturais de MLC na região metropolitana de Belo Horizonte, as quais têm empregado madeira de Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*). Na região norte do país, as primeiras tentativas para a produção de MLC a partir de espécies tropicais esbarraram na ausência de informações a respeito das variáveis envolvidas na produção, entre elas a compatibilidade da espécie com os adesivos, a pressão e o tempo de colagem e as propriedades de resistência a considerar no dimensionamento. Observa-se o paradoxo: diante da disponibilidade do material, o respectivo uso fica restrito (ou inviabilizado) pela ausência de informações tecnológicas que permitam sua correta aplicação.

As figuras 2 e 3 ilustram exemplos de aplicações estruturais de MLC.



Figura 2 – Ponte em arco construída com madeira laminada colada

Apple Valley – Colorado – EUA

Fonte: www.eng.auburn.edu



Figura 3 – Estrutura de cobertura em madeira laminada colada

Fonte: www.mcintosh.co.nz

2.2 Algumas pesquisas a respeito da MLC no Brasil

A aceitação da MLC, como material estrutural, por projetistas e construtores vem incrementando pesquisas a respeito do assunto, gerando textos voltados à normalização, elaborados e publicados periodicamente por países da Europa e Estados Unidos da América, desde 1954.

Nesta resenha bibliográfica são destacados os principais trabalhos desenvolvidos no Brasil sobre o tema. O primeiro destes trabalhos foi publicado por CALLIA (1958), a partir de pesquisas realizadas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, sobre o uso do Pinho do Paraná (*Araucaria Angustifolia*) na produção de elementos estruturais de MLC.

No Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), o estudo da MLC ganhou impulso com o trabalho de ZANDER & HELLMEISTER (1979), que abordou aspectos genéricos voltados à produção de MLC.

Citam-se, na continuação, os trabalhos de SIMIONI (1978), na Universidade Federal do Paraná, versando sobre a utilização de madeira do gênero *Pinus* na produção de vigas retas de MLC; de CHAHUD & ROCCO LAHR (1983) avaliando a viabilidade do emprego de arcos de MLC como estruturas principais de pontes; de DIAS & ROCCO LAHR (1983), sobre o ensaio de modelo reduzido de uma ponte pênsil com vigas de rigidez de MLC; e de ROCCO LAHR (1992), sobre a viabilidade do uso de peças de diferentes espécies na produção de um mesmo elemento estrutural de MLC.

Outros pesquisadores, entre eles SZÜCS, da Universidade Federal de Santa Catarina, e MOURA, da Universidade Estadual de Londrina, desenvolveram estudos exploratórios da capacidade de peças de MLC, propriedades de resistência e de elasticidade, busca de adesivos nacionais, processos de colagem, e vigas de MLC fabricadas com espécies de reflorestamento.

Entretanto, nenhuma publicação brasileira fornece informações conclusivas a respeito da viabilidade do emprego de espécies nativas na produção de elementos estruturais de MLC, em particular com o uso do adesivo à base de resina fenólica ou do adesivo à base de resina poliuretânica obtida do processamento da mamona.

2.3 Vantagens da MLC

Uma das características da MLC é a versatilidade na obtenção das mais variadas formas geométricas para elementos estruturais. As possibilidades arquitetônicas daí resultantes são inúmeras e dependem principalmente da indispensável colaboração entre arquitetos e engenheiros (NATTERER, 1991). Têm-se como principais vantagens:

- Facilidade na construção de grandes estruturas a partir de peças de dimensões comerciais;
- Redução de rachaduras e outros defeitos típicos de peças maciças de madeira, com grandes dimensões;
- Possibilidade de emprego de peças de qualidade inferior em zonas menos solicitadas, e de peças de melhor qualidade em zonas mais solicitadas, podendo-se combinar, assim, espécies distintas;
- Possibilidade de aplicação de contra-flechas durante o processo de fabricação;
- Baixa relação peso/ resistência, não exigindo equipamentos possantes para içamento, bem como conduzindo a fundações com ações de menores intensidades;
- Bom desempenho sob a ação do fogo, em razão de seções transversais avantajadas, e elevada resistência aos agentes corrosivos.

Como aspecto restritivo, pode ser citado que a MLC tem custo superior ao da madeira maciça, e requer técnicas especiais, equipamentos e mão-de-obra especializada no processo de fabricação.

2.4 Madeiras da Floresta Amazônica

A Floresta Amazônica, no Brasil, ocupa uma área de aproximadamente 2.800.000 km² nas regiões Norte e Centro-Oeste, representando mais de um terço da área do país. Segundo SANTOS (1987), entre outros, há mais de quatro mil espécies de madeira na Floresta Amazônica, mas apenas uma fração é considerada de interesse comercial. Isto é explicado por algumas razões:

- Excelente desempenho das espécies de uso consagrado;
- Grande disponibilidade destas espécies nas regiões da floresta que foram inicialmente exploradas;
- Poucas informações disponíveis sobre o potencial da utilização das chamadas espécies alternativas, substituindo as espécies tradicionais.

A partir da década de 80, algumas iniciativas oficiais incentivaram a caracterização de espécies nativas. Diversos trabalhos nesta direção vêm sendo conduzidos, desde então, no Laboratório de Produtos Florestais (LPF-IBAMA-Brasília), nos laboratórios do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA (Manaus) e no LaMEM-SET (USP-São Carlos), entre outros, segundo registro de DIAS & ROCCO LAHR (1999). Com isto, verifica-se gradual redução da utilização de espécies consagradas, provocando gradativa diminuição das áreas desmatadas.

Alguns trabalhos mostram que muitas espécies alternativas apresentam propriedades físicas, de resistência e de elasticidade, compatíveis para emprego na produção de elementos estruturais de MLC, embora não mencionem a necessidade de se compatibilizar a respectiva permeabilidade com os adesivos disponíveis. Esta necessidade, como será vista adiante, foi confirmada nos resultados preliminares obtidos no presente trabalho. Entretanto, não foram encontrados registros, senão o de ROCCO LAHR (1992), sobre estudos experimentais conduzidos sobre tais espécies, visando sua utilização em elementos estruturais de MLC. Mesmo assim, o trabalho desse autor se restringe à determinação de algumas propriedades de rigidez, sem possibilidade de se chegar a uma generalização dos resultados.

2.5 Ensaio Não Destrutivo

Os Ensaio Não Destrutivo (END) são realizados em diversos tipos de materiais para a verificação de defeitos e/ou descontinuidades, através de princípios físicos definidos, sem alterar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, e sem interferir em seu uso posterior. Na madeira, os END são empregados na sua caracterização, contribuindo para melhorar a competitividade deste material. Dentre as técnicas utilizadas nas avaliações não destrutivas, podem-se destacar a de ultra-som e a de vibração transversal. Segundo Oliveira (2001), a técnica de ultra-som tem

se mostrado um método viável para a caracterização da madeira, apresentando algumas vantagens em relação aos métodos convencionais, como maior rapidez e versatilidade a um custo menor, podendo ser empregada em indústrias e distribuidores de madeira e derivados, e também na avaliação *in loco* de estruturas. A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ondas ultra-sônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, a densidade e o módulo de elasticidade. Outra técnica de ensaios não destrutivos para determinação de propriedades de rigidez da madeira é a de vibração transversal. Consiste na determinação do módulo de elasticidade da peça estudada por meio da análise das suas frequências de vibrações. Alguns aparelhos utilizam um microfone para captar os sinais de vibração da madeira, que são posteriormente digitalizados e, por meio de programas computacionais, determina-se então o valor do módulo de elasticidade. Nesta pesquisa, utilizou-se o equipamento Metriguard modelo 340-E, que possui uma célula de carga para captação das vibrações da peça. Assim como o equipamento de ultra-som, o aparelho de vibração transversal é de fácil manuseio e pode ser utilizado em indústrias e em outros setores madeireiros.

2.6 Conclusões da Revisão Bibliográfica

Pela revisão bibliográfica efetuada, é possível concluir que não foi desenvolvido, no país, qualquer trabalho de pesquisa objetivando gerar subsídios que contribuam para o emprego de espécies tropicais na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. Este fato justifica plenamente a presente dissertação, cujos resultados podem se constituir em interessante contribuição para que se estabeleça uma nova linha de investigação na área de madeiras e de estruturas de madeira no Brasil.

CAPÍTULO 3

“Um túmulo basta agora àquele para quem não bastava o mundo inteiro.”

Epitáfio de Alexandre Magno

ENSAIOS PRELIMINARES

A realização dos ensaios preliminares teve como objetivo avaliar o desempenho de algumas espécies nativas, por meio de ensaios com corpos-de-prova, seguindo as diretrizes previstas na NBR 7190:1997, Anexo B. A espécie que apresentou os melhores resultados foi então a escolhida para dar seqüência à próxima fase da pesquisa.

3.1 Materiais

3.1.1 Espécies

Para o desenvolvimento dos ensaios preliminares foram utilizadas espécies nativas de madeira, com densidades de até $0,75 \text{ g/cm}^3$, a 12% de umidade, valor de referência de acordo com as prescrições da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Foi feita uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de listar as espécies cujas densidades fossem inferiores ou, no máximo, iguais ao valor citado acima, sendo estas apresentadas no Apêndice, tabela A1. Deste levantamento, foram escolhidas aquelas que estavam

disponíveis no mercado madeireiro da região de São Carlos, num total de quatro espécies, a saber:

Envira Branca (*Xylopia sp*) – densidade 0,72 g/cm³;

Cambará (*Moquinia polymorpha*) – densidade 0,63 g/cm³;

Castanheira (*Bertholetia excelsa*) – densidade 0,70 g/cm³;

Cedrinho (*Erismia sp*) – densidade 0,62 g/cm³.

Foram adquiridas no mercado madeireiro da região seis vigas para cada espécie, com dimensões 6 cm x 12 cm x 300 cm, das quais foram extraídos os corpos-de-prova para a realização dos ensaios.

3.1.2 Adesivos

Foram utilizados dois tipos de adesivos na colagem dos corpos-de-prova. O primeiro, à base de resina resorcinol, conhecido pelo nome comercial de Cascophen, usual na produção de elementos estruturais de MLC pela indústria brasileira. O segundo, à base de resina extraída da mamona, é um adesivo poliuretânico bicomponente, desenvolvido e produzido por pesquisadores do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (IQSC – USP).

3.1.3 Equipamentos

Para a confecção dos corpos-de-prova foram utilizados os equipamentos elétricos da oficina do LaMEM, tais como serra circular (figura 4), furadeira (figura 6) e cortador tipo “asa” para emendas dentadas (figura 5). Para a obtenção das dimensões dos corpos-de-prova foi empregado um paquímetro digital com sensibilidade de 0,01 mm. Um dispositivo de reação, com anel dinamométrico, foi montado para fornecer a intensidade de pressão desejada (figura 11). Para o preparo dos adesivos foram utilizados pequenos recipientes, com capacidade de aproximadamente 1 litro, onde as partes foram misturadas. Na determinação das massas das partes foi utilizada uma balança digital, e pincéis foram empregados para a distribuição dos adesivos nos corpos-de-prova. Na condução dos ensaios foram utilizadas duas máquinas

universais de ensaio: uma AMSLER, com capacidade de carregamento de 250 kN (figura 7), e uma DARTEC M1000/RC, com capacidade de 100 kN (figura 8).



Figura 4 – Serra utilizada no corte das peças



Figura 5 – Cortador tipo asa para emendas dentadas



Figura 6 – Furadeira



Figura 7 – Máquina Universal de ensaios AMSLER



Figura 8.a)



Figura 8.b)

Figura 8 – Máquina Universal de ensaios Dartec

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaios

Nesta etapa do trabalho foram realizados ensaios de resistência à tração paralela às fibras, resistência à tração normal às fibras e resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova de madeira maciça. Esses foram adotados como controle para a comparação com os corpos-de-prova colados, nos quais foram realizados ensaios para a determinação da resistência das emendas dentadas, resistência da lâmina de cola à tração normal e resistência ao cisalhamento na lâmina de cola.

3.2.2 Obtenção dos corpos-de-prova

Para a confecção dos corpos-de-prova a serem ensaiados, foram adquiridas seis peças de madeira (vigas) de cada espécie, com dimensões nominais de 6 cm x 12 cm x 300 cm, escolhidas aleatoriamente no estabelecimento comercial que efetuou a venda do material.

Deve ser registrado que as peças de madeira foram recebidas, no SET-LaMEM, com elevada porcentagem de umidade. Este fato obrigou a adoção de um programa de secagem para as peças, utilizando as estufas e climatizadoras disponíveis para reduzir a umidade até valores próximos a 12%, referência da NBR 7190:1997. Os tempos de secagem e climatização das espécies ficaram numa faixa entre 20 e 30 dias.

Para a espécie Envira Branca, foram extraídos nove corpos-de-prova de cada viga: três para ensaios de tração paralela às fibras (um para madeira maciça e dois para os adesivos Cascophen e resina de mamona), três para ensaios de tração normal às fibras e três para ensaios de resistência ao cisalhamento. Após a realização dos ensaios com essa espécie, os resultados apontaram a necessidade de que mais corpos-de-prova fossem confeccionados para se obter intensidades diferentes de pressão de colagem. Assim, para as outras três espécies foram extraídos onze corpos-de-prova de cada viga: cinco para ensaios de tração paralela às fibras (um para madeira maciça e quatro para os ensaios com os adesivos), três para ensaios de tração normal às fibras e três para ensaios de resistência ao cisalhamento.

Sendo previstas seis vigas por espécies, chegou-se, portanto, a um total de cinquenta e quatro corpos-de-prova preparados para a espécie Envira Branca e de sessenta e seis para as demais, totalizando duzentos e cinquenta e dois ensaios realizados.

A figura a seguir mostra uma etapa da confecção de um corpo-de-prova para ensaio de resistência à tração normal às fibras



Figura 9 - Confeção de corpo-de-prova para ensaio de tração normal

3.2.3 Preparo dos adesivos e processo de colagem

O adesivo à base fenólica (Cascophen) foi preparado de acordo com as instruções do fabricante, ou seja, uma parte em massa de catalisador para cada cinco partes em massa de adesivo. O adesivo poliuretânico obtido do processamento da mamona foi preparado de acordo com instruções dos pesquisadores do IQSC - USP, isto é, uma parte em massa de catalisador para cada parte em massa de adesivo.

O consumo de adesivo foi de 350 g/cm^3 e o tempo de aplicação de pressão foi de 10 horas para ambos os adesivos. O tempo de cura das peças coladas foi de, no mínimo, dez horas para o Cascophen e de noventa e seis horas (4 dias) para o adesivo de mamona.

A pressão de colagem foi de 0,8 MPa para todos os ensaios, com base nos trabalhos de JESUS et al. (2000). Em virtude dos primeiros resultados obtidos com a espécie Envira Branca, optou-se por adotar mais um valor de pressão de colagem para os ensaios de resistência das emendas dentadas à tração paralela às fibras para as demais espécies. Esse novo valor adotado corresponde ao dobro do valor adotado até então, ou seja, 1,6 MPa.

A figura 10 ilustra o processo de aplicação do adesivo Cascophen em um corpo-de-prova para ensaio de tração das emendas dentadas. A figura 11 mostra um dispositivo contendo corpos-de-prova submetidos à pressão para a colagem



Figura 10 – Aplicação de adesivo



Figura 11 – Processo de colagem

3.3 Planejamento estatístico

Os ensaios em madeira maciça foram realizados de modo a servirem de controle para uma análise estatística. Os resultados obtidos nos corpos-de-prova colados com os adesivos Cascophen e à base de mamona foram comparados com os resultados obtidos nos corpos-de-prova em madeira natural. Para esta comparação, foi utilizado o programa estatístico MINITAB, por meio de análise de variância das médias, sendo feitas as seguintes hipóteses:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2;$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2.$$

Chama-se, assim, μ_1 de média dos resultados dos corpos-de-prova em madeira maciça, ou seja, de controle, e μ_2 de média dos resultados dos corpos-de-prova colados. Para a verificação das hipóteses, utilizou-se o programa MINITAB, subrotina ANOVA - Dunnett's, com um nível de significância igual a 0,05, ou seja, a possibilidade de se considerar a hipótese H_0 como sendo verdadeira e esta ser falsa é de 5%.

3.4 Resultados

As tabelas seguintes apresentam as tensões obtidas para as espécies Envira Branca (*Xylopiya sp*), Cambará (*Moquinia polymorpha*), Castanheira (*Bertholetia excelsa*) e Cedrinho (*Erismia sp*). Os resultados apresentados em MPa, são referentes a madeira maciça, ao adesivo Cascophen e ao adesivo à base de resina de mamona. A coluna onde lê-se “Pressão” corresponde aos valores adotados na colagem dos corpos-de-prova, também em MPa.

Tabela 1 – Tensões médias obtidas para a Envira branca (em MPa)

	Pressão	Maciça	Cascophen	Mamona
Tração paralela	0,8	63,12	54,04	40,09
Cisalhamento	0,8	12,53	12,00	11,45
Tração normal	0,8	2,78	1,76	1,66

Tabela 2 – Tensões médias obtidas para o Cambará (em MPa)

	Pressão	Maciça	Cascophen	Mamona
Tração paralela	0,8	52,17	45,18	25,66
	1,6		47,31	43,61
Cisalhamento	0,8	14,02	13,37	10,05
Tração normal	0,8	2,48	2,47	1,15

Tabela 3 – Tensões médias obtidas para a Castanheira (em MPa)

	Pressão	Maciça	Cascophen	Mamona
Tração paralela	0,8	64,35	38,41	28,05
	1,6		36,50	19,38
Cisalhamento	0,8	10,44	7,76	6,37
Tração normal	0,8	4,84	2,86	2,84

Tabela 4 – Tensões médias obtidas para o Cedrinho (em MPa)

	Pressão	Maciça	Cascophen	Mamona
Tração paralela	0,8	40,60	33,47	37,48
	1,6		34,28	40,44
Cisalhamento	0,8	8,37	8,13	8,13
Tração normal	0,8	2,57	2,21	2,15

As figuras seguintes mostram as ruínas de alguns corpos-de-prova.

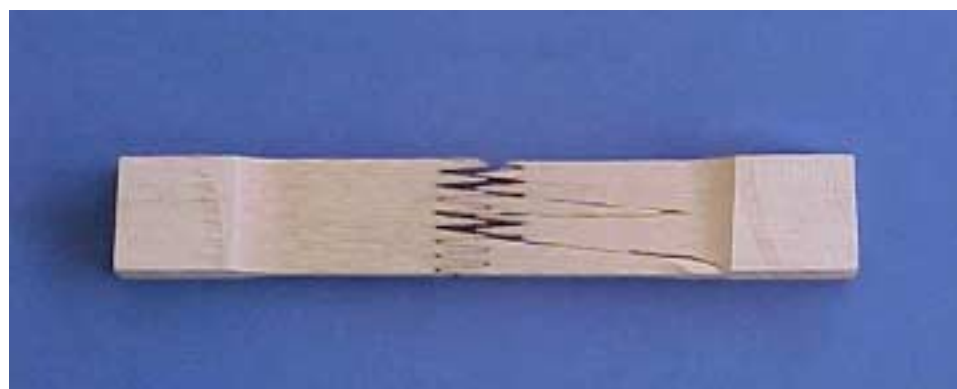


Figura 12 – Corpo-de-prova submetido a ensaio de tração paralela



Figura 13 – Corpo-de-prova submetido a ensaio de cisalhamento



Figura 14 – Corpo-de-prova submetido a ensaio de tração normal

3.5 Análise dos resultados

Para a discussão dos resultados das quatro espécies pesquisadas foram utilizados os valores calculados na análise de variância do programa MINITAB. As tabelas seguintes apresentam esses valores para cada ensaio, de cada espécie, bem como as respectivas pressões de colagem. Foram analisadas as médias dos resultados dos corpos-de-prova de madeira maciça, adotadas como controle, versus as médias dos resultados dos corpos-de-prova colados com o adesivo Cascophen e com o adesivo de mamona.

O programa estatístico fornece os valores $F_{\text{observado}}$, relações entre soma de quadrados médios das amostras, p , que é chamado de p-valor, e outros. Os valores críticos contidos na coluna f_c foram obtidos da tabela de distribuição de Fischer-Snedecor (Apêndice – tabela A.2), considerando um nível de significância de 5%.

Quando $F_{\text{observado}}$ é menor que f_c , diz-se então que as médias comparadas podem ser consideradas estatisticamente equivalentes. A quantificação dessa equivalência é representada pelo p-valor: quanto mais semelhantes forem, mais o p-valor se aproxima de 1, e quanto menos semelhantes, mais se aproxima de zero. Assim, pôde-se escolher a espécie que melhor comportamento apresentou nos ensaios realizados.

a. Envira Branca

A tabela seguinte apresenta os valores obtidos na análise de variância da espécie Envira Branca.

Tabela 5 – Análise de variância da Envira Branca

	Pressão	Maciça x Cascophen			Maciça x Mamona		
		F _{observado}	f _c	p	F _{observado}	f _c	p
Tração paralela	0,8	0,95	5,117	0,356	12,50	4,965	0,005
Cisalhamento	0,8	0,41	5,117	0,540	2,67	5,318	0,141
Tração normal	0,8	7,27	4,965	0,022	12,72	4,965	0,005

No que se refere à resistência ao cisalhamento, é possível observar que as resistências médias estão próximas, ou seja, 12,53 MPa para a madeira natural; 12,00 MPa para o adesivo Cascophen e 11,45 MPa para o adesivo à base de resina de mamona. A análise de variância das médias vem comprovar essa observação, com F_{observado} igual a 0,41, valor esse menor que f_c (5,117), com p-valor igual 0,540, na comparação madeira maciça versus Cascophen; F_{observado} menor que f_c, ou seja, 2,67 menor que 5,318, p-valor igual 0,141, em se tratando de madeira maciça versus mamona. Para os dois adesivos estudados, fica demonstrado seu bom desempenho para esta solicitação.

No que se refere à tração paralela em emendas dentadas, a resistência da madeira natural foi a maior das três determinadas, atingindo 63,12 MPa. Tal intensidade não foi atingido nem pelo adesivo Cascophen nem pelo adesivo à base de mamona, cujas resistências foram, respectivamente, 54,04 MPa e 40,09 MPa. O documento normativo DIN 68140:1971 prevê redução de 16% da resistência neste tipo de ensaio por causa da geometria do corpo-de-prova com dentes. Assim, levando-se em conta apenas este aspecto, o corpo-de-prova colado apresentaria 84% da resistência do corpo-de-prova não-colado. Para o adesivo Cascophen essa redução ficou em 85% e para a mamona esse valor foi de 63%. Na análise estatística foram apontados, para madeira maciça versus Cascophen, os valores 0,95 para F_{observado}, 5,117 para f_c e 0,356 para p-valor, indicando um bom comportamento para esse adesivo. Já o mesmo não ocorreu para madeira maciça versus mamona, com 12,50 para F_{observado},

4,695 para f_c e 0,005 para p , mostrando um mau desempenho nos ensaios com resina poliuretânica. Provavelmente isto se deve à pressão aplicada na confecção dos corpos-de-prova (0,8 MPa), que pode não ter sido suficiente para promover a adequada penetração do adesivo na madeira.

Também no caso da tração normal na lâmina de cola, a resistência da madeira natural foi a maior das três determinadas, atingindo 2,78 MPa, enquanto o adesivo Cascophen chegou a 1,76 MPa e o adesivo à base de resina de mamona a 1,66 MPa. Estatisticamente ficou comprovado o desempenho indesejável de ambos os adesivos, com $F_{\text{observado}}$ igual a 7,27, f_c igual a 4,965 e p -valor de 0,022 na comparação madeira maciça versus Cascophen. Para a madeira maciça versus mamona, os valores calculados foram 12,72 para $F_{\text{observado}}$, 4,965 para f_c e 0,005 para p -valor. Também neste caso, provavelmente isto ocorreu em razão da pressão aplicada na confecção dos corpos-de-prova (0,8 MPa) que pode não ter sido suficiente para promover a adequada penetração dos adesivos na madeira.

Esta constatação conduziu à adoção de pressão superior a 0,8 MPa na confecção dos corpos-de-prova para ensaio de tração paralela das demais espécies.

b. Cambará

A tabela 6 apresenta os resultados obtidos na análise de variância da espécie Cambará.

Tabela 6 – Análise de variância do Cambará

	Pressão	Maciça x Cascophen			Maciça x Mamona		
		$F_{\text{observado}}$	f_c	p	$F_{\text{observado}}$	f_c	p
Tração paralela	0,8	1,43	5,117	0,262	21,72	5,117	0,001
	1,6	0,56	5,117	0,473	1,63	5,117	0,233
Cisalhamento	0,8	0,18	4,965	0,678	13,76	4,965	0,004
Tração normal	0,8	0,00	4,965	0,979	8,99	4,965	0,013

Relativamente aos resultados desta espécie, pode-se concluir, de início, pela conveniência de se utilizar pressão de colagem 1,6 MPa na confecção dos corpos-de-prova para determinação da resistência das emendas à tração. Para esta pressão

foram obtidos os melhores resultados. Na madeira maciça se chegou ao valor de 52,17 MPa, enquanto para o Cascophen e para o adesivo à base de mamona os resultados foram bastante próximos, ou seja, 47,31 MPa e 43,61 MPa (91% e 84% do valor da madeira maciça). Quando analisadas suas variâncias, madeira maciça versus Cascophen apresentou o valor de 0,56 para $F_{\text{observado}}$, menor que f_c , que foi de 5,117, e p-valor de 0,473. No caso da madeira maciça versus mamona, o comportamento um pouco menos favorável, com p-valor de 0,233 e $F_{\text{observado}}$ menor que f_c , ou seja, 1,63 e 5,117. Quando adotada a pressão de 0,8 MPa, os resultados foram bem inferiores para o adesivo à base de mamona (25,64 MPa, representando 49% do valor de controle) e ligeiramente menores para o Cascophen (45,18 MPa, 87% do valor de controle). Para madeira versus mamona, $F_{\text{observado}}$ foi de 21,72, valor muito maior que f_c , que foi de 5,117, com p-valor muito baixo, tendendo a zero (0,001), evidenciando o mau desempenho desse adesivo para essa intensidade de pressão. O contrário acontece na análise da madeira maciça versus Cascophen, onde f_c foi o mesmo (5,117), mas $F_{\text{observado}}$ foi muito menor (1,43), conferindo um p-valor de 0,262, sugerindo um bom desempenho do Cascophen mesmo com uma pressão de colagem de 0,8 MPa.

No caso de resistência ao cisalhamento, o Cascophen proporcionou resultado de 13,37 MPa, muito próximo ao obtido para a madeira maciça, que atingiu 14,02 MPa. Valor inferior foi alcançado com o adesivo à base de mamona, com 10,05 MPa. Na comparação madeira maciça versus Cascophen, a situação foi favorável com $F_{\text{observado}}$ de 0,18, f_c de 4,965 e p-valor de 0,678, o mesmo não ocorrendo para a madeira maciça versus mamona, que apresentou valores de 13,76, 4,965 e 0,004 para $F_{\text{observado}}$, f_c e p-valor, respectivamente. Situação idêntica ocorreu para a resistência à tração normal, com 2,48 MPa para a madeira maciça, 2,47 MPa para o Cascophen e 1,15 MPa para o adesivo à base de mamona. Obtiveram-se $F_{\text{observado}}$ de 0,00, f_c de 4,965 e p-valor de 0,979 para madeira maciça versus Cascophen, enquanto que para a madeira maciça versus mamona os valores foram de 8,99, 4,965 e 0,013 para $F_{\text{observado}}$, f_c e p-valor.

Começa a se evidenciar um aspecto de relevante significado na definição das espécies nativas e dos adesivos a empregar na confecção de elementos estruturais de madeira laminada colada. Não é suficiente, conforme registrava MACÊDO (1997),

que a densidade da espécie esteja contida no intervalo de 0,5 a 0,75 g/cm³. É preciso considerar a compatibilização entre a madeira e o adesivo, condicionada pela permeabilidade da espécie aos adesivos. E, por sua vez, a permeabilidade está associada não somente às particularidades anatômicas da espécie como também às características de viscosidade do adesivo. Observa-se que, para o Cambará, bons resultados foram obtidos com o Cascophen, enquanto que os apresentados pelo adesivo a base de mamona não foram satisfatórios. Assim, a compatibilização da espécie com o Cascophen se mostrou mais favorável. Deve ser registrado que, segundo MAINIERI et al. (1983), o Cambará apresenta “poros visíveis somente sob lente, muito pequenos, múltiplos e solitários, obstruídos por óleo resina e tilas.” Estas peculiaridades influem na permeabilidade da espécie, tornando-a menos compatível ao adesivo à base de mamona em comparação com o Cascophen.

Por outro lado, conclui-se pela conveniência de descartar a pressão de 0,8 MPa na produção de corpos-de-prova para a avaliação da resistência à tração das emendas. Com isto, é possível reduzir o trabalho experimental sem perda da qualidade das informações.

c. Castanheira

A seguir são apresentados na tabela 7 os números obtidos na análise de variância da espécie Castanheira.

Tabela 7 – Análise de variância da Castanheira

	Pressão	Maciça x Cascophen			Maciça x Mamona		
		F _{observado}	f _c	p	F _{observado}	f _c	p
Tração paralela	0,8	22,90	4,965	0,001	29,33	4,965	0,000
	1,6	21,04	4,965	0,001	85,82	4,965	0,000
Cisalhamento	0,8	8,22	4,965	0,017	14,54	4,965	0,003
Tração normal	0,8	8,41	4,965	0,016	6,89	5,117	0,028

Com relação a esta espécie, comentários diferentes dos apresentados para a Envira Branca e para o Cambará são pertinentes.

Percebe-se que, para todas as resistências e para as duas pressões de colagem utilizadas, não foi possível alcançar, com os dois adesivos considerados, valores próximos aos da madeira maciça. No caso da resistência das emendas à tração, os melhores valores para os adesivos foram alcançados com 0,8 MPa de pressão de colagem: 38,41 MPa para o Cascophen e 28,05 MPa para o adesivo à base de mamona, contra 64,35 MPa para a madeira maciça. Desta maneira, a média das resistências obtidas com Cascophen foi 60% menor que a média de controle, com a mamona apresentando uma redução de 44%. Tais médias conduziram aos seguintes resultados: para a madeira maciça versus Cascophen, 22,90 para $F_{\text{observado}}$, 4,965 para f_c e 0,001 para p-valor; e para a madeira maciça versus mamona, os números para $F_{\text{observado}}$, f_c e p-valor são, respectivamente, 29,33, 4,965 e 0,000.

Resultados análogos foram obtidos no caso da resistência ao cisalhamento (7,76 MPa para o Cascophen e 6,37 MPa para o adesivo à base de mamona, contra 10,44 MPa para a madeira maciça), com madeira maciça contra Cascophen apresentando $F_{\text{observado}}$ de 8,22, f_c de 4,965 e p-valor de 0,017. Para a madeira maciça versus mamona obteve-se $F_{\text{observado}}$ igual 14,54, f_c igual ao adesivo resorcinol e p-valor de 0,003. A mesma situação se repete no caso da tração normal (2,86 MPa para o Cascophen e 2,84 MPa para o adesivo à base de mamona, contra 4,84 MPa para a madeira maciça), levando aos valores de $F_{\text{observado}}$ igual 8,41, f_c igual 4,965 e p-valor igual 0,016 (maciça versus Cascophen) e $F_{\text{observado}}$ igual 6,89, f_c igual 5,117 e p-valor igual 0,028 (maciça versus mamona).

Mais uma vez fica evidenciada a necessidade de ser buscada a compatibilização entre espécies e adesivos (e não apenas o intervalo de densidade) para a definição das espécies mais convenientes com vistas à produção de madeira laminada colada. Destaca-se que esta espécie apresenta, segundo MAINIEIRI et al. (1983), “poros médios a grandes, poucos, solitários e múltiplos, quase sempre obstruídos por tilas”. O número pequeno de poros e a obstrução praticamente sistemática provocada pelas tilas prejudicam a permeabilidade da espécie e, em linhas gerais, limitam grandemente seu emprego para a confecção de elementos estruturais de madeira laminada colada, com os adesivos estudados.

d. Cedrinho

A tabela 8 mostra os resultados obtidos na análise de variância da espécie Cedrinho.

Tabela 8 – Análise de variância do Cedrinho

	Pressão	Maciça x Cascophen			Maciça x Mamona		
		F _{observado}	f _c	p	F _{observado}	f _c	p
Tração paralela	0,8	1,17	4,965	0,305	0,31	4,965	0,592
	1,6	1,24	4,965	0,292	0,00	4,965	0,984
Cisalhamento	0,8	0,07	4,965	0,798	0,06	4,965	0,809
Tração normal	0,8	0,99	4,965	0,343	1,62	4,965	0,232

Relativamente aos resultados desta espécie, pode-se concluir pela conveniência de se utilizar pressão de colagem 1,6 MPa na confecção dos corpos-de-prova para determinação da resistência das emendas à tração. Para esta pressão foram obtidos os melhores resultados. Na madeira maciça se chegou ao valor de 40,60 MPa, enquanto para o Cascophen a 34,28 MPa (84% da média da maciça) e para o adesivo à base de mamona a média dos resultados foi 40,44 MPa, (99% da média do controle) bastante próxima à da madeira maciça. O F_{observado} foi de 1,24 para a madeira maciça contra o Cascophen, menor que f_c, que foi de 4,965, com p-valor igual a 0,292. Para a madeira maciça versus mamona, os resultados foram muito satisfatórios, com F_{observado} de 0,00, f_c de 4,965 e p-valor igual 0,984, muito próximo de 1, indicando serem as médias praticamente idênticas. Observa-se que os dois adesivos conduziram a resultados de resistência bastante próximos ao da madeira maciça, com vantagem para o adesivo à base de mamona. Quando adotada a pressão de 0,8 MPa os resultados foram inferiores.

No caso de resistência ao cisalhamento, o Cascophen e o adesivo à base de mamona levaram ao resultado de 8,13 MPa, muito próximo ao obtido para a madeira maciça, que atingiu 8,37 MPa. Na análise estatística, madeira versus Cascophen e madeira versus mamona apresentaram resultados bastante próximos, compartilhando o mesmo f_c, que foi de 4,965 (o mesmo para todos os ensaios com Cedrinho). Para a primeira relação, os valores foram de 0,07 para F_{observado} e 0,798 para o p-valor,

enquanto que, para a segunda análise, os números são de 0,06 e 0,809 para $F_{\text{observado}}$ e p-valor, respectivamente.

Para a resistência à tração normal, foram obtidos 2,57 MPa para a madeira maciça, 2,21 MPa para o Cascophen e 2,15 MPa para o adesivo à base de mamona. Madeira maciça versus Cascophen apresentou $F_{\text{observado}}$ igual 0,99 e p-valor igual 0,343, enquanto que madeira maciça versus mamona teve como resultados $F_{\text{observado}}$ igual 1,62 e p-valor igual 0,232.

Mais uma vez fica evidenciada a necessidade de ser buscada a compatibilização entre espécies e adesivos (e não apenas o intervalo de densidade) para a definição das madeiras mais convenientes com vistas à produção de madeira laminada colada. Destaca-se que esta espécie apresenta, segundo MAINIEIRI et al. (1983), “poros grandes, visíveis a olho nu, poucos, solitários e múltiplos, tilas de paredes finas”. O número pequeno de poros é compensado pela pequena obstrução provocada pelas tilas de paredes finas. Isto confere, à espécie, permeabilidade suficiente para viabilizar seu emprego na confecção de elementos estruturais de madeira laminada colada, com os adesivos estudados.

3.6 Conclusões preliminares

A partir da discussão dos resultados apresentados anteriormente, pode-se concluir que:

- Para a produção de elementos estruturais de madeira laminada colada não basta que a espécie apresente densidade entre 0,5 a 0,75 g/cm³, como preconizava MACÊDO (1997). Tão importante quanto a densidade é a permeabilidade da espécie em relação aos adesivos disponíveis para a produção de MLC.
- Para se verificar a compatibilidade das espécies com densidade entre 0,5 a 0,75 g/cm³ para a produção de MLC é indispensável a realização da série de ensaios recomendada pela NBR 7190:1997, os quais demonstrarão o efetivo desempenho da espécie.

- A indicação de uma determinada espécie para a produção de elementos estruturais de MLC com base apenas na sua densidade (entre 0,5 e 0,75 g/cm³) poderá levar a resultados extremamente negativos.
- Existem espécies tropicais, com densidade entre 0,5 e 0,75 g/cm³ com permeabilidade adequada para a produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. Neste trabalho merece destaque o potencial da espécie Cedrinho, entre as quatro estudadas.
- É conveniente utilizar pressão de colagem 1,6 MPa na confecção dos corpos-de-prova para determinação da resistência das emendas à tração.
- A espécie escolhida para a continuação dessa pesquisa é o Cedrinho, pois apresentou resultados estatisticamente satisfatórios nos ensaios realizados. O mesmo não se pode afirmar da espécie Envira Branca (com valores inferiores aos desejados nos ensaios de tração normal para ambos os adesivos e no ensaio de tração paralela com o adesivo à base de mamona), do Cambará (apesar do bom desempenho com o adesivo Cascophen, o mesmo não acontecendo para a resina de mamona) e da Castanheira (com resultados insatisfatórios em todos os ensaios).

CAPÍTULO 4

“É verdade que minha forma é estranha, mas culpar a mim seria o mesmo que culpar a Deus. Se eu pudesse me recriar, não falharia em cada detalhe para agradar a todos”.

Joseph Carey Merrick – o Homem-Elefante,
portador da Síndrome de Proteus

ENSAIOS PRINCIPAIS

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos empregados na experimentação principal deste trabalho. São apresentados a espécie de madeira, os tipos de adesivos, os equipamentos, a metodologia experimental e o planejamento estatístico utilizado na realização desta pesquisa.

4.1 Materiais

4.1.1 Espécie

A partir dos ensaios preliminares (capítulo 3) foi escolhida a espécie Cedrinho (figuras 15 e 16) para o desenvolvimento dessa fase da pesquisa. Além de apresentar densidade de $0,62 \text{ g/cm}^3$, situada numa faixa indicada para a produção de elementos estruturais de MLC, apresentou compatibilidade para os dois tipos de adesivos utilizados nos ensaios prescritos pela NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de

Madeira, em seu Anexo B, confirmada pelo seu desempenho às solicitações mecânicas apresentado no capítulo anterior.



Figura 15– Aspecto da madeira Cedrinho



Figura 16 – Tábuas de Cedrinho

4.1.2 Adesivos

Os adesivos utilizados na colagem dos elementos estruturais foram dois. O primeiro, à base de resorcinol, é conhecido pelo nome comercial de Cascophen, muito utilizado na produção de elementos estruturais de MLC pela indústria brasileira. É misturado com o preparado endurecedor em pó FM. O segundo é uma resina poliuretana à base de mamona, desenvolvido e produzido por pesquisadores do

Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo (IQSC – USP). Derivado do óleo da mamona, esse adesivo é do tipo bicomponente e de cura a frio, composto do prepolímero A249 e do polioliol B16030. Uma vez misturados, o tempo de utilização é em torno de 20 minutos, com sua viscosidade aumentando após esse período. A figura 17 mostra os adesivos empregados nas colagens.



Figura 17 – Adesivos utilizados nas colagens:

a – Preparado endurecedor em pó FM

b – Cascophen RS

c – Polioliol B16030

d – Prepolímero A249

4.1.3 Equipamentos

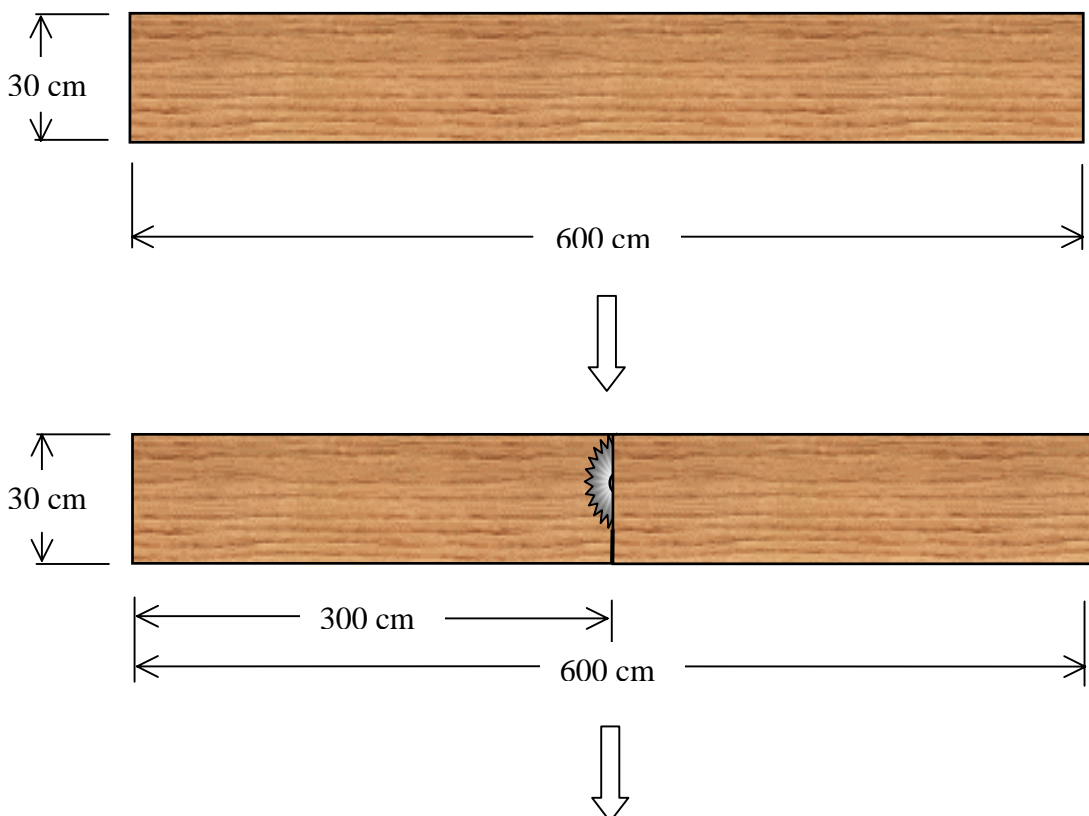
Para a obtenção das lâminas componentes das vigas, foi utilizada a serra circular da oficina do LaMEM. Suas dimensões nominais foram medidas com o auxílio de uma trena de 5 metros. Para os ensaios de flexão estática das lâminas, foram utilizados massas padronizados de 1 kg e relógio comparador com sensibilidade de 0,01 mm. Para a mistura dos adesivos, foram empregados recipientes com capacidades de aproximadamente 1 litro, balança digital para mensurar as partes a serem misturadas e pincel para distribuição nas lâminas. Um dispositivo para prensagem constituído de

guias com roscas foi montado para fornecer a pressão às vigas (figura 28). A pressão foi feita por porcas, giradas com torquímetro, este calibrado numa célula de carga. Para o ensaio de flexão estática de quatro pontos, usou-se um dispositivo montado com pistão acionado hidráulicamente, com anel dinamométrico de capacidade 20 kN. Nos métodos não-destrutivos foi utilizado o aparelho Sylvatest, ensaios de ultra-som, e o Metriguard 340-E, ensaios de vibração transversal, tanto para as vigas como também para as lâminas.

4.2 Métodos

4.2.1 Obtenção das lâminas

Foram adquiridas tábuas de dimensões nominais 2 cm x 30 cm, comprimentos que variaram entre 400 e 600 cm, no comércio madeireiro da região, e estas foram serradas de modo a se obterem lâminas de dimensões nominais 2 cm x 6 cm x 300 cm, totalizando assim 116 lâminas. O esquema a seguir mostra como foram obtidas as lâminas a partir de uma tábua cujo comprimento era de 600 centímetros.



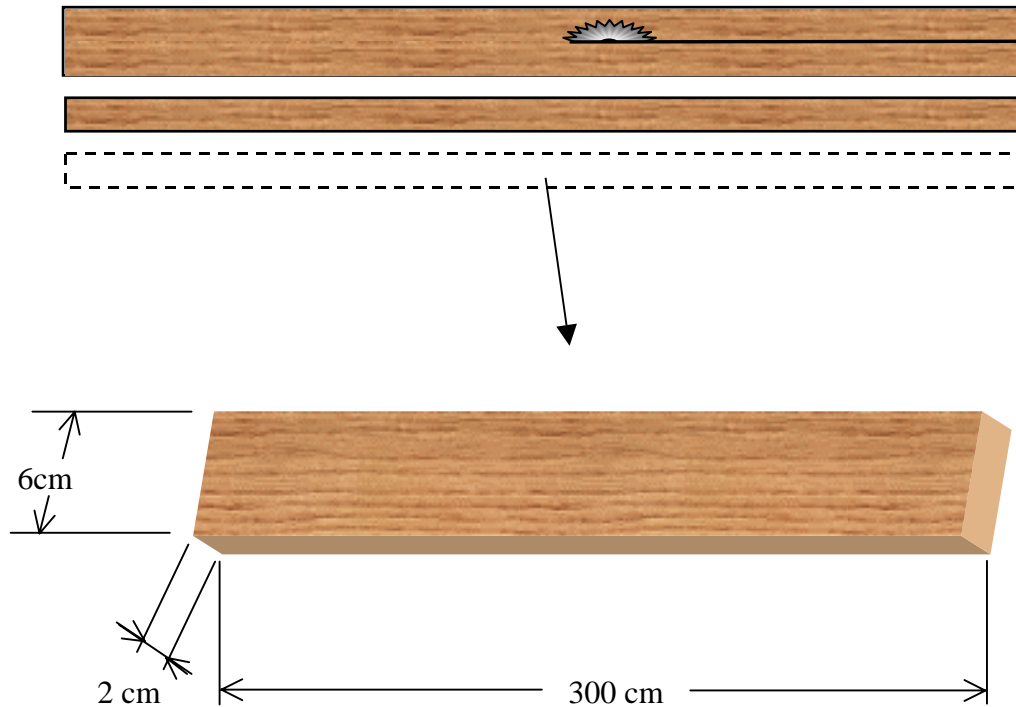


Figura 18 – Esquema de corte das tábuas para obtenção das lâminas

4.2.2 Ensaios das lâminas

Foram realizados ensaios de flexão estática nas lâminas, seguindo-se as diretrizes da NBR 7190:1997, com o objetivo de se obter seus módulos de elasticidade. Cada vez mais difundidos, os ensaios não destrutivos foram inseridos nessa pesquisa com o intuito de serem, os resultados, comparados com aqueles obtidos nos tradicionais ensaios de flexão estática normatizados. Assim, foram feitos ensaios para a determinação do módulo de elasticidade por vibração transversal e também ensaios de ultra-som para a determinação da constante dinâmica C_{LL} , e os resultados foram correlacionados com os ensaios de flexão estática.

4.2.2.1 Flexão estática nas lâminas

No ensaio para a determinação do módulo de elasticidade, por flexão estática das lâminas, foram utilizados dois apoios que permitiam rotação, massas padronizadas e um relógio comparador. O carregamento foi aplicado no meio do vão, e o deslocamento foi medido no relógio comparador na face oposta à superfície de aplicação da força. A figura a seguir apresenta o esquema do ensaio.

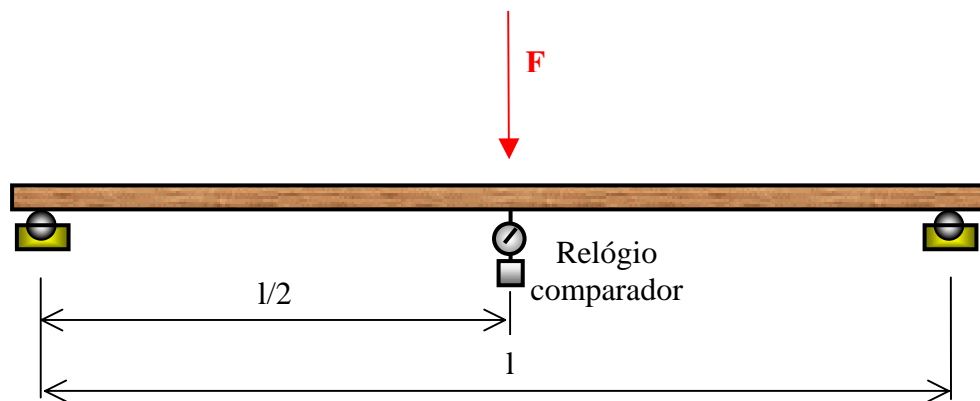


Figura 19 – Esquema de ensaio de flexão estática para as lâminas

O deslocamento é dado pela expressão:

$$a = \frac{F l^3}{48 E I} \quad (1)$$

Onde:

a = deslocamento medido em $l/2$;

F = força aplicada;

l = distância entre os apoios;

E = módulo de elasticidade da lâmina;

I = momento de inércia da lâmina.

4.2.2.2 Vibração transversal

Nos ensaios para determinação dos módulos de elasticidade por vibração transversal, foi utilizado o aparelho Metriguard Modelo 340-E. O equipamento é composto por dois tripés metálicos, uma unidade de interface, uma célula de carga, uma unidade de controle manual e cabos, sendo o sistema completado por um programa computacional. A unidade de interface recebe os sinais provenientes da célula de carga localizada sobre um dos tripés e o transmite para o computador, onde um programa calcula e transmite dados como o módulo de elasticidade, a densidade, a frequência de vibração, e outros. Como procedimento inicial, logo após a montagem do aparelho, faz-se a calibração do sistema utilizando para isso uma barra de alumínio com as dimensões, massa e módulo de elasticidade conhecidos. Após os ajustes iniciais, a peça a ser ensaiada é apoiada sobre os tripés metálicos e uma liberação é feita no programa, indicando que uma vibração pode ser produzida. Essa pode ser provocada tanto por um simples golpe manual como também por uma ferramenta manual, como um martelo, por exemplo. Durante a vibração, é feita uma leitura (ou quantas se desejarem), e o programa realiza os cálculos, com os valores expressos diretamente na tela do computador, não sendo necessárias considerações posteriores.

Na seqüência estão apresentadas algumas figuras que ilustram o ensaio.

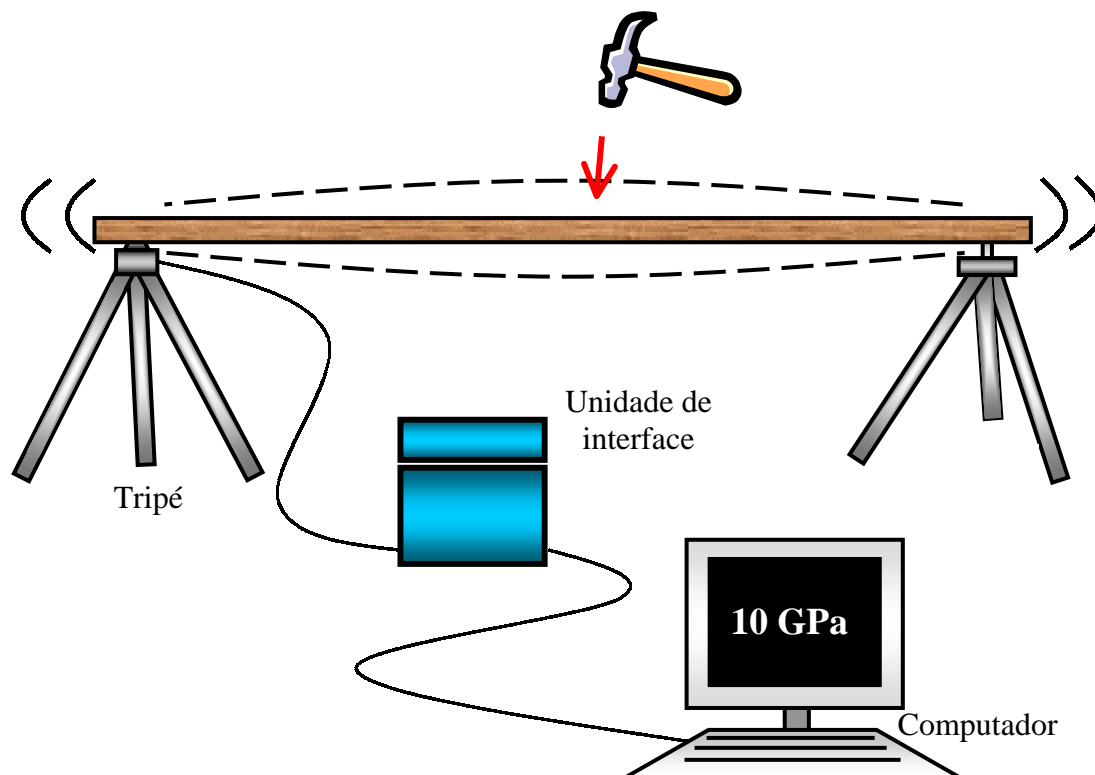


Figura 20 – Esquema do ensaio de determinação do módulo de elasticidade por meio de vibração transversal



Figura 21 – Detalhe do equipamento de vibração transversal



Figura 22 – Equipamento de vibração transversal



Figura 23 – Lâmina em ensaio



Figura 24 – Detalhe da célula de carga

4.2.2.3 Ultra-som

A madeira é considerada um material ortotrópico, possuindo três eixos de simetria elástica. Para estes materiais, os módulos de elasticidade de Young são proporcionais às constantes dinâmicas corrigidas dos coeficientes de Poisson. De acordo com Oliveira (2001), os termos da matriz de rigidez [C] podem ser determinados pelas medições com ultra-som. Assim, foi utilizado o aparelho Sylvatest para a determinação do termo C_{LL} da matriz de rigidez. O equipamento é composto por dois transdutores de 22 kHz e o aparelho propriamente dito. Os transdutores são posicionados nas extremidades da peça a ser ensaiada e, então, um deles emite ondas ultra-sônicas que percorrem o elemento, sendo recebidas pelo outro transdutor na extremidade oposta. É medida a velocidade com que a onda se propaga e então é feito o cálculo para determinação da constante dinâmica C_{LL} . Fatores como defeitos na peça, presença de nós, teor de umidade, e outros que possam influenciar a propagação da onda contribuem para que possam ocorrer problemas de leitura ou uma leitura com alguns desvios.

O cálculo da constante dinâmica é feito a partir da expressão:

$$C_{LL} = \rho \cdot v^2 \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

Onde:

C_{LL} = constante dinâmica, em MPa;

ρ = densidade aparente, em kg/m^3 ;

v = velocidade de propagação da onda, em m/s.

As figuras seguintes ilustram este tipo de ensaio e o aparelho utilizado.

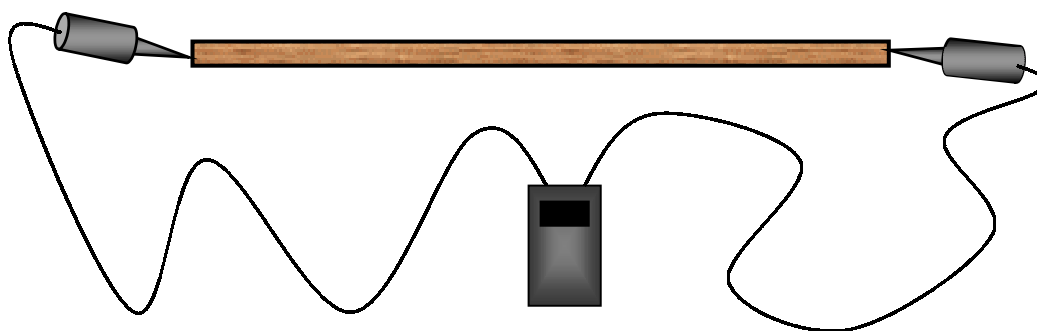


Figura 25 – Esquema de ensaio para determinação da constante dinâmica por meio de ultra-som



Figura 26 – Aparelho de ultra-som Sylvatest

a – aparelho de aquisição dos dados

b – transdutores

c – cabos

4.2.3 Critérios para a montagem dos elementos estruturais

Após a determinação dos módulos de elasticidade das lâminas, por ensaios de flexão estática, estas foram classificadas em ordem decrescente e separadas em dois lotes: um para montagem de vigas com distribuição não-aleatória de lâminas, e outro com distribuição aleatória, sendo cada elemento estrutural formado por um conjunto de seis lâminas (figura 27) sobrepostas. No total, foram formados dezesseis conjuntos (que deram origem a dezesseis vigas): oito a partir do lote de lâminas não aleatórias e oito a partir do lote de lâminas aleatórias.

Na montagem das vigas com distribuições não-aleatórias (NA), as lâminas com módulos de elasticidade mais elevados foram dispostas nas regiões mais solicitadas da peça, enquanto que as de módulos mais baixos foram colocadas nas regiões de menor solicitação. O mesmo já não ocorre na montagem dos elementos estruturais com distribuições aleatórias (A). Nestas, as lâminas de cada conjunto foram dispostas sem que critério algum de distribuição fosse seguido, garantindo assim a aleatoriedade desejada.

Para uma estimativa dos valores dos módulos de intensidade das vigas, antes que estas fossem ensaiadas foram realizados cálculos a partir da média aritmética dos valores dos módulos das lâminas que compõem a peça, de acordo com a equação:

$$E_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (3)$$

Onde $E_{\text{médio}}$ é o módulo médio aritmético estimado para a peça estrutural, E_i é o módulo da lâmina i (com i variando de 1 até n), e n é o número de lâminas que formam a viga, ou seja, igual a 6.

Com o intuito de se levar em consideração a contribuição dos módulos de elasticidade das lâminas em função de suas posições na seção da viga, calculou-se também um módulo de elasticidade médio ponderado, E_p , a partir da seguinte equação:

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (4)$$

Onde E_i e I_i são, respectivamente, o módulo de elasticidade e momento de inércia da lâmina i na seção ($i = 1, 2, \dots, n$), com $n = 6$.

Para este último cálculo, foi feita a homogeneização da seção em função do módulo de elasticidade da primeira lâmina posicionada no elemento estrutural no sentido de baixo para cima (apenas como critério) e, a partir disso, foi determinada a posição do novo centro de gravidade para a seção. Em seguida, foram calculados os momentos de inércia das seções de cada lâmina que constituem a viga e procedeu-se, então, ao cálculo da estimativa do módulo de elasticidade médio ponderado.

4.2.4 Colagem das vigas

O preparo dos adesivos seguiu as recomendações dos fabricantes, ou seja, uma parte em massa de catalisador para cada cinco partes em massa de adesivo para o Cascophen, e uma parte em massa de catalisador para cada parte em massa de adesivo para a mamona. Uma vez preparados, os adesivos foram distribuídos nas superfícies das lâminas com a utilização de pincéis (figuras 29 e 30). O consumo de adesivo foi de quatrocentos gramas de Cascophen para cada viga colada, e de trezentos e cinquenta gramas para o adesivo à base de mamona. Em seguida, as peças foram colocadas num dispositivo (figura 28) montado com eixos contendo roscas e porcas para transmitirem pressão ao elemento estrutural (figuras 32 e 33). Para a aplicação da força necessária em cada eixo, foi empregado um torquímetro (figura 31), previamente calibrado em uma célula de carga. Na união das lâminas, oito vigas foram coladas com Cascophen: quatro com intensidade de pressão 0,8 MPa e quatro com intensidade de pressão 1,2 MPa, e outras oito coladas com adesivo à base de mamona, com as mesmas intensidades de pressão. O tempo de aplicação de pressão foi de 10 horas para ambos os adesivos. O tempo de cura das peças coladas foi de, no mínimo, dez horas para o Cascophen e de noventa e seis horas (4 dias) para o adesivo

de mamona. Após a cura as vigas foram aparelhadas e então estavam prontas para serem ensaiadas (figura 34).



Figura 27 – Lâminas para montagem da peça estrutural



Figura 28 – Dispositivo para prensagem das vigas



Figura 29 – Distribuição do adesivo nas lâminas



Figura 30 – Detalhe da distribuição



Figura 31 – Aplicação da pressão com uso de torquímetro



Figura 32 – Vigas sob pressão



Figura 33 – Vigas sob pressão



Figura 34 – Vista lateral de uma viga colada.

4.2.5 Ensaio das vigas

Os ensaios realizados nas peças estruturais foram análogos aos realizados nas lâminas que as compõem. Foram determinados os módulos de elasticidade a partir da flexão estática dos elementos e por meio de vibração transversal, e também foi determinada a constante dinâmica por meio de ultra-som.

4.2.5.1 Flexão estática

Para o ensaio de flexão estática das vigas foram utilizados dois apoios que permitem rotação, um relógio comparador e, neste caso, um dispositivo montado para aplicação de forças nos terços do vão do elemento estrutural. O carregamento foi

feito por um pistão hidráulico, e a força medida por um anel dinamométrico com capacidade de 20 kN, com constante $K=1,828$ daN/divisão.

Foram aplicados três ciclos de força, com registro de medidas no último ciclo. Foram feitas seis leituras, correspondentes a 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100% de uma força que promoveria um deslocamento de aproximadamente $l/200$, e o módulo de elasticidade foi calculado a partir da média aritmética das leituras.

O deslocamento na metade do vão ($l/2$) é dado pela expressão:

$$a = \frac{F l^3}{24 E I} \left(3 \frac{l_1}{l} - 4 \frac{l_1^3}{l^3} \right) \quad (5)$$

Onde:

a = deslocamento no ponto médio da viga;

F = força aplicada num dos terços da viga;

l = distância entre os apoios da viga;

E = módulo de elasticidade da viga;

I = momento de inércia;

l_1 = distância entre o apoio e o ponto de aplicação da força.

As figuras a seguir ilustram a condução deste ensaio.

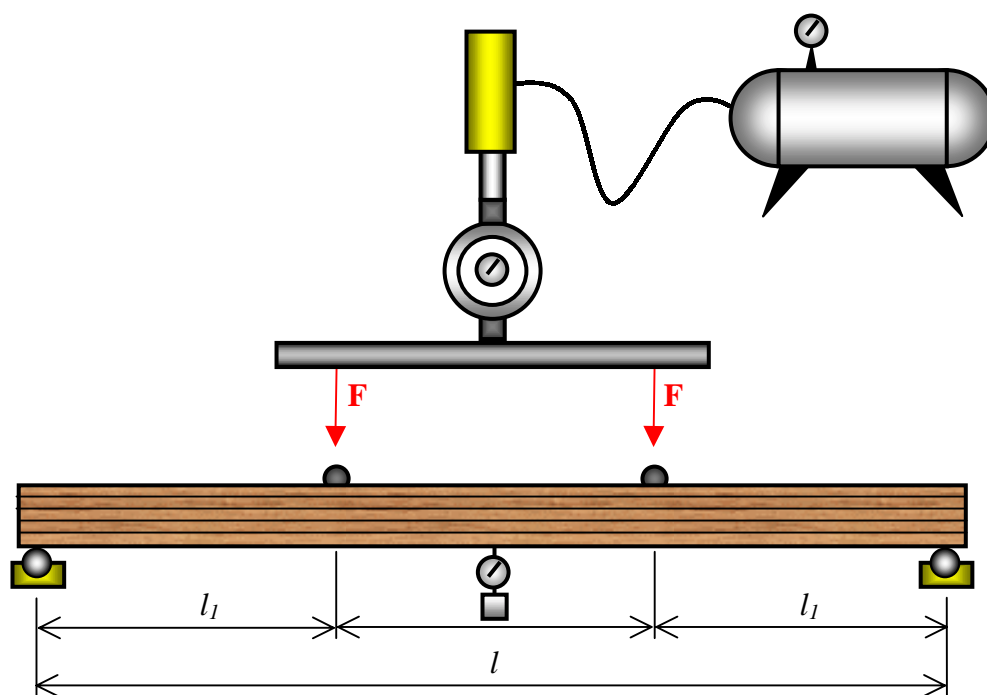


Figura 35 – Esquema de ensaio de flexão estática de 4 pontos



Figura 36 – Ensaio de flexão estática de 4 pontos em uma viga



Figura 37 – Detalhe de aplicação de força no ensaio.



Figura 38 – Vista lateral do ensaio de flexão estática.

4.2.5.2 Vibração transversal

O procedimento adotado neste ensaio foi análogo ao do ensaio das lâminas. As vigas foram dispostas sobre os cavaletes e golpes de martelo foram aplicados para produzirem vibrações. O programa forneceu, então, os resultados solicitados.

As figuras seguintes mostram algumas etapas deste ensaio.



Figura 39 – Elemento estrutural preparado para ensaio de vibração transversal



Figura 40 – Viga sofrendo impacto em ensaio de vibração transversal

4.2.5.3 Ultra-som

No ensaio de ultra-som, os transdutores foram posicionados nas extremidades das vigas e, então, foram efetuadas três leituras dos valores do tempo que as ondas demoraram pra percorrer toda a extensão das peças. Considerando a expressão (2) foram calculadas as constantes dinâmicas das vigas, utilizando uma média de três leituras de tempo de propagação. A figura seguinte ilustra o ensaio.

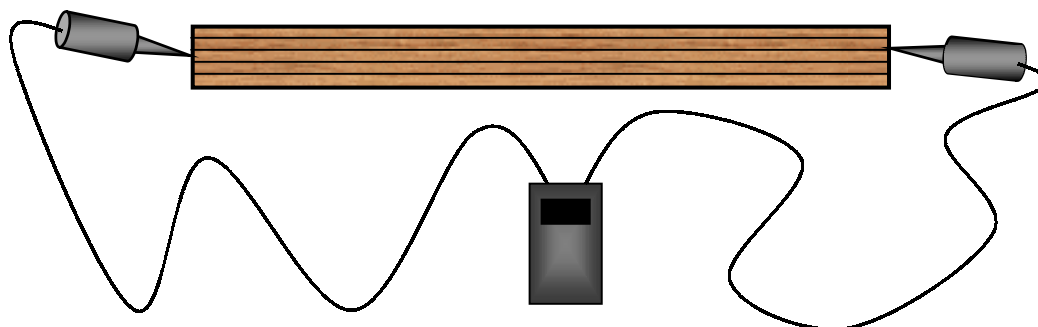


Figura 41 – Esquema de ensaio de ultra-som em viga de MLC

4.2.6 Planejamento estatístico

Neste trabalho desejou-se determinar a influência das variáveis (adesivo, pressão de colagem e distribuição das lâminas) no comportamento da peça. Para isso, foi feito um planejamento fatorial 2^3 , com dois adesivos (Cascophen e à base de mamona), duas intensidades de pressão de colagem (0,8 e 1,2 MPa) e dois tipos de distribuições de lâminas (aleatória e não aleatória).

Adotou-se representar os fatores por letras maiúsculas (D, A e P para distribuição, adesivo e pressão, respectivamente) e seus níveis por números (-1 e 1), como normalmente são representados. Para uma viga com distribuição não aleatória, colada com adesivo de mamona sob uma pressão de 0,8 MPa, tem-se, por exemplo, as seguintes representações: D = -1 A = 1 P = -1.

A tabela 9 mostra a matriz modelo de planejamento para o caso em questão.

Tabela 9 – Matriz planejamento para análise estatística

Ensaio	Variáveis			Resposta
	D	A	P	y ₁
1	-1	-1	-1	
2	-1	-1	-1	
3	1	-1	-1	
4	1	-1	-1	
5	-1	1	-1	
6	-1	1	-1	
7	1	1	-1	
8	1	1	-1	
9	-1	-1	1	
10	-1	-1	1	
11	1	-1	1	
12	1	-1	1	
13	-1	1	1	
14	-1	1	1	
15	1	1	1	
16	1	1	1	

A análise da influência dos efeitos, isolados e também interagindo entre si, sobre a variável resposta (módulo de elasticidade) da peça foi feita com o emprego do programa estatístico MINITAB, e a sub-rotina DOE/fatorial. Com a finalidade de comparar os valores obtidos nos ensaios com os valores calculados, também foi feita uma análise de variância das médias, usando o programa citado e a sub-rotina ANOVA.

CAPÍTULO 5

“O que caracteriza as pessoas que exibem exageradamente a sua virtude é que, quanto menos ameaçada está a fortaleza, mais guardas lhe põem”.

Victor Hugo

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os valores obtidos nos ensaios conduzidos nas lâminas de Cedrinho e também nas peças estruturais. São mostrados os valores de módulos de elasticidade obtidos por ensaios de flexão estática e vibração transversal, e das constantes dinâmicas obtidas por ultra-som. São estudados os resultados dos ensaios por intermédio de correlações para as lâminas, e pela análise do planejamento fatorial, correlações e análises de variância das médias para as vigas. Na análise de variância, o valor calculado pelo programa MINITAB ($F_{\text{observado}}$) tem que ser inferior ao valor crítico tabelado ($f_{\text{crítico}}$), determinado em função dos graus de liberdade. Atendida essa condição, analisa-se então o p-valor, que quanto mais se aproximar de 1, mais semelhantes são as médias avaliadas. Para a análise fatorial, observa-se diretamente o p-valor. Se este for menor que o nível de significância 0,05 ($\alpha=0,05$), afirma-se que a variável estudada influencia significativamente no resultado final, com uma intensidade mostrada pelo valor apresentado na coluna “efeito”. Para a correlação, estuda-se o valor encontrado para R^2 , sendo que quanto mais próximo de 1 estiver esse valor, mais os números envolvidos estão relacionados. É importante ressaltar que o ensaio de flexão estática foi realizado em

todas as lâminas (cento e treze lâminas no total, pois três se quebraram), o mesmo não acontecendo para os ensaios não destrutivos, nos quais oitenta e uma lâminas foram submetidas aos procedimentos técnicos. A justificativa para este fato é que quando foram sugeridos os dois últimos métodos de ensaios pela Comissão Examinadora do Exame de Qualificação, quatro vigas já haviam sido construídas, estando então suas lâminas coladas, impossibilitando assim os ensaios individuais.

5.1 Valores obtidos nos ensaios com as lâminas

5.1.1 Flexão estática

A tabela 10 apresenta o números de identificação (L) das lâminas e seus respectivos módulos de elasticidade (em daN/cm²), calculados pela expressão (1). Apresenta também a média (M) dos valores, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 10 – Módulos de elasticidade das lâminas obtidos por flexão estática

L	E	L	E	L	E	L	E
1	118062	30	108885	59	139692	88	160616
2	125161	31	93656	60	140909	89	93366
3	99876	32	102758	61	97737	90	83825
4	129251	33	139201	62	81737	91	108340
5	96465	34	94132	63	80874	92	113704
6	130531	35	98154	64	102536	93	100298
7	153298	36	114841	65	88001	94	100298
8	111548	37	106334	66	91143	95	91873
9	90928	38	96912	67	106334	96	92988
10	153298	39	108340	68	76560	97	104877
11	129608	40	92242	69	98154	98	117785
12	126348	41	102996	70	96912	99	86023
13	96315	42	96912	71	96505	100	78928
14	113002	43	93748	72	97737	101	93748
15	111298	44	85067	73	146294	102	113144
16	87155	45	100298	74	126896	103	82619
17	116798	46	82619	75	114841	104	82323
18	95934	47	107832	76	92988	105	91143
19	115456	48	84753	77	105358	106	105844
20	111298	49	82619	78	91507	107	80590
21	122076	50	82029	79	103928	108	83825
22	84353	51	106334	80	80874	109	89719
23	105535	52	106334	81	119626	110	140909
24	120789	53	92242	82	118392	111	69812
25	101828	54	90783	83	100737	112	91873
26	148810	55	98154	84	121525	113	76053
27	156327	56	85633	85	90783		
28	125952	57	96212	86	83521	M	103966
29	111548	58	104817	87	77858	DP	19346
						CV	0,19

5.1.2 Vibração transversal

A tabela 11 apresenta o número de identificação (L) das lâminas e seus respectivos módulos de elasticidade (em daN/cm²), obtidos nos ensaios de vibração transversal,

pela leitura direta da saída dos dados. Apresenta, também, a média (M) dos valores, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 11 – Módulos de elasticidade das lâminas, obtidos por vibração transversal

L	E_{vt}	L	E_{vt}	L	E_{vt}	L	E_{vt}
33	132700	55	92000	77	93000	99	82000
34	94300	56	72900	78	85000	100	70900
35	94200	57	90300	79	90600	101	85000
36	106300	58	98700	80	72400	102	102000
37	99900	59	123400	81	103300	103	74700
38	96900	60	131400	82	105800	104	75800
39	96500	61	92400	83	88800	105	90900
40	89500	62	86200	84	108000	106	95500
41	93900	63	80200	85	84800	107	73600
42	95300	64	91500	86	75000	108	73700
43	78200	65	84700	87	73100	109	82000
44	80000	66	86400	88	141200	110	132600
45	95400	67	98100	89	82600	111	73900
46	83200	68	77600	90	76700	112	85000
47	105900	69	89000	91	94500	113	83700
48	77600	70	87700	92	103700		
49	81900	71	82900	93	101700		
50	83600	72	87700	94	90000		
51	103300	73	134400	95	81700		
52	95300	74	117700	96	88400	M	92286
53	86000	75	106400	97	99700	DP	15248
54	84600	76	86500	98	101300	CV	0,17

5.1.3 Ultra-som

A tabela 12 apresenta o números de identificação (L) das lâminas e suas respectivas constantes dinâmicas C_{LL} (em daN/cm²), calculadas através da expressão (2). Apresenta também a média (M) dos valores, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 12 – Constantes dinâmicas das lâminas obtidas por ultra-som

L	C _{LL}	L	C _{LL}	L	C _{LL}	L	C _{LL}
33	169094	55	130570	77	114342	99	108456
34	117506	56	89865	78	107384	100	98354
35	120517	57	112053	79	112619	101	112858
36	128890	58	163183	80	109181	102	130329
37	128447	59	151936	81	126439	103	96204
38	126202	60	157963	82	131872	104	103293
39	123440	61	121611	83	118256	105	114951
40	106062	62	111979	84	135739	106	124396
41	113927	63	100062	85	112299	107	101224
42	126853	64	116138	86	93588	108	94573
43	101707	65	115318	87	95216	109	111131
44	99262	66	117222	88	176934	110	165191
45	118597	67	122557	89	108556	111	90283
46	107053	68	113617	90	101037	112	117184
47	127935	69	112265	91	126136	113	110400
48	99942	70	112463	92	129582		
49	109843	71	104988	93	124370		
50	111676	72	116834	94	115326		
51	131993	73	163133	95	110377		
52	122362	74	141944	96	117518	M	118830
53	109760	75	129812	97	125232	DP	17862
54	108826	76	113041	98	125938	CV	0,15

5.1.4 Análises dos resultados obtidos para as lâminas

Neste subitem são feitas as correlações para os resultados encontrados nos ensaios. Os valores obtidos nos ensaios de flexão estática são correlacionados com os valores obtidos nos ensaios não-destrutivos. Para esta avaliação, foram estudadas 81 lâminas com identificação a partir do número 33, uma vez que as 32 primeiras lâminas não foram ensaiadas por vibração transversal e nem por ultra-som, conforme já mencionado. A média dos valores das 81 lâminas foi de 99432 daN/cm², com desvio padrão de 17541 daN/cm² e coeficiente de variação de 0,18.

Na seqüência, são apresentados o gráfico comparativo das médias (figura 42) e as correlações feitas para flexão estática versus vibração transversal, flexão estática versus ultra-som e vibração transversal versus ultra-som.

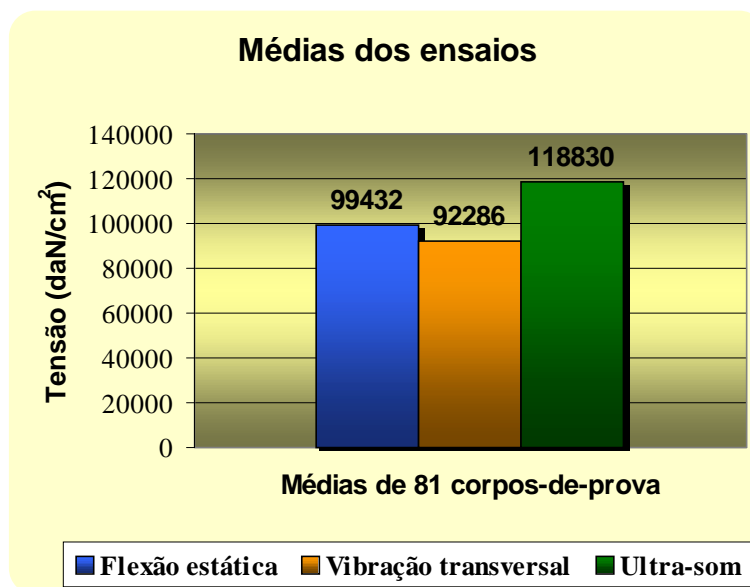


Figura 42 – Médias dos ensaios

5.1.4.1 Flexão estática versus vibração transversal

Neste estudo foi realizada a correlação dos valores encontrados nos ensaios de flexão estática e de vibração transversal. A figura 43 mostra os resultados obtidos.

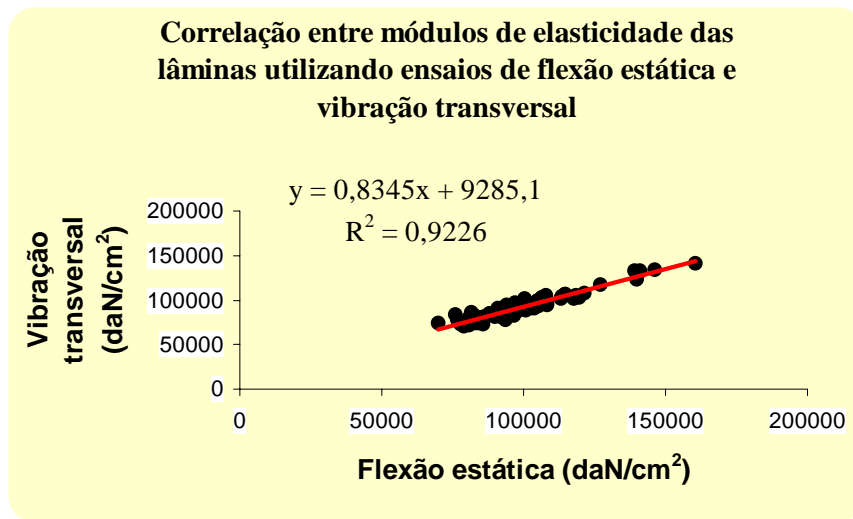


Figura 43 – Correlação para as lâminas: flexão x vibração

Nesta avaliação obteve-se o valor de 0,9226 para R^2 , muito próximo de 1, indicando uma forte correlação entre os valores de módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão estática e de vibração transversal.

5.1.4.2 Flexão estática versus ultra-som

Aqui o mesmo procedimento é repetido para a correlação entre os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática e de ultra-som. A seguir os dados são apresentados.

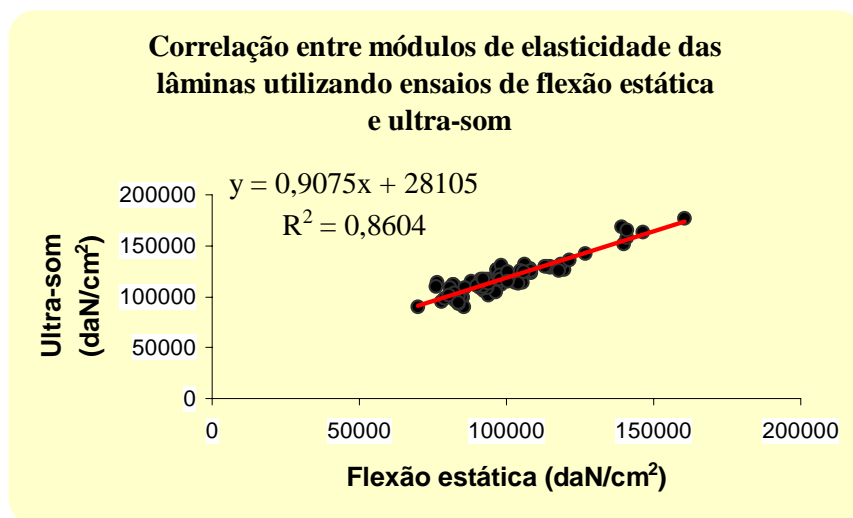


Figura 44 – Correlação para as lâminas: flexão x ultra-som

Para esta correlação, o valor encontrado para R^2 foi de 0,8604, indicando uma boa correlação para os valores obtidos nos ensaios de flexão estática das lâminas e de ultra-som.

5.1.4.3 Vibração transversal versus ultra-som

Aqui é feita a correlação para os valores obtidos nestes ensaios, com a figura seguinte mostrando os resultados.

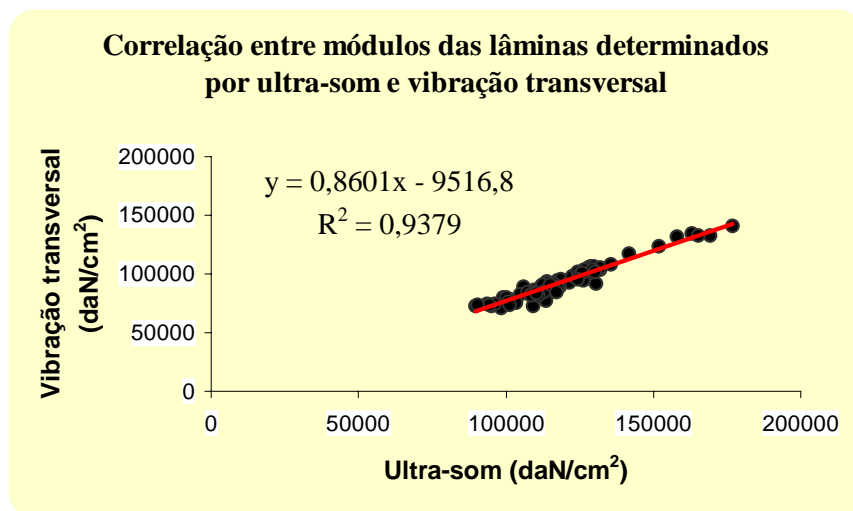


Figura 45 – Correlação para as lâminas: ultra-som x vibração

Neste caso obteve-se o maior valor para o parâmetro R^2 , ou seja, 0,9379. Tal resultado, muito próximo de 1, indica uma forte correlação entre os valores obtidos nos ensaios de ultra-som e de vibração transversal.

5.2 Resultados obtidos para as vigas

A partir dos valores dos módulos de elasticidade das lâminas (tabela 10), procedeu-se à distribuição dessas para a construção das vigas. Como já citado anteriormente, as peças estruturais foram moldadas com dois tipos de distribuição de lâminas, dois tipos de adesivos e duas intensidades de pressão de colagem. Foi adotada uma simbologia para a identificação das vigas:

NA – montadas com distribuição não-aleatória de lâminas;

A – montadas com distribuição aleatórias de lâminas;

1 – réplica número 1;

2 – réplica número 2;

C – coladas com adesivo Cascophen;

M – coladas com adesivo à base de mamona;

0,8 – viga colada com intensidade de pressão de 0,8 MPa;

1,2 – viga colada com intensidade de pressão de 1,2 MPa.

Assim, por exemplo, uma peça montada com distribuição não-aleatória de lâminas, sendo a primeira de duas réplicas colada com Cascophen, e unida com pressão de 0,8 MPa, tem a seguinte identificação: NA 1 C 0,8.

As médias calculadas foram obtidas de acordo com as equações (3) para média aritmética simples e (4) para média ponderada. A seguir, são apresentados os cálculos para a viga A 1 C 0,8.

76	92988
73	146294
37	106334
82	118392
45	100298
36	114841

Figura 46 – Esquema da viga sem colar

A figura ao lado ilustra o esquema de montagem da viga A 1 C 0,8. Os números no interior da seção correspondem aos números de identificação das lâminas que formam a peça estrutural, e os números laterais à seção são os valores dos módulos de elasticidade das lâminas. Assim, a lâmina número 76 possui módulo de elasticidade 92.988 daN/cm².

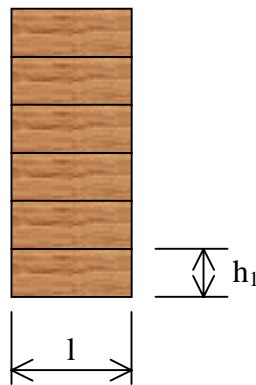
Como resultado da média aritmética simples obteve-se:

$$E_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

$$E_{\text{médio}} = \frac{92988 + 146294 + 106334 + 118392 + 100298 + 114841}{6} = 113191 \text{ daN} / \text{cm}^2$$

Para o cálculo da média ponderada foram feitas as seguintes etapas:

1) Determinação de uma nova posição do centro de gravidade:



$$l = 5,7 \text{ cm} \quad h_1 = 1,9 \text{ cm}$$

$$l_2 = E_1/E_2 * l = 114841/100298 * 5,7 = 6,5 \text{ cm}$$

$$l_3 = E_1/E_3 * l = 114841/118392 * 5,7 = 5,5 \text{ cm}$$

$$l_4 = E_1/E_4 * l = 114841/106334 * 5,7 = 6,2 \text{ cm}$$

$$l_5 = E_1/E_5 * l = 114841/146294 * 5,7 = 4,5 \text{ cm}$$

$$l_6 = E_1/E_6 * l = 114841/92988 * 5,7 = 7,0 \text{ cm}$$

2) Cálculo das novas áreas das seções:

$$A_1 = l * h_1 = 5,7 * 1,9 = 10,8 \text{ cm}^2;$$

$$A_4 = l_4 * h_1 = 6,2 * 1,9 = 11,8 \text{ cm}^2;$$

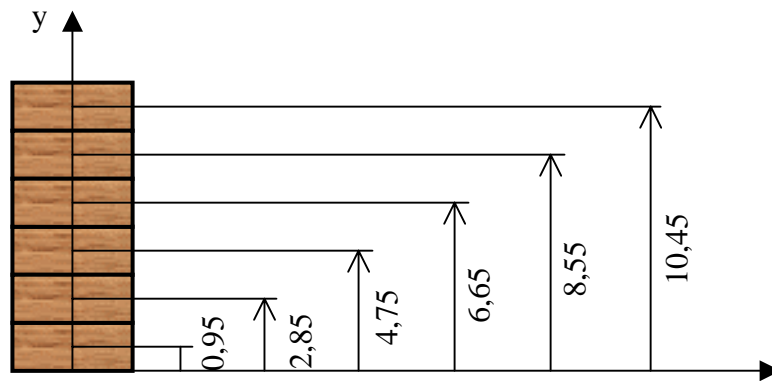
$$A_2 = l_2 * h_1 = 6,5 * 1,9 = 12,4 \text{ cm}^2;$$

$$A_5 = l_5 * h_1 = 4,5 * 1,9 = 8,5 \text{ cm}^2;$$

$$A_3 = l_3 * h_1 = 5,5 * 1,9 = 10,5 \text{ cm}^2;$$

$$A_6 = l_6 * h_1 = 7,0 * 1,9 = 13,3 \text{ cm}^2.$$

3) Nova posição do centro de gravidade:



$$y_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i}{A_i} \longrightarrow y_{cg} = 5,73 \text{ cm}$$

$$I_i = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_{cg} - y_i)^2$$

- $I_1 = 251 \text{ cm}^4$
- $I_2 = 93 \text{ cm}^4$
- $I_3 = 14 \text{ cm}^4$
- $I_4 = 12 \text{ cm}^4$
- $I_5 = 89 \text{ cm}^4$
- $I_6 = 245 \text{ cm}^4$

4) Determinação da média do módulo de elasticidade ponderada:

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

$$E_p = \frac{114841 \cdot 251 + 100298 \cdot 93 + 118392 \cdot 14 + 106334 \cdot 12 + 146294 \cdot 89 + 92988 \cdot 245}{251 + 93 + 14 + 12 + 89 + 245}$$

$$E_p = 109237 \text{ daN} / \text{cm}^2$$

Assim, para a viga A 1 C 0,8 foram determinados os valores de 113.191 daN/cm² para a média aritmética simples e de 109.237 daN/cm² para a média ponderada. Este procedimento foi feito para as 16 vigas.

5.2.1 Disposição das lâminas nas vigas

As distribuições das lâminas nas seções das vigas são mostradas nos esquemas seguintes. Destacado na cor laranja, tem-se o número da lâmina e, ao lado, o valor do módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio de flexão estática da mesma, em daN/cm².

NA 1 C 0,8

28	125952
15	111298
31	93656
25	101828
1	118062
27	156327

47-a)

NA 2 C 0,8

4	129251
8	111548
13	96315
23	105535
21	122076
10	153298

47 b)

NA 1 M 0,8

12	126348
29	111548
18	95934
32	102758
24	120789
26	148810

47 c)

NA 2 M 0,8

11	129608
	113002
3	99876
	108885
	125161
	153298

47 d)

NA 1 C 1,2

106	105844
57	96212
65	88001
112	91873
55	98154
33	139201

47 e)

NA 2 C 1,2

41	102996
96	92988
44	85067
9	90928
38	96912
20	111298

47 f)

NA 1 M 1,2

58	104817
101	93748
99	86023
66	91143
61	97737
102	113144

47 g)

NA 2 M 1,2

93	100298
53	92242
22	84353
85	90783
70	96912
	106334

47 h)

A 1 C 0,8		A 2 C 0,8		A 1 M 0,8		A 2 M 0,8	
76	92988	97	104877	83	100737	92	113704
73	146294	88	160616	43	93748	49	82619
37	106334	84	121525	60	140909	110	140909
82	118392	91	108340	108	83825	74	126896
45	100298	34	94132	39	108340	51	106334
36	114841	17	116798	81	119626	35	98154
47 i)		47 j)		47 k)		47 l)	

A 1 C 1,2		A 2 C 1,2		A 1 M 1,2		A 2 M 1,2	
78	91507	90	83825	72	97737	95	91873
69	98154	40	92242	48	84753	109	89719
56	85633	64	102536	75	114841	86	83521
77	105358	42	96912	105	91143	71	96505
5	96465	54	90783	79	103928	67	106334
59	139692	47	107832	89	93366	94	100298
47 m)		47 n)		47 o)		47 p)	

Figura 47 – Distribuição das lâminas nas vigas

5.2.2 Valores calculados

A tabela 13 apresenta a identificação da viga, sua média aritmética simples para o módulo de elasticidade ($E_{\text{médio}}$), o desvio padrão da mesma (DP) e seu coeficiente de variação (CV), mostrando também a média ponderada (E_p) e a diferença, em porcentagem, da relação entre a média ponderada e a média simples. Vale ressaltar que $E_{\text{médio}}$ e E_p (expressos em daN/cm^2) são valores calculados para estimação dos números a serem obtidos nos ensaios.

Tabela 13 – Resultados calculados obtidos para as vigas

Viga	$E_{\text{médio}}$	DP	CV	E_p	Diferença*
NA 1 C 0,8	117854	22051	0,19	133592	13,35%
NA 2 C 0,8	119671	20197	0,17	134209	12,15%
NA 1 C 1,2	103214	18637	0,18	115724	12,12%
NA 2 C 1,2	96698	9330	0,10	103420	6,95%
NA 1 M 0,8	117698	18905	0,16	131264	11,53%
NA 2 M 0,8	121638	18916	0,16	135090	11,06%
NA 1 M 1,2	97769	9840	0,10	104932	7,33%
NA 2 M 1,2	95154	7730	0,08	100580	5,70%
A 1 C 0,8	113191	18692	0,17	109237	-3,49%
A 2 C 0,8	117715	23086	0,20	116037	-1,42%
A 1 C 1,2	102802	19243	0,19	112452	9,39%
A 2 C 1,2	95688	8632	0,09	95445	-0,25%
A 1 M 0,8	107864	20290	0,19	108181	0,29%
A 2 M 0,8	111436	20716	0,19	103992	-6,68%
A 1 M 1,2	97628	10602	0,11	95523	-2,16%
A 2 M 1,2	94708	8096	0,09	96880	2,29%

* Diferença, em porcentagem, de $E_p / E_{\text{médio}}$

Estudando os dados calculados mostrados, percebe-se que todas as vigas montadas com distribuição não-aleatória de lâminas (NA) apresentam os valores da média ponderada maiores que os valores da média aritmética simples. A diferença variou de 5,70% a 13,35%. Tal fato se explica pelas distribuições de lâminas com maiores módulos de elasticidade nas regiões mais solicitadas da peça, sendo que estas últimas têm maior contribuição no momento de inércia final do elemento estrutural. Para as vigas com distribuição aleatória pode-se dizer que não existe um padrão: três tiveram os valores dos módulos de elasticidade ponderados acima dos valores obtidos com a média simples, e as demais apresentaram valores de E_p abaixo dos valores de $E_{\text{médio}}$.

5.2.3 Valores obtidos nos ensaios

Assim como com as lâminas, as vigas tiveram seus módulos de elasticidade determinados por meio de ensaios de flexão estática e de vibração transversal, e suas constantes dinâmicas por meio de ultra-som.

5.2.3.1 Flexão estática

Foram realizados ensaios de quatro pontos nas peças estruturais, seguindo-se o esquema da figura 35 e os parâmetros genéricos da NBR 7190:1997 e ASTM D198:1984. As vigas montadas com suas lâminas distribuídas aleatoriamente foram ensaiadas duas vezes, ora com determinada lâmina voltada para baixo, ora com determinada lâmina voltada para cima. Isso foi feito com o objetivo de estudar o comportamento da peça em ambas as situações, pois poderia acontecer, pela aleatoriedade, dos módulos estarem “desbalanceados”, ou seja, um lado da viga ser mais resistente às ações do que outro lado. O mesmo procedimento foi repetido para a viga NA 1 C 1,2 (escolhida ao acaso para representar as não-aleatórias) para confirmar que esta tivesse um comportamento parecido em ambas as situações de solicitação. Os valores dos módulos (em daN/cm²) são apresentados na tabela 14 e foram calculados pela expressão (5).

Tabela 14 – Valores obtidos por ensaios de flexão estática

Viga	Particularidade	E
NA 1 C 0,8	lâmina 27 embaixo	115435
NA 2 C 0,8	lâmina 10 embaixo	119658
NA 1 C 1,2	lâmina 33 embaixo	116615
	lâmina 33 em cima	114759
NA 2 C 1,2	lâmina 20 embaixo	100174
NA 1 M 0,8	lâmina 26 embaixo	108349
NA 2 M 0,8	lâmina 07 embaixo	112474
NA 1 M 1,2	lâmina 102 embaixo	123071
NA 2 M 1,2	lâmina 52 embaixo	108364
A 1 C 0,8	lâmina 36 embaixo	106119
	lâmina 36 em cima	105802
A 2 C 0,8	lâmina 17 embaixo	117518
	lâmina 17 em cima	121393
A 1 C 1,2	lâmina 59 embaixo	113120
	lâmina 59 em cima	114040
A 2 C 1,2	lâmina 47 embaixo	98689
	lâmina 47 em cima	97463
A 1 M 0,8	lâmina 81 embaixo	102557
	lâmina 81 em cima	104086
A 2 M 0,8	lâmina 35 embaixo	105055
	lâmina 35 em cima	102149
A 1 M 1,2	lâmina 89 embaixo	87134
	lâmina 89 em cima	89277
A 2 M 1,2	lâmina 94 embaixo	97574
	lâmina 94 em cima	96560

Sentido de aplicação da força



Lâmina em cima



Lâmina embaixo

Os valores destacados em negrito foram os adotados para uso do programa estatístico para a análise dos dados, sendo o critério para a escolha desses números a posição da lâmina (embaixo) na seção da viga. Como diferença percentual entre o valor do módulo de elasticidade da lâmina posicionada embaixo em relação ao valor da lâmina posicionada em cima, tem-se para a viga NA 1 C 1,2 o valor de 1,6%, e para as demais, que apresentam distribuição aleatória, os percentuais tiveram uma variação entre -3,2% a 2,8%. Em todos os casos, os valores percentuais foram muito

baixos, e a diferença pode ser explicada pela baixa heterogeneidade do material de cada uma das lâminas ensaiadas.

5.2.3.2 Vibração transversal

No ensaio de vibração transversal, os valores dos módulos de elasticidade das peças foram obtidos diretamente, ou seja, o programa computacional que compõe o aparelho fornece os números já calculados. Na tabela seguinte são apresentados os valores de módulo de elasticidade para cada viga, obtidos na saída de dados.

Tabela 15 – Valores obtidos nos ensaios de vibração transversal

Viga	$E_{v.t.}^1$
NA 1 C 0,8	109300
NA 2 C 0,8	108500
NA 1 C 1,2	110900
NA 2 C 1,2	104300
NA 1 M 0,8	100200
NA 2 M 0,8	98300
NA 1 M 1,2	114300
NA 2 M 1,2	98900
A 1 C 0,8	108700
A 2 C 0,8	117600
A 1 C 1,2	115800
A 2 C 1,2	99900
A 1 M 0,8	107900
A 2 M 0,8	102100
A 1 M 1,2	92300
A 2 M 1,2	105400

1) Valores em daN/cm²

5.2.3.3 Ultra-som

As respostas apresentadas na tabela 16 foram calculadas pela equação (2). O aparelho forneceu o tempo utilizado pela onda para percorrer as dimensões longitudinais das peças, medido em micro-segundos.

Tabela 16 – Valores obtidos em ensaios por ultra-som

Viga	Densidade ⁽¹⁾	Leitura*	C _{LL} ⁽²⁾
NA 1 C 0,8	600	673	112950
NA 2 C 0,8	592	658	116583
NA 1 C 1,2	697	719	119731
NA 2 C 1,2	665	741	107552
NA 1 M 0,8	596	693	105815
NA 2 M 0,8	615	685	111753
NA 1 M 1,2	710	715	123333
NA 2 M 1,2	695	746	110902
A 1 C 0,8	710	705	126856
A 2 C 0,8	682	680	130978
A 1 C 1,2	683	731	113506
A 2 C 1,2	684	750	107986
A 1 M 0,8	703	729	117472
A 2 M 0,8	718	694	132385
A 1 M 1,2	690	746	110104
A 2 M 1,2	699	764	106346

1) Valores em kg/m³

* Média de 3 leituras

2) Valores em daN/cm²

5.2.4 Análise dos resultados

Para verificação da influência das variáveis (distribuição, adesivo e pressão) nas respostas (módulos de elasticidade) das vigas, foi feita uma análise estatística fatorial. As respostas adotadas foram as obtidas nos ensaios de flexão estática de quatro pontos. Para comparação dos métodos de ensaios e também destes em relação aos valores calculados, foram feitas correlações dos valores e análises de variância das médias dos módulos das dezesseis vigas. Tanto a análise fatorial como a análise de variância foram feitas no programa MINITAB.

5.2.4.1 Análise fatorial

Com uso da sub-rotina DOE/fatorial, fez-se a verificação das influências dos efeitos principais, avulsos e também relacionados, sobre as respostas. Mas para que estas análises sejam feitas, é preciso fazer uma verificação da adequabilidade do modelo, ou seja, verificar se as suposições de igualdade de variância e de normalidade se cumprem. Essa verificação pode ser feita por análises de gráficos. A tabela 17 traz, na coluna resposta, os resultados obtidos nos ensaios, as colunas distribuição, adesivo e pressão compõem a matriz planejamento fatorial, e nas três últimas colunas são mostrados os valores estimados, os resíduos e os escores normais.

Tabela 17 – Resultados obtidos nos ensaios, matriz planejamento, valores estimados, resíduos e escores normais.

Resposta	Distribuição	Adesivo	Pressão	Estimados	Resíduos	E. normais
115435	-1	-1	-1	117547	-2111,36	-0,39573
119658	-1	-1	-1	117547	2111,36	0,39573
106119	1	-1	-1	111819	-5699,39	-0,76184
117518	1	-1	-1	111819	5699,39	0,76184
108349	-1	1	-1	110411	-2062,69	-0,23349
112474	-1	1	-1	110411	2062,69	0,23349
102557	1	1	-1	103806	-1248,86	-0,0772
105055	1	1	-1	103806	1248,86	0,0772
116615	-1	-1	1	108395	8220,12	1,76883
100174	-1	-1	1	108395	-8220,12	-1,76883
113120	1	-1	1	105905	7215,17	0,98815
98689	1	-1	1	105905	-7215,17	-0,98815
123071	-1	1	1	115718	7353,84	1,28155
108364	-1	1	1	115718	-7353,84	-1,28155
87134	1	1	1	92354	-5220,08	-0,56918
97574	1	1	1	92354	5220,08	0,56918

O gráfico seguinte tem em seu eixo das ordenadas os resíduos e em seu eixo das abscissas os valores estimados. Esse tipo de gráfico, segundo Martinez (2001), é utilizado para avaliar a suposição de igualdade de variância.

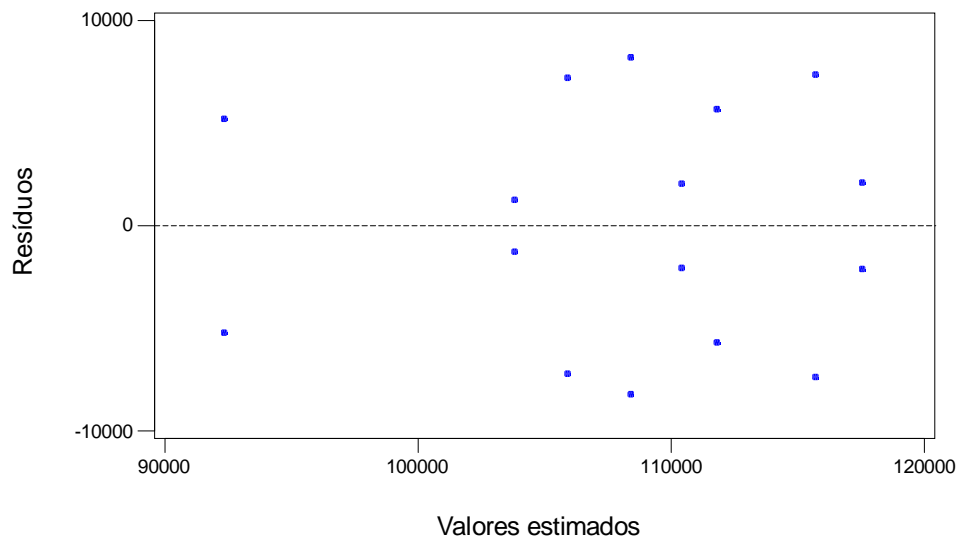


Figura 48 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados da tabela 17

Pela observação da figura 48, pode-se dizer que os dados apresentam equivalência de variância, uma vez que a dispersão dos resíduos não revela um padrão óbvio e também não apresenta características da variância diminuir ou aumentar, como os gráficos que apresentam forma de “funil”.

Para a verificação da distribuição normal, são feitos os gráficos de probabilidade normal e também de escores normais, como nas figuras seguintes:

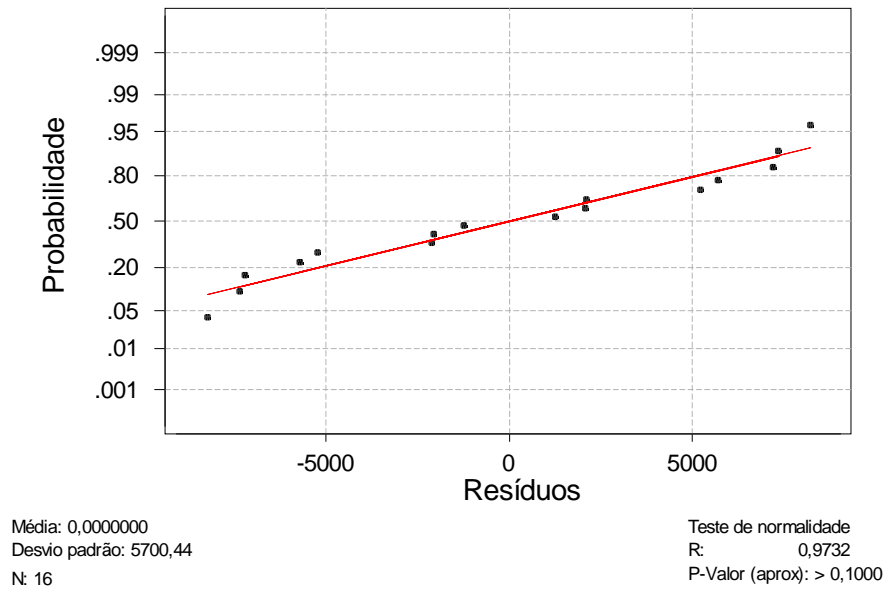


Figura 49 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos da tabela 17

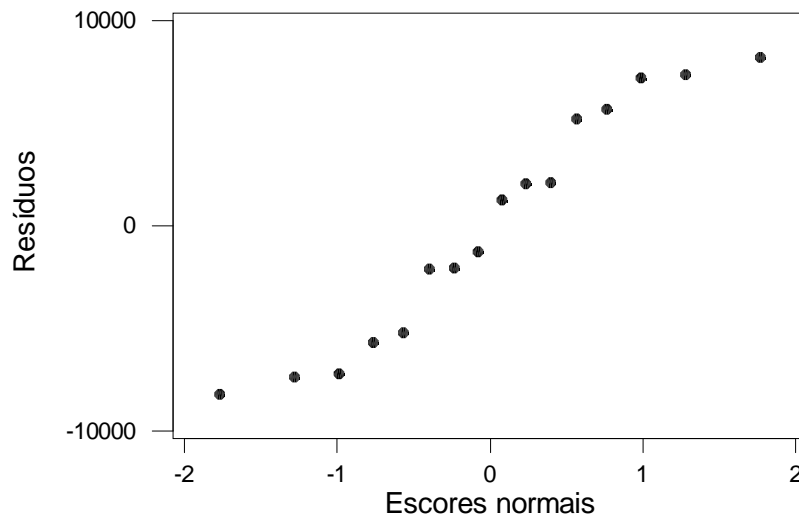


Figura 50 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais (tabela 17)

Nas figuras anteriores, pode-se observar comportamento tendendo a linear, apontando que os resíduos seguem uma distribuição normal aproximada.

Verificado o modelo, foi feita a análise dos efeitos das variáveis.

Resposta versus distribuição, adesivo, pressão		
Termo	Efeito	p-valor
Distribuição	-9547	0,040
Adesivo	-5344	0,208
Pressão	-5303	0,211
Distribuição * adesivo	-5438	0,201
Distribuição * pressão	-3380	0,412
Adesivo * pressão	2230	0,583
Distribuição * adesivo * pressão	-4999	0,236

Figura 51– Dados obtidos na análise fatorial

A partir da figura 51, pode-se afirmar que somente o efeito principal “distribuição” influenciou na resposta, uma vez que seu p-valor é o único menor que 0,05. Os demais (adesivo, pressão e suas combinações, inclusive com a distribuição) não se enquadraram nessa condição, sendo seus efeitos não-significativos nas respostas. Isso permite concluir que ambos os adesivos (Cascophen e mamona) e ambas as pressões de colagem (0,8 e 1,2 MPa) tiveram um comportamento tal que não influenciaram nas respostas finais dos módulos de elasticidade. Quanto à distribuição, seu efeito negativo (-9547) indica que ao passar o ensaio do nível baixo (-1) para o nível alto (1), o valor da resposta diminui. É possível afirmar que as distribuições não-aleatórias (NA) levaram uma certa vantagem em relação às distribuições aleatórias (A), observando os valores estimados. Tal situação pode ser explicada pelo fato da média dos módulos de elasticidade das vigas com distribuição NA ter sido maior que a média das vigas com distribuição tipo A, o que após os ensaios resultou numa diferença de aproximadamente 9% em favor das não-aleatórias.

5.2.4.2 Correlações e análises de variância

Aqui são feitas as correlações dos valores dos módulos obtidos nos ensaios destrutivos e não destrutivos e as análises de variância das médias obtidas nos ensaios e calculadas. A tabela a seguir apresenta os resultados determinados a partir dos três tipos de ensaios realizados.

Tabela 18 – Valores de E obtidos nos ensaios de flexão estática e vibração transversal e de C_{LL} obtidos nos ensaios de ultra-som

	Flexão estática	Vibração transversal	Ultra-som
NA 1 C 0,8	115435	109300	112950
NA 2 C 0,8	119658	108500	116583
NA 1 C 1,2	116615	110900	119731
NA 2 C 1,2	100174	104300	107552
NA 1 M 0,8	108349	100200	105815
NA 2 M 0,8	112474	98300	111753
NA 1 M 1,2	123071	114300	123333
NA 2 M 1,2	108364	98900	110902
A 1 C 0,8	106119	108700	126856
A 2 C 0,8	117518	117600	130978
A 1 C 1,2	113120	115800	113506
A 2 C 1,2	98689	99900	107986
A 1 M 0,8	102557	107900	117472
A 2 M 0,8	105055	102100	132385
A 1 M 1,2	87134	92300	110104
A 2 M 1,2	97574	105400	106346

Médias	108244	105900	115891
DP	9531	7015	8593
CV	0,09	0,07	0,07

Valores em daN/cm²

São apresentados, na seqüência, os resultados das correlações dos números dos ensaios de flexão estática versus vibração transversal, flexão estática versus ultra-som e vibração transversal versus ultra-som.

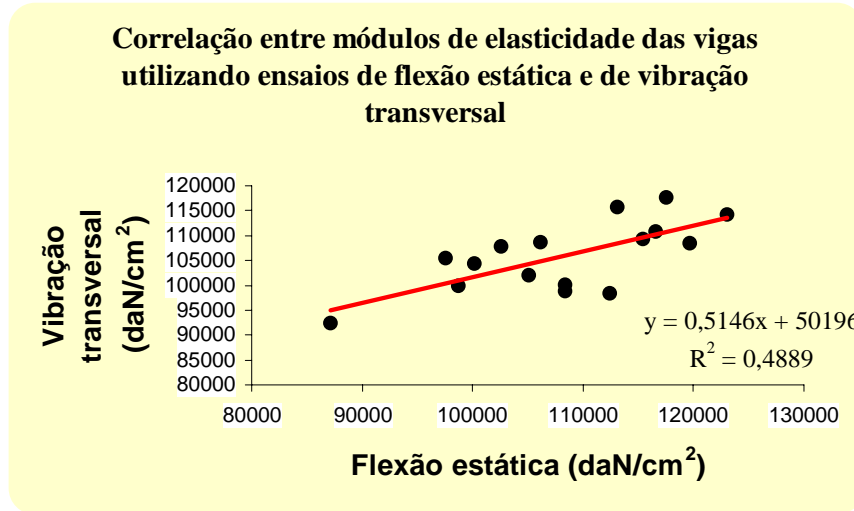


Figura 52 – Correlação para as vigas: flexão x vibração

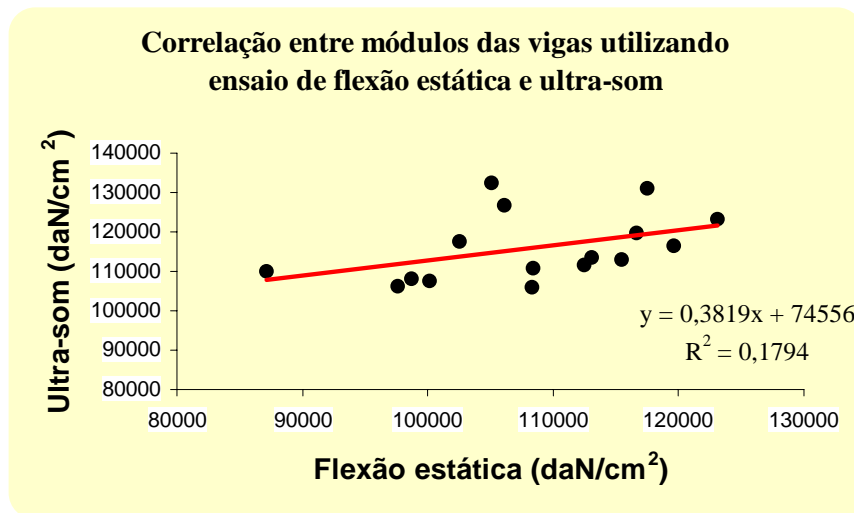


Figura 53 – Correlação para as vigas: flexão x ultra-som

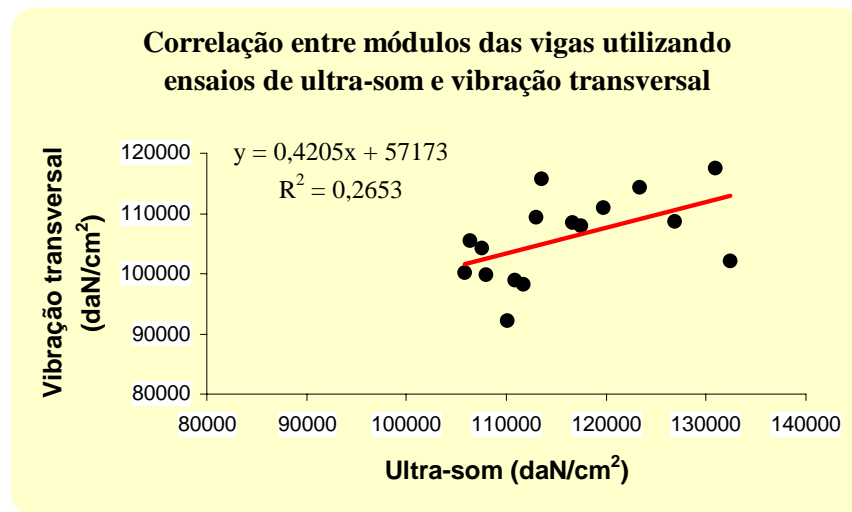


Figura 54 – Correlação para as vigas: ultra-som x vibração

Os resultados das correlações apresentadas nas figuras anteriores apontam para valores baixos se comparados com os valores obtidos nas correlações das lâminas. Para flexão estática versus vibração transversal obteve-se R^2 igual a 0,4889, para flexão estática versus ultra-som o R^2 foi de 0,1794 e para vibração transversal versus ultra-som obteve-se o valor de 0,2653 para R^2 . Percebe-se que os menores valores são oriundos de correlações com ensaios de ultra-som. Uma possível explicação para este fato é o de os transdutores do aparelho Sylvatest terem sido posicionados nas vigas de uma maneira não alinhada, ocorrendo desvios de leitura.

Uma verificação da estimativa do módulo de elasticidade final a partir de valores calculados também foi feita pela análise de variância das médias. Neste caso, o grupo de controle foi o dos valores obtidos nos ensaios estáticos, que foram, então, comparados com os valores calculados. Foram feitas as comparações da média dos ensaios de flexão estática versus valores da média aritmética, e flexão estática versus média ponderada. Também foram feitas as comparações: vibração transversal versus médias aritmética e ponderada, e ultra-som versus médias aritmética e ponderada. Os resultados são mostrados na tabela 19.

Tabela 19 – Análises de variância das médias dos ensaios versus calculados

	Média 1	Média 2	F _{observado}	f _c	p	Diferença
Flexão ¹ x aritmética ²	108244	106921	0,15	4,171	0,705	-1,2%
Flexão ¹ x ponderada ²	108244	112285	0,90	4,171	0,351	3,7%
Vibração ¹ x aritmética ²	105900	106921	0,11	4,171	0,741	1,0%
Vibração ¹ x ponderada ²	105900	112285	2,61	4,171	0,117	6,0%
Ultra-som ¹ x aritmética ²	115891	106921	7,37	4,171	0,011	-7,7%
Ultra-som ¹ x ponderada ²	115891	112285	0,76	4,171	0,391	-3,1%

Em todas as análises feitas com as médias aritméticas e ponderadas, e com os ensaios de flexão estática e vibração transversal os resultados apontaram estas como sendo semelhantes, pois seus F_{observado} foram menores que o f_{crítico}. Estudando o p-valor, afirma-se que as que mais se aproximam são as médias dos ensaios de vibração transversal e aritmética simples. Quando se observa ultra-som versus ponderada, percebe-se que estas também apresentam uma semelhança significativa (p-valor=0,391), o mesmo não ocorrendo com ultra-som versus aritmética, que apresenta p-valor menor que 0,05, apesar da diferença percentual ser de 7,7%. No entanto, cabe ressaltar que os valores de ultra-som que estão sendo comparados são os valores das constantes dinâmicas, e não os módulos de elasticidade das vigas, uma vez que estes dependem do coeficiente de Poisson.

CAPÍTULO 6

“Senhoras e senhores estamos aqui, pedindo uma ajuda por necessidade, pois ‘temo’ um irmão doente em casa, qualquer trocadinho é bem recebido. (...) Bom dia passageiros, é o que lhes deseja, a Miséria S.A. que acabou de chegar”.

O Rappa

CONCLUSÕES

A partir da discussão dos resultados apresentados nos capítulos anteriores, conclui-se que:

- Para a produção de elementos estruturais de madeira laminada colada não basta que a espécie apresente densidade entre 0,5 a 0,75 g/cm³. Tão importante quanto a densidade é a permeabilidade da espécie em relação aos adesivos disponíveis para a produção de MLC.
- Existem espécies tropicais, de densidade entre 0,5 e 0,75 g/cm³, com permeabilidade adequada para a produção de elementos estruturais de madeira laminada colada, utilizando-se os adesivos Cascophen e à base de mamona. Neste trabalho merece destaque o potencial da espécie Cedrinho, entre as estudadas.

- É possível efetuar uma adequada estimativa das propriedades de rigidez de vigas de MLC utilizando-se as expressões (3) e (4).
- As propriedades de rigidez de vigas de MLC, obtidas nos ensaios de flexão estática, não são influenciadas pela pressão de colagem variando entre 0,8 e 1,2 MPa.
- As propriedades de rigidez de vigas de MLC, obtidas nos ensaios de flexão estática, não são influenciadas pelos dois adesivos estudados, o Cascophen e o à base de mamona.
- As propriedades de rigidez de vigas de MLC, obtidas nos ensaios de flexão estática, podem ser influenciadas pela disposição das lâminas ao longo da altura da seção transversal. Vigas com distribuição não aleatória de lâminas podem apresentar propriedades de rigidez superiores às de vigas montadas com distribuição aleatória de lâminas.
- É possível obter elementos compatíveis para emprego estrutural, de MLC, utilizando-se, como matéria prima, tábuas de espécies tropicais alternativas, empregadas com os adesivos estudados no presente trabalho.

CAPÍTULO 7

“Seria um crime mostrar os lados bons
da guerra, ainda que ela os tivesse.”

Henry Barbuse

7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7190:1997 –
Projeto de Estruturas de Madeira.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – D198:1984

BONO, C. T. (1996). *Madeira Laminada Colada na arquitetura: sistematização de
obras executadas no Brasil.* São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC/ USP.

CALLIA, V. W. (1958). *Madeira laminada colada de Pinho do Paraná, seu
emprego nas estruturas.* São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Boletim
nº47, Publicação nº571. 60p.

CHAHUD, E.; ROCCO LAHR, F. A. (1983). *Estudo da viabilidade do emprego de
arcos de madeira laminada para estruturas principais de pontes.* São Carlos.
Relatórios de Iniciação Científica nº 1 a 4 apresentados ao LaMEM/ EESC/ USP.

CHUGG, W. A. (1964). *Glulam: The theory and practice of the manufacture of glued-
laminated timber structures.* London: Ernest Benn., 423 p.

DIAS, A. A.; ROCCO LAHR, F. A. (1983). *Estudo experimental do modelo
reduzido de uma ponte pênsil com viga de rigidez de madeira laminada.* São

- Carlos. Relatórios de Iniciação Científica nº 1 a 4 apresentados ao LaMEM/ EESC/ USP.
- DIAS, A. A.; ROCCO LAHR, F. A. (1999). *Brazilian Tropical Timbers: Alternative Suggestions for Supplying European Economical Community*. In: Encontro da Sociedade Portuguesa de Materiais, 9, Guimarães, Portugal. Anais: v.2, p. 2165-2170.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1971). *Keilzinkenverbindung Von Holz*. Berlin, Alemanha. 3p.
- JESUS, J.M.H. (2000). *Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)*. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos - Instituto de Física de São Carlos - Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. 106p.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (1998). *INPE Notícias*. São José dos Campos, SP, Brasil, v. 4, nº13, jan/ fev.
- MACÊDO, A. N. (1997). *Madeiras tropicais da Amazônia em madeira laminada colada (MLC)*. São Carlos. EESC-USP (Trabalho apresentado à disciplina “SAP 802” – Madeiras e suas aplicações).
- MAINIERI,C.; CHIMELLO, J.P. (1983). *Fichas de características das madeiras brasileiras*. 2 ed – São Paulo: IPT , Divisão de Madeiras, Publicação IPT, n. 1791.
- MARTÍNEZ, E. M. (2001). *Desenvolvimento de um modelo estatístico para aplicação no estudo de fadiga em emendas dentadas de madeira*. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Instituto de Física de São Carlos – Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. 160p.
- MOODY, R. C. (1970). *Glued-laminated timber research at the Forest Products Laboratory*. Mad., Wis.: USDA-FS-FPL. 20 p.
- NATTERER, J. (1991). *Quality criteria for timber design*. In: International Timber Engineering Conference, London. Proceedings, v.2, p.19-26.

- OLIVEIRA, F. G. R. (2001). *Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamentos de ultra-som*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Instituto de Física de São Carlos – Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. 55p.
- ROCCO LAHR, F. A. (1992). *Contribuição ao estudo de vigas retas de madeira laminada colada (MLC)*. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras, 4., São Carlos. Anais, v.3, p.13-20.
- SANTOS, E. (1987). *Nossas Madeiras*. Belo Horizonte, Editora Itatiaia Ltda., Coleção Vis Mea in Labore, 313 p.
- SELBO, M. L.; FREAS, A. D. (1954). *Fabrication and Design of Glued Laminated Wood Structural Members*. USDA-FS-FPL, Washington, DC., 220 p.
- SIMIONI, A. (1978). *Sobre a viabilidade técnica da confecção de vigas laminadas com madeira juvenil de Pinus elliottii Engelm*. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná.
- ZANDER, J. R. T. (1979). *Cálculo e fabricação de peças de madeira laminada*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC/ USP.

7.2 OBRAS CONSULTADAS

- FEDALTO, L. C.; MENDES, I. C. A.; CORADIN, V. T. R. (1989). *Madeiras da Amazônia: descrição do lenho de 40 espécies ocorrentes na Floresta Nacional dos Tapajós*. Brasília: IBAMA, 156 p. (tabela A1 - **Fonte II**).
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. 1999. *Wood Handbook – Wood as an engineering material*. General Technical Report. FPL-GTR-113. Madison, WI: USDA. United States Department of Agriculture, Forest Service. 463p.
- LOUREIRO, A.A.; FREITAS, J.A.; FREITAS, C.A.A. (1997). *Essências madeireiras da Amazônia*. Manaus: MCT/INPA – CPPF. (tabela A1 - **Fonte V**).
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. (2002). *Noções de probabilidade e estatística*. 4 ed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 392p.
- MAINIERI, C.; CHIMELLO, J. P. (1983). *Fichas de características das madeiras brasileiras*. 2 ed – São Paulo: IPT, Divisão de Madeiras, Publicação IPT, n. 1791. (tabela A1 - **Fonte IV**).
- MARQUES, M. H. B.; MELO, J.E. (1997). *Madeiras da Amazônia: Características e utilização*. Brasília: IBAMA, 141p. (tabela A1 - **Fonte III**).
- ROCCO LAHR, F.A. *Características da madeira de trinta espécies nativas da Amazônia*. São Carlos, EESC-USP, no prelo. (tabela A1 - **Fonte VI**).
- SOUZA, M. H. (1997). *Madeiras tropicais brasileiras*. Brasília, IBAMA – Laboratório de Produtos Florestais. 152 p. (tabela A1 - **Fonte I**).
- ZANGIACOMO, A. L.; DIAS, A. A.; RADAIK, C. E. (1999). *Caracterização de madeiras tropicais alternativas para aplicação na construção civil*. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 7., São Carlos, 1999. Resumos. São Carlos: UFSCar, 1999.
- ZANGIÁCOMO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. (2000). *Espécies tropicais alternativas na produção de madeira laminada colada*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 8., São Carlos, 2000. Resumos. São Paulo: USP, 2000.

APÊNDICE

Tabela A1 - Espécies consultadas

	Nome Comum	Nome Científico	Família	ρ_{12} (g/cm ³)	Outros Nomes	Fonte*
1	Açacu	<i>Hura crepitans</i> L.	Euphorbiaceae	0.48	açacu (branco, vermelho, preto), areeiro, uçacu	III
2	Aguano	(ver Mogno)				IV
3	Almecegueira	<i>Protium heptaphyllum</i> March.	Burseraceae	0.73	almesca, almécega, mesclão, breu, breu-branco, breu-preto	IV
4	Amapá-Amargoso	<i>Parahancornia amapa</i> (Huber) Ducke	Apocynaceae	0.56	amapá, amapá-amargo, amargoso, mogno-dourado.	III
5	Amapá-Doce	<i>Brosimum parinarioides</i> Ducke subsp.	Moraceae	0.64		II - IV
6	Amapá-Doce	<i>Brosimum potabile</i> Ducke	Moraceae	0.59		II
7	Amesclão	<i>Trattinnickia burseraefolia</i> (Mart.) Willd.	Burseraceae	0.52	amescla, breu, breu-preto, mangue, sucuruba	I
8	Anani	(ver Pitiá-de-Lagoa)				IV
9	Andiroba	<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Meliaceae	0.7	andiroba-aruba, andiroba-vermelha, carapa, caropá	I - II - IV
10	Angelim-Araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>		0.67		VI
11	Angelim-Pedra	<i>Hymenolobium paetrum</i>		0.69		VI
12	Aruá-da-Terra-Firme	(ver Freijó)				V
13	Axixá	<i>Sterculia apeibophylla</i> Ducke	Sterculiaceae	0.61	couro-de-sapo	III
14	Axixá	(ver Tacacazeiro)				V
15	Breu-Sucuruba	(ver Amesclão)				V
16	Burra-Leiteira	<i>Sapium marmieri</i> Huber	Euphorbiaceae	0.48	leiteira, murupita, seringueira	III
17	Cafearana	<i>Andira</i> sp		0.68		VI
18	Cajuaçú	<i>Anacardium</i> spp	Anacardiaceae	0.51	caju, caju-da-mata, cajuí, cajuí-da-mata, caracol	I - II - IV
19	Castanheira	<i>Bertholletia excelsa</i> Humb. & Bonpl.	Lecythidaceae	0.71		II - IV

Tabela A1 - Espécies consultadas

20	Cedrinho	<i>Erisma sp</i>	Vochysiaceae	0,57	bruteiro, cambará, jaboti-da-terra-firme, quarubatinga	I
21	Cedro-Amargo	<i>Cedrella odorata</i>		0,51		VI
22	Cedro-Doce	<i>Cedrella sp</i>		0,5		VI
23	Cedrorana	<i>Cedrelinga catenaeformis</i> Ducke	Leguminosae Mimosoideae	0,52 - 0,57	cedrarana, cedro-branco, cedromara, taperibá-açú	I - VI
24	Copaíba	<i>Copaifera spp.</i>	Leguminosae Caesalpinoideae	0,5 - 0,75	copaíba-preta, óleo, óleo-de-copaíba, óleo-pardo	I - II - VI
25	Copaíba-Jutaí	<i>Copaifera duckei</i> Dwyer	Caesalpiniaceae	0,69		V
26	Envira-Bobó	<i>Guatteria olivacea</i> R. E. Fries	Annonaceae	0,57		V
27	Envira-Branca	<i>Xylopia nitida</i> Dun.	Annonaceae	0,63		V
28	Envira-Brava	<i>Rollinia exsucca</i> (Dun.) A. DC.	Annonaceae	0,58		V
29	Envira-Preta	<i>Diclinanona calycina</i> (Diels) R. E. Fries	Annonaceae	0,53		II
30	Fava-Bolota	(ver Faveira-Bolota)				II - IV
31	Faveira-Bolota	<i>Parkia pendula</i> (Willd.) Benth. ex Walp.	Leguminosae Mimosoideae	0,6	angelim-bolota, fava-bolota, faveira, paricá-grande	I - IV
32	Fava-Branca	<i>Stryphnodendron pulcherrimum</i> (Willd.)	Leguminosae Mimosoideae	0,61	fava-barbatimão, favinha, tambaí-pé, tambor	III
33	Faveira-Branca	<i>Parkia spp.</i>	Leguminosae Mimosoideae	0,50 - 0,52	atanã, arara-tucupi, camurim visgueiro	I
34	Faveira-Tamboril	<i>Enterolobium maximum</i> Ducke	Mimosaceae	0,47		II
35	Faveira-Vermelha	<i>Dimorphandra sp</i>	Caesalpiniaceae	0,62	fava-vermelha, faveira-camurim	IV
36	Freijó	<i>Cordia bicolor</i> A. DC. ex D.C.	Boraginaceae	0,55		II - V
37	Freijó	<i>Cordia goeldiana</i> Huber	Boraginaceae	0,54		II - IV
38	Freijó	<i>Cordia sagotii</i> I. M. Johnston	Boraginaceae	0,56	aruá-da-terra-firme	II

Tabela A1 - Espécies consultadas

39	Guariúba	<i>Clarisia racemosa</i> Ruíz & Pav.	Moraceae	0,7	catruz, gameleiro, oiticica, oiti, guariúba-amarela, aji	I - IV
40	Imburana-de-Cheiro	<i>Torresea acreana</i> Ducke	Fabaceae	0,58	cumaru-de-cheiro	IV
41	Ingá-Chi-Chi	<i>Inga alba</i> (Sw.) Willd.	Mimosaceae	0,61	ingá	IV
42	Ingá-de-Porco	<i>Macrosamanea pedicellaris</i> (DC.) Kleinh	Leguminosae Mimosoideae	0,61	carrapatinho, cazenza, ingá-favo, jaguarana, jueirana.	III
43	Jacareúba	<i>Calophyllum brasiliense</i> Camb	Clusiaceae	0,6		IV
44	Leiteiro	<i>Sapium aereum</i> Klotzsch	Euphorbiaceae	0,52	burra-leiteira, sorva	III
45	Louro	<i>Ocotea</i> spp.	Lauraceae	0,7	louro-canela	I
46	Louro-Amarelo	<i>Ocotea</i> sp	Lauraceae	0,52	louro	IV
47	Louro-Faia	<i>Euplassa</i> spp.	Proteaceae	0,67	faia, cedro-bordado, catucaém, carvalho-brasileiro	I
48	Louro-Inamuí	<i>Ocotea cymbarum</i> H.B.K.	Lauraceae	0,64	inamuí-louro, louro-mamorim, sassafrás	IV
49	Louro-Preto	<i>Ocotea</i> sp	Lauraceae	0,61 - 0,68	louro	IV - VI
50	Louro-Vermelho	<i>Nectandra rubra</i> (Mez.) C. K. Allen	Lauraceae	0,65	canela-vermelha, gamela, louro, louro-canela	I - II
51	Maminha-de-porca	<i>Zanthoxylum regnelianum</i> Engl.	Rutacea	0,6		III
52	Mandioqueira	<i>Qualea albiflora</i> Warm.	Vochysiaceae	0,68	mandioqueira-áspera, mandioqueira lisa	I
53	Mandioqueira	<i>Ruizterania albiflora</i> Marcano Bert	Vochysiaceae	0,63		IV
54	Mandioqueira-Escamosa	<i>Qualea dinizii</i> Ducke	Vochysiaceae	0,69	amarelão, mandioqueira-rosas, pau-mulato, quaruba	III
55	Melancieira	<i>Alexa grandiflora</i> Ducke	Fabaceae	0,67		II
56	Mogno	<i>Swietenia macrophylla</i> King	Meliaceae	0,61	mogno-aguano, cedro I	IV

Tabela A1 - Espécies consultadas

57	Morototó	<i>Schefflera morototoni</i> (Aubl.)	Araliaceae	0,57	caxeta, imbaubão, mandiocão-do-mato, mucututu	I
58	Muiratinga	<i>Maquira sclerophylla</i> (Ducke) C.C. Berg	Moraceae	0,64		II
59	Munguba-Grande-da-Terra-Firme	<i>Eriotheca longipedicellata</i> (Ducke) A. R.	Bombacaceae	0,54	mamorana-da-terra-firme, munguba, sumaúma-vermelha	I - V
60	Mururé	<i>Brosimum acutifolium</i> Huber subsp.	Moraceae	0,62		II
61	Oitica-Amarela	(ver Guariúba)				I - IV
62	Paricá	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (vell.) M.	Mimosaceae	0,52	timbuva	IV
63	Pitiá-de-Lagoa	<i>Symphonia globulifera</i> L.	Guttiferae	0,72	anani, guanandi	IV
64	Quaruba	<i>Vochysia</i> spp.	Vochysiaceae	0,6	cedrorana, guaruba, quaruba-cedro, quaruba-vermelha	I
65	Quarubarana	<i>Moquinia polymorpha</i>	Compositae	0,7	cambará, candeia, cedrilho	IV
66	Rabo-de-Arraia	(ver Quaruba)				VI
67	Simbiúva	<i>Hirtellasp</i>	Chrysobalanaceae	0,7	ajururama, caraipé-vermelho	IV
68	Sorva	<i>Malouetia ducke</i> Mgf.	Apocynaceae	0,64		V
69	Tacacazeiro	<i>Sterculia pilosa</i> Ducke	Sterculiaceae	0,59		II
70	Tacacazeiro	<i>Sterculia speciosa</i> K. Schum.	Sterculiaceae	0,59		II - V
71	Tachi-Vermelho	<i>Sclerolobium chrysophyllum</i> Poepp. & E.	Caesalpiniaceae	0,56		V
72	Tamboril	(ver Paricá)				IV
73	Tatapiririca	<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	Anacardiaceae	0,56		II
74	Tauari	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Knuth	Lecythidaceae	0,56		V
75	Tauari	<i>Couratari</i> spp.	Lecythidaceae	0,59- 0,64	imbirema, tauari-amarelo, tauari-morrão, estopeiro	I - II - IV
76	Taxi	<i>Tachigali myrmecophila</i> Ducke	Leguminosae Caesalpinoideae	0,67	taxi-pitomba, taxi-preto, taxi-preto-da-mata, taxizeiro	I - II

Tabela A1 - Espécies consultadas

77	Ucuuba-da-Terra-Firme	<i>Virola michellii</i> Heckel	Myristicaceae	0,56		II
78	Ucuubarana	<i>Iryanthera grandis</i> Ducke	Myristicaceae	0,7		II
79	Ucuubarana	<i>Osteophloeum platyspermum</i> (A. DC.) W.	Myristicaceae	0,59	arurá-branco, pajurá, ucuúba-branca, ucuubão.	III
80	Umirana	<i>Qualea retusa</i>		0,71		VI

* Ver obras consultadas

Tabela A.2 - Distribuição de Fisher-Snedecor

Graus de liberdade no numerador

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,7	245,4	245,9	246,5	246,9	247,3	247,7	248,0	249,3	250,1	252,2	253,3	254,3
2	18,513	19,000	19,164	19,247	19,296	19,329	19,353	19,371	19,385	19,396	19,405	19,412	19,419	19,424	19,429	19,423	19,437	19,440	19,443	19,446	19,456	19,463	19,479	19,487	19,496
3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812	8,785	8,763	8,745	8,729	8,715	8,703	8,692	8,683	8,675	8,667	8,660	8,643	8,617	8,572	8,549	8,526
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999	5,964	5,936	5,912	5,891	5,873	5,858	5,844	5,832	5,821	5,811	5,803	5,769	5,746	5,688	5,658	5,628
5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,772	4,735	4,704	4,678	4,655	4,636	4,619	4,604	4,590	4,579	4,568	4,558	4,521	4,496	4,431	4,398	4,365
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099	4,060	4,027	4,000	3,976	3,956	3,938	3,922	3,908	3,896	3,884	3,874	3,835	3,808	3,740	3,705	3,669
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677	3,637	3,603	3,575	3,550	3,529	3,511	3,494	3,480	3,467	3,455	3,445	3,404	3,376	3,304	3,267	3,230
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,688	3,581	3,500	3,438	3,388	3,347	3,313	3,284	3,259	3,237	3,218	3,202	3,187	3,173	3,161	3,150	3,108	3,079	3,005	2,967	2,928
9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179	3,137	3,102	3,073	3,048	3,025	3,006	2,989	2,974	2,960	2,948	2,936	2,893	2,864	2,787	2,748	2,707
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,020	2,978	2,943	2,913	2,887	2,865	2,845	2,828	2,812	2,798	2,785	2,774	2,730	2,700	2,621	2,580	2,538
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896	2,854	2,818	2,788	2,761	2,739	2,719	2,701	2,685	2,671	2,658	2,646	2,601	2,570	2,490	2,448	2,404
12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796	2,753	2,717	2,687	2,660	2,637	2,617	2,599	2,583	2,568	2,555	2,544	2,498	2,466	2,384	2,341	2,296
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714	2,671	2,635	2,604	2,577	2,554	2,533	2,515	2,499	2,484	2,471	2,459	2,412	2,380	2,297	2,252	2,206
14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646	2,602	2,565	2,534	2,507	2,484	2,463	2,445	2,428	2,413	2,400	2,388	2,341	2,308	2,223	2,178	2,131
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,790	2,707	2,641	2,588	2,544	2,507	2,475	2,448	2,424	2,403	2,385	2,368	2,353	2,340	2,328	2,280	2,247	2,160	2,114	2,066
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538	2,494	2,456	2,425	2,397	2,373	2,352	2,333	2,317	2,302	2,288	2,276	2,227	2,194	2,106	2,059	2,010
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699	2,614	2,548	2,494	2,450	2,413	2,381	2,353	2,329	2,308	2,289	2,272	2,257	2,243	2,230	2,181	2,148	2,058	2,011	1,960
18	4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661	2,577	2,510	2,456	2,412	2,374	2,342	2,314	2,290	2,269	2,250	2,233	2,217	2,203	2,191	2,141	2,107	2,017	1,968	1,917
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,740	2,628	2,544	2,477	2,423	2,378	2,340	2,308	2,280	2,256	2,234	2,215	2,198	2,182	2,168	2,155	2,106	2,071	1,980	1,930	1,878
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393	2,348	2,310	2,278	2,250	2,225	2,203	2,184	2,167	2,151	2,137	2,124	2,074	2,039	1,946	1,896	1,843

Graus de liberdade no denominador

Tabela A.2 - Distribuição de Fisher-Snedecor

Graus de liberdade no denominador	21	4,325	3,467	3,072	2,840	2,685	2,573	2,488	2,420	2,366	2,321	2,283	2,250	2,222	2,197	2,176	2,156	2,139	2,123	2,109	2,096	2,045	2,010	1,916	1,866	1,812
	22	4,301	3,443	3,049	2,817	2,661	2,549	2,464	2,397	2,342	2,297	2,259	2,226	2,198	2,173	2,151	2,131	2,114	2,098	2,084	2,071	2,020	1,984	1,889	1,838	1,783
	23	4,279	3,422	3,028	2,796	2,640	2,528	2,442	2,375	2,320	2,275	2,236	2,204	2,175	2,150	2,128	2,109	2,091	2,075	2,061	2,048	1,996	1,961	1,865	1,813	1,757
	24	4,260	3,403	3,009	2,776	2,621	2,508	2,423	2,355	2,300	2,255	2,216	2,183	2,155	2,130	2,108	2,088	2,070	2,054	2,040	2,027	1,975	1,929	1,842	1,790	1,733
	25	4,242	3,385	2,991	2,759	2,603	2,490	2,405	2,337	2,282	2,236	2,198	2,165	2,136	2,111	2,089	2,069	2,051	2,035	2,021	2,007	1,955	1,919	1,822	1,768	1,711
	26	4,225	3,369	2,975	2,743	2,587	2,474	2,388	2,321	2,265	2,220	2,181	2,148	2,119	2,049	2,072	2,052	2,034	2,018	2,003	1,990	1,938	1,901	1,803	1,749	1,691
	27	4,210	3,354	2,960	2,728	2,572	2,459	2,373	2,305	2,250	2,204	2,166	2,132	2,103	2,078	2,056	2,036	2,018	2,002	1,987	1,974	1,921	1,884	1,785	1,731	1,672
	28	4,196	3,340	2,947	2,714	2,558	2,445	2,359	2,291	2,236	2,190	2,151	2,118	2,089	2,064	2,041	2,021	2,003	1,987	1,972	1,959	1,906	1,869	1,769	1,714	1,654
	29	4,183	3,328	2,934	2,701	2,545	2,432	2,346	2,278	2,223	2,177	2,138	2,104	2,075	2,050	2,027	2,007	1,989	1,973	1,958	1,945	1,891	1,854	1,754	1,698	1,638
	30	4,171	3,316	2,922	2,690	2,534	2,421	2,334	2,266	2,211	2,165	2,126	2,092	2,063	2,037	2,015	1,995	1,976	1,960	1,945	1,932	1,878	1,841	1,740	1,683	1,622
	60	4,001	3,150	2,758	2,525	2,368	2,254	2,167	2,097	2,040	1,993	1,952	1,917	1,887	1,860	1,836	1,815	1,796	1,778	1,763	1,748	1,690	1,649	1,534	1,467	1,389
	120	3,920	3,072	2,680	2,447	2,290	2,175	2,087	2,016	1,959	1,910	1,869	1,834	1,803	1,775	1,750	1,728	1,709	1,690	1,674	1,659	1,598	1,554	1,429	1,352	1,254
	∞	3,842	2,996	2,605	2,372	2,214	2,099	2,010	1,938	1,880	1,831	1,789	1,752	1,720	1,692	1,666	1,644	1,623	1,604	1,587	1,571	1,507	1,459	1,318	1,221	1,000