

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

SOBRE A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
ELASTICIDADE DA MADEIRA

FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR

Tese apresentada como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título
Doutor em Engenharia de Estruturas

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Cesar Hellmeister - EESC-USP - Orientador.
Prof. Dr. Dante Angelo Osvaldo Martinelli - EESC-USP.
Prof. Dr. Telemaco Hippolyto de Macedo van Langendonck -
EPUSP.
Prof. Dr. Péricles Brasiliense Fusco - EPUSP.
Prof. Dr. Wander Miranda de Camargo - Hidroservice.

São Carlos - 1983



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

SOBRE A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
ELASTICIDADE DA MADEIRA

FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR

Tese apresentada como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título
Doutor em Engenharia de Estruturas

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Cesar Hellmeister - EESC-USP - Orientador.
Prof. Dr. Dante Angelo Osvaldo Martinelli - EESC-USP.
Prof. Dr. Telemaco Hippolyto de Macedo van Langendonck -
EPUSP.
Prof. Dr. Péricles Brasiliense Fusco - EPUSP.
Prof. Dr. Mander Miranda de Camargo - Hidroservice.

São Carlos - 1983



Para

Eva, Hinólito, Lourdes, Gineu, Maria Gilda, Maria Cristina
e aquele que vai chegar

AGRADECIMENTOS

Ao professor João Cesar Hellmeister pela orientação ministrada no desenvolvimento deste estudo e pela minuciosa revisão do texto final do trabalho, pela amizade demonstrada e pelo exemplo de persistência e dedicação às atividades de pesquisa.

Aos funcionários, bolsistas e monitores do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, do Departamento de Estruturas da EESC-USP, pelo auxílio constante prestado durante o desenrolar do trabalho.

Aos srs. José Francisco do Nascimento Filho, João Batista Dotta e Jaime Galindo pelos serviços de datilografia e desenho.

À srta. Nanci Rodrigues pela colaboração na pesquisa bibliográfica e na elaboração das respectivas referências.

Ao engenheiro Antonio Roque Genovez Damiano pela participação efetiva na pesquisa, ao longo do seu desenvolvimento teórico e experimental.

Aos engenheiros Raquel Gonçalves e Uratã Alves Caldeira pela valiosa colaboração na parte experimental do trabalho.

Aos professores e amigos Carlito Calil Júnior, Sylvio Goulart Rosa e Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho, cujas manifestações de incentivo se constituíram em fator positivo para a conclusão deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo estímulo financeiro concedido ao estudo efetuado.

Aos amigos de sempre, pela convicção despertada de um motivo definitivo para se continuar no caminho de buscas, encontros e realizações através da vida.

RESUMO

O trabalho apresentado trata da determinação de propriedades de elasticidade da madeira.

Com base na experimentação executada, primeiramente é definida a variação do módulo de elasticidade aparente (E_a) na flexão, em função da relação vão livre-altura da peça (l/h). Os valores de E_a decrescem para $l/h \leq 21$ e, para $l/h < 15$, a redução de E_a é, ainda, mais significativa. Foi estudada a relação de dependência entre a razão largura-altura da peça (b/h) e E_a , tendo sido analisados os resultados de ensaios de flexão em peças com $4 \leq l/h \leq 26$ e $0,5 \leq b/h \leq 3,4$.

Em seguida, são estudados alguns procedimentos experimentais, tendo sido adotado um deles para a determinação do módulo de elasticidade real (E) na flexão e dos módulos de elasticidade transversal (G) da madeira. A escolha foi baseada em ensaios de flexão realizados em corpos de prova de Peroba Rosa, Eucalipto Tereticornis, Jatobá, Canafístula, Canela, Angico e Pau d'arco.

Tendo em vista os valores sistematicamente mais elevados de E , determinados pelo procedimento experimental adotado, em comparação àqueles obtidos pelos ensaios consagrados nos métodos nacional e internacionais ($l/h = 14$), foi estabelecida uma relação linear entre eles. Isto possibilitará o aproveitamento dos resultados já obtidos, mesmo considerando-se as deficiências dos corpos de prova com a relação $l/h = 14$.

Foi desenvolvida análise estatística para comparar o módulo de elasticidade longitudinal real na flexão e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira. Os resultados experimentais obtidos sugeriam equivalência entre os parâmetros citados, ao contrário dos dados disponíveis em tabelas de características físicas e mecânicas de madeiras, publicadas no país e fora dele.

Foram estabelecidas equações relacionando parâmetros de resistência e de elasticidade da madeira, na flexão e na compressão paralela às fibras. Estas equações permitem a previsão das tensões de ruptura do material a partir de resultados de ensaios não destrutivos.

SUMÁRIO

1. - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Generalidades.....	1
1.2 - Importância do Estudo.....	1
2. - REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....	3
2.1 - Referência Históricas.....	3
2.2 - Situação Atual do Estudo das Propriedades de Elasticidade da Madeira.....	7
2.3 - Tópicos Abordados no Presente Trabalho.....	20
3. - ORTOTROPIA NA MADEIRA.....	24
3.1 - Generalidades. Tensor Elástico.....	24
3.2 - Tensões e Deformações.....	25
3.3 - Lei de Hooke.....	27
3.4 - Lei de Hooke para Materiais Ortotrôpicos.....	29
4. VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL APARENTE(E_a).....	32
4.1 - Generalidades.....	32
4.2 - Ensaio Preliminares.....	35
4.3 - Análise Qualitativa dos Resultados dos Ensaio Preliminares.....	45
4.4 - Ensaio Principais: Resultados.....	45
5. - MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL REAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE TRANSVERSAL.....	86
5.1 - 1º Procedimento para a Determinação de G (1º Método).....	86
5.2 - 2º Procedimento Sugerido para a Determinação de G... ..	89
5.3 - 3º Procedimento Sugerido para a Determinação de G (3º Método).....	92
5.4 - Comentários Acerca dos Procedimentos Experimentais..	93
5.5 - Apresentação dos Resultados de E.....	93
5.6 - Apresentação dos Resultados de G.....	131

6. - DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E e G VARIANDO A DIREÇÃO DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO.....	157
6.1 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade E_T e E_R - Peroba Rosa.....	157
6.2 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade E_T e E_R - Eucalipto Tereticornis.....	158
6.3 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade E_T e E_R - Jatobá.....	162
6.4 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade E_T e E_R - Canafístula.....	164
6.5 - Conclusões.....	166
6.6 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R e G_T - Peroba Rosa.....	166
6.7 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R e G_T - Eucalipto Tereticornis.....	169
6.8 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R e E_T - Jatobá.....	171
6.9 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R e G_T - Canafístula.....	172
6.10- Conclusões.....	174
7. - COMPARAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO DETERMINADO SEGUNDO O MB-26 E O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL REAL À FLEXÃO.....	175
7.1 - Material Ensaiado.....	175
7.2 - Apresentação dos Resultados Peroba Rosa.....	175
7.3 - Apresentação dos Resultados. Eucalipto Tereticornis.....	177
7.4 - Generalização da Relação entre E_R e $E(14)$	180
7.5 - Conclusões.....	180
8. - MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL REAL NA FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	181
8.1 - Material e Ensaio Realizados.....	181
8.2 - Apresentação dos Resultados. Peroba Rosa.....	181

8.3 - Apresentação dos Resultados: Eucalipto Tereti - cornis.....	185
8.4 - Apresentação dos Resultados: Jatobá.....	189
8.5 - Apresentação dos Dados. Outras Madeiras.....	192
8.6 - Conclusões.....	195
9. - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE l/h NO MÓDULO DE RESISTÊN - CIA À FLEXÃO (MRF) DA MADEIRA.....	196
9.1 - Introdução e Apresentação de Resultados.....	196
9.2 - Análise de Resultados.....	196
10. - OUTRAS RELAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIA E ELASTICIDADE DA MADEIRA.....	200
10.1 - Relação entre E_T e MRF.....	200
10.2 - Relação E_C e σ_C	204
10.3 - Relação entre E_C e σ_C - Outras Madeiras.....	209
10.4 - Conclusões.....	209
11. - CONCLUSÕES FINAIS.....	210
BIBLIOGRAFIA.....	213

SOBRE A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ELASTICIDADE DA MADEIRA

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

Considerando as características físicas e mecânicas altamente favoráveis de muitas espécies nacionais de madeira e de algumas importadas, e vistas a sua disponibilidade no país, tanto em florestas naturais como em regiões de florestamento ou reflorestamento, a possibilidade de sua renovação em intervalos de tempo relativamente curtos, tem-se desenvolvido no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, estudos das mais variadas aplicações desse material, tanto arquitetônicas como estruturais.

Soluções para muitos problemas práticos já foram obtidas com a utilização racional da madeira. Estruturas como tesouras com diagonais normais, diagonais invertidas; pórticos maciços ou treliçados; arcos maciços ou treliçados, tesouras para arquibancadas com ou sem esteias, para coberturas de médio a grande porte; pontes com vigas principais de seções unicirculares, bicirculares e quadricirculares, pontes com vigas principais treliçadas, armada, protendidas; estruturas especiais para armazenamento de cereais a granel, cimbramentos de madeira para edifícios, pontes e viadutos de concreto armado; foram estudados com enfoque teórico e exaustiva comprovação experimental.

A satisfação pela realização destes trabalhos e pela repercussão causada por eles não impediram a análise serena da necessidade inadiável do estudo mais profundo de problemas fundamentais tendo em vista a aplicação dos mais recentes conceitos da teoria das estruturas às estruturas de madeira.

1.2 - Importância do Estudo

O conhecimento mais preciso das propriedades relacionadas com a elasticidade da madeira permitirá a verificação mais exata do comportamento de elementos estruturais de madeira.

O estágio atingido através dos resultados do presente tra

balho proporcionará condições para o aperfeiçoamento dos projetos de silos de madeira de configuração cilíndrica; de cimbramentos de edifícios; de pontes de madeira com estrutura principal (ou secundária) em placa; de estruturas treliçadas espaciais; de estruturas , em geral, cujos elementos estejam submetidos a solicitações de flexão.

Por outro lado, o estudo ora iniciado deve ter prosseguimento, visando a obtenção de conhecimentos de modo a se tornarem possíveis as verificações da resistência e da estabilidade de peças estruturais de madeira submetidas a esforços de torção ou de flexo-torção; e a previsão do comportamento de coberturas laminares de madeira.

De maneira mais abrangente, os resultados apresentados são oportunos subsídios para uma reavaliação dos métodos de ensaio e da norma para o cálculo e execução de estruturas de madeira.

2 - REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

A compreensão do estágio atual do conhecimento da madeira, de suas propriedades físicas, de resistência e de elasticidade, está ligada às pesquisas levadas a efeito no passado para elucidar o comportamento intrínseco deste material.

2.1 - Referências Históricas

2.1.1 - No Mundo

Nos primeiros estudos publicados a respeito da madeira, de autoria de Galileu Galilei (1564 - 1642), a partir de ensaios aparentemente rudimentares, iniciou-se o desenvolvimento da ciência das estruturas. Galileu experimentou vigas de madeira e de outros materiais e introduziu alguns conceitos, hoje reconhecidos como fundamentais da Resistência dos Materiais. Embora admitindo algumas hipóteses falsas e, conseqüentemente, chegando a algumas conclusões inválidas, Galileu lançou as bases para o cálculo da tensão de flexão em vigas de madeira (1).

Mariotte (1620 - 1654), analisando os trabalhos de Galileu, apresentou novas hipóteses a respeito do comportamento de peças fletidas e corrigiu, em parte, as conclusões, inicialmente incorretas de Galileu, acerca da distribuição de tensões em seções transversais de vigas (2).

Mais tarde Hooke (1635 - 1703), realizou algumas séries de ensaios utilizando diferentes espécies de madeira. Apresentou os resultados de sua experimentação em corpos de prova e a relação linear existente entre os esforços atuantes e a deformações devidas à atuação destes esforços, comportamento denominado, a seguir, como elástico linear (3).

1)- BOOTH, L.G. - *The Strength testing of timber during the 17th and 18th centuries.* Journal of the Institute of Wood Science London, (13): 9, Nov. 1964.

2)- Id., ibid. - p.9

3)- Id., ibid. - p.10

Parent e Coulomb, no transcorrer do século dezoito, admitindo a validade da lei de Hooke e a distribuição linear de tensões de compressão e tração na flexão, obtiveram a equação da tensão máxima em peças fletidas, até hoje utilizada (4).

Musschenbroek (1692 - 1761) construiu diversos dispositivos de ensaio, experimentou alguns modelos de corpos de prova para tração paralela e foi o primeiro a demonstrar, experimentalmente, variação de resistência à tração em função da posição da amostra ao longo da árvore (5).

Ruffon (1707 - 1788) relacionou pela primeira vez a velocidade de crescimento da árvore com a densidade da madeira; relacionou também a resistência da madeira com a velocidade de carregamento (6).

Navier (1785 - 1836), trabalhando na Escola Politécnica de Paris, acenou para a necessidade de se estabelecer, além da tensão de ruptura, a tensão limite de proporcionalidade e o módulo de elasticidade do material (7).

Dupin (1784 - 1873) constatou a linearidade entre tensão e deformação até um determinado limite, a partir do qual acelera-se o crescimento das deformações para incrementos iguais de tensões. Dupin verificou também a variação da resistência da madeira com a densidade e relacionou, pela primeira vez, a elástica de peças fletidas com seus parâmetros geométricos: seção transversal e vão livre (8).

Duleau, em fins do século dezenove, realizou ensaios em peças compostas, utilizando, no cálculo das tensões, a expressão do momento de inércia até hoje admitida como válida.

Jourawski (1821 - 1891) concluiu corretamente a respeito do cisalhamento na flexão, deduzindo equação para seu cálculo (9).

4)- Id., ibid. - p 11.

5)- Id., ibid. - p. 12

6)- Id., ibid. - p.18.

7)- HELLMEISTER, João Cesar - Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, EESC - USP, 1973.
Tese (Doutor Engenheiro). p.8.

8)- Id., ibid. - p.9

9)- Loc. cit.

Monnin publicou em 1919 (10), uma coletânea de informações sintetizando referências bibliográficas de trabalhos de Galileu até Dupin e Jourawski. Entre outras citações de Monnin, constam o exame da constituição anatômica da madeira, da fisiologia da árvore e dos fatores relacionados com a variação das propriedades físicas do material. Monnin é o responsável pela sistematização dos ensaios para a apresentação dos valores numéricos correspondentes às características da madeira (11).

Koehler, Carlson, Wilson, Markwardt e Luxford (12), (13), (14), já por volta de 1930, tinham apresentado diversas publicações através do Forest Products Laboratory, Forest Service, USA, a respeito das propriedades da madeira. As pesquisas realizadas neste Laboratório objetivavam determinar a resistência de peças estruturais, estabelecer tensões admissíveis e, comparando as características de diversas espécies, definir as aplicações mais compatíveis para cada uma delas.

Kollmann, em 1950 (15), apresentou detalhado compêndio incluindo desde aspectos da anatomia da madeira, da química da madeira e das suas propriedades físicas, de resistência e de elasticidade. Esta publicação se constitui marco importante no estudo da madeira e, até os dias de hoje, é fonte de consulta indispensável aos pesquisadores desta área de conhecimento.

10)- MONNIN, M. - *Essais physiques, statiques of dynamiques des bois.* Bulletin de La Section Technique de L'Aéronautique Militaire, (29), Juin 1919.

11)- Id. - Leçons sur les bois de construction. Ecole Nationale Supérieure de L'Aéronautique, 1930/31.

12)- WILSON, T.R.C., CARLSON, T.A.; LUXFORD, R.F. - *The effect of partial seasoning on the strength of wood.* In: AMERICAN WOOD PRESERVERS' ASSOCIATION - Proceedings. USDA-FS- FPL Mad., Wis., 1930.

13)- KOEHLER, Arthur - *The Shrinking and swelling of wood.* USDA - FS-FPL, Mad., Wis., july, 1931.

14)- MARKWARDT, L.J. - New toughness machine is aid in Wood Selection. Wood Working Industries, Jan. 1926

15)- KOLLMANN, Franz - Tecnologia de la madera y sus aplicaciones. Madri, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera, 1959. v.1.

2.1.2 - No Brasil

A primeira publicação relativa a estudos realizados sobre a madeira no Brasil, é o "Manual de Resistência dos Materiaes", editado em 1905 pelo "Gabinete de Resistência dos Materiaes", da "Escola Polytechnica de São Paulo" (16). Nele são apresentados resultados de ensaios de compressão paralela e compressão normal para algumas espécies nacionais de madeira.

As atividades do Gabinete de Resistência se estenderam amplamente dando origem à criação do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), em 1931. O Desenvolvimento extraordinário do LEM trouxe como resultado a criação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (IPT), em 1934 (17).

Com a criação do LEM, foram retomados os estudos a respeito da madeira, através dos trabalhos de Brotero e seus colaboradores (18), (19), visando a sistematização dos ensaios para a determinação das características das madeiras nacionais. É dessa época a definição dos detalhes para a amostragem, para a preparação dos corpos de prova e para os ensaios em geral.

-
- 16)- ASSOCIAÇÃO DE ALUNOS DA ESCOLA POLITECNICA DE SÃO PAULO - Manual de resistência dos materiaes. São Paulo, Grêmio Politécnico, 1905.
- 17)- MEILLER, João L. & SILVA, Francisco I. de A. - Meio século de tecnologia (1899 - 1949). São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Junho, 1949. (Boletim nº 34).
- 18)- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Boletim informativo das cerimônias do cincoentenário do I.P.T. e da inauguração de suas instalações experimentais de metalurgia, na Cidade Universitária, sob a presidência de S. Excia. o Governador do Estado e do Magnífico Reitor da Universidade. São Paulo, I.P.T., Julho, 1949. (Boletim nº 35).
- 19)- BROTERO, Frederico A. & LARRABURE, Fernando J. - Tubos de Aduelas de madeira (dados para o cálculo e execução). Sep. do: Boletim da Inspeção de Serviços Públicos, (6), Maio, 1941.

Mais tarde, já existindo o IPT, os "Métodos de Ensaio Adotados no IPT" (20) foram incorporados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas na forma de "Método Brasileiro para Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras", MB-26, em 1940 (21).

Até 1980, foram caracterizadas cerca de duzentas espécies estudadas através de mais de quatrocentas árvores. Embora sendo trabalho de relevante importância, a sistemática empregada na caracterização das espécies é a mesma de há praticamente cinco décadas. Todo o desenvolvimento dos conceitos estatísticos, já disponíveis a partir de 1930, não foi aproveitado pelo IPT, e nem mais tarde pela ABNT. Estes fatos tornam o MB-26, embora em companhia de outros métodos internacionais para o estudo da madeira, incompatível com o desenvolvimento atingido no estudo de outros materiais.

Hellmeister, tendo exercido atividades de pesquisa no IPT (1960 - 1969) e, a seguir, no LaMEM, EESC-USP, publicou parte de seus trabalhos a respeito da determinação das características físicas e mecânicas da madeira, sugerindo amostragem ocasional para a obtenção dos corpos de prova a ensaiar, visando a caracterização estatisticamente válida do material.

2.2 - Situação Atual do Estudo das Propriedades de Elasticidade da Madeira

2.2.1 - Nos Estados Unidos

Instituições norte americanas tem se preocupado intensamente com o estudo sistemático das madeiras e de sua caracterização física e mecânica. Alguns autores tem se ocupado com trabalhos correlatos, voltados para a determinação de propriedades elásticas da madeira.

20)- BROTERO, Frederico A. - Métodos de ensaios adotados no I.P.T., para o estudo de madeiras nacionais. 2.^a ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1956. (Boletim nº 31).

21)- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras - MB-26. Rio de Janeiro, ABNT 1940

2.2.1.1 - No Laboratório de Produtos Florestais, em Madison

A linha de pesquisa sobre o assunto está orientada no sentido da determinação das propriedades elásticas e do relacionamento entre elas. Tem-se buscado, paralelamente, a aplicação dos resultados obtidos na solução de problemas práticos.

March, Kuenzi e Kommers, em 1942 (22), tentaram, pela primeira vez, sistematizar os ensaios para a determinação dos módulos de elasticidade transversal da madeira. A utilização de corpos de prova com o formato de pequenas placas, por eles proposta, tornou-se bastante difundida e muito utilizada, inclusive para a determinação daqueles parâmetros para chapas de madeira compensada. Todavia, tem sido reconhecido como um método complexo e inviável sem extremos cuidados na execução, para se obterem resultados válidos.

Newlin e Trayer, em 1956 (23), procuraram em demonstrar a contribuição das deformações devidas aos esforços cortantes na flecha total de uma peça submetida à flexão.

Norris e Mckinnon (24), na mesma época, fizeram a determinação de parâmetros físicos de resistência e de elasticidade de painéis de madeira compensada. Para as propriedades elásticas foram empregados corpos de prova conforme sugestão de March, Kuenzi e Kommers com algumas modificações e adaptações compatíveis com o caso em estudo. Praticamente se consagra o ensaio de placas para a determinação dos módulos de elasticidade transversal dos compensados.

22)- MARCH, H.W.; KUENZI, E. W.; KOMMERS, W.J. - *Method of measuring the shearing moduli in wood.* USDA-FS-FPL, Mad., Wis. (1301), June, 1942.

23)- NEWLIN, J.A. & TRAYER, G.W. - *Deflection of beams with special reference to shear deformations.* USDA-FS-FPL, Mad. Wis (1309), March, 1956. (Reprint from National Advisory Committee for Aeronautics, report 180, 1924).

24)- NORRIS, C.B. & MCKINNON, P.F. - *Compression, tension and shear tests on yellow - poplar plywood panel of sizes that do not buckle with tests made at various angles to the face grain.* USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (1328), 1962.

Beghtel e Norris, em 1959 (25), estudaram a variação de algumas propriedades mecânicas da madeira, em função da variação da relação entre o vão e a altura da peça considerada.

Ethington, em 1960 (26), analisou o comportamento de vigas de madeira laminada, tecendo considerações sobre aspectos da rigidez e elasticidade do conjunto, e introduziu alguns conceitos sobre a ortotropia da madeira.

Norris, em 1962 (27), baseando-se na Teoria de Henky e von Mises, apresentou sua formulação sobre o comportamento de materiais ortotrôpicos, incluindo a madeira, quando submetidos a solicitações combinadas.

Ethington e Hilbrand, em 1966 (28), admitiram ser a madeira material ortotrôpico elástico.

March (29), logo a seguir tratou do problema sob um ponto de vista matemático, deduzindo equações, a partir da Teoria da Elasticidade, para a determinação das propriedades elásticas da madeira e de suas interrelações.

-
- 25)- BEGHTEL, S.C. & NORRIS, Charles B. - *Strength of wood beams of rectangular cross section as affected by span - depth ratio* USDA-FS-FPL. Mad., Wis. (1910), Jan. 1959.
- 26)- ETHINGTON, Robert L. - *Stiffness and bending strength of beams laminated from two species of wood.* USDA-FS-FPL, Mad, Wis (2156), Sept. 1960.
- 27)- NORRIS, Charles B. - *Strength of orthotropic materials subjected to combined stresses.* USDA-FS-FPL., Mad., Wis., (1816) May, 1962.
- 28)- ETHINGTON, R.L. & HILBRAND, H.C. - *Anisotropy in wood. Orientation Effects in the Mechanical Behavior of Anisotropic Structural Materials*, ASTM, 1966. (Special Technical Publication n^o 405).
- 29)- MARCH, H.W. - *Stress - strain relations in wood and plywood considered as orthotropic materials.* USDA-FS-FPL. Mad., Wis. s/d. (Mimeo n^o 1503).

Doyle, Drow, McBurney (30), de acordo com as formulações de March, obtiveram resultados iniciais para os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, deixando claro entretanto, tratar-se de resultado preliminar, possível de revisão, na realização de outras séries de ensaios. Foram apresentados valores para duas espécies de madeira de peso específico baixo, Balsa e Quipo.

Liu e Cheng, em 1979 (31), estudando o comportamento de vigas de materiais ortotrópicos, madeira entre eles, ressaltaram a necessidade da determinação precisa dos parâmetros elásticos destes materiais para a análise de seu desempenho, nas mais variadas aplicações, ser desenvolvida com a eficácia desejada.

2.2.1.2 - No Laboratório de Pesquisas Florestais da Universidade do Estado de Oregon

Diversos autores, neste Laboratório, tem estudado relações entre propriedades elásticas e propriedades mecânicas da madeira. Paralelamente, tem sido propostos modelos matemáticos para a solução de problemas estruturais envolvendo a madeira. Para a aplicação destes modelos, é necessário o conhecimento prévio dos módulos de elasticidade transversal e dos coeficientes de Poisson.

Johnson, em 1965 (32), apresentou dados na tentativa de estabelecer uma relação entre o módulo de elasticidade longitudinal e a tensão de ruptura na compressão paralela.

30)- DOYLE, D.V.; DROW, J.T.; MCBURNEY, R.S. - *Elastic properties of wood: The young's moduli, moduli of rigidity, and Poisson's ratios of Balsa and Quipo.* USDA-FS-FPL, Mad, Wis., s/d. (Report nº 1528).

31)- LIU, J.Y. & CHENG, S. - *Analysis of orthotropic beams.* USDA FS-FPL, Mad., Wisc., May, 1979. (Research Paper, FPL - 343).

32)- JOHNSON, J.W. - Relationships among moduli of elasticity and rupture: seasoned and unseasoned coast - type douglas fir and seasoned western hemlock. Sep. de: Symposium on Non-destructive Testing of Wood, 2. - PROCEEDINGS. Washington, April, 1965.

Corder, em 1965 (33), em seguida, partindo de considerações de Johnson, comenta a necessidade de serem conhecidas as propriedades elásticas para possibilitar a previsão da configuração da linha elástica, quer de um simples elemento, quer da estrutura como um conjunto. Apresenta a sugestão para sistematizar o ensaio visando a determinação do módulo de elasticidade ao longo de todo o comprimento de peças de madeira.

Johnson e Kunesh, em 1975 (34), publicaram dados referentes à resistências à tração paralela em peças de madeira com dimensões estruturais, relacionando-a com parâmetros geométricos e elásticos das amostras ensaiadas.

Polenseck, com a participação de Fernandez (35), (36), tem-se preocupado, desde 1976, com o desempenho de painéis de madeira para diversas finalidades estruturais. O problema tem sido analisado teórica e experimentalmente e, em 1979, foi sugerido um modelo matemático para prever o comportamento de painéis de vedação de madeira e sua contribuição estrutural quando determinadas técnicas construtivas são aplicadas. A comprovação experimental da validade do modelo será possível quando todos os parâmetros referentes à elasticidade do material forem efetivamente conhecidos.

-
- 33)- CORDER, S.E. - Localized deflection related to bending strength of lumber. Sep. de: Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 2. - PROCEEDINGS. Washington, April, 1965.
- 34)- JOHNSON, J.W. & KUNESH, R.H. - Tensile strength of Special douglas-fir and hem-fir 2 - inch dimension lumber. Sep. de: Wood and Fiber, 6 (4), 1975.
- 35)- POLENSECK, Anton - Properties of components and joints for rational design procedure of wood-stud walls. Wood Science, 10(4), April, 1978.
- 36)- FERNANDEZ, Virgilio A. & POLENSEK, Anton - Model for predicting strength and stiffness of wood studs. Wood Science, 12 (2), October, 1979.

2.2.1.3 - No Departamento de Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Colorado

Nesta instituição, pesquisadores tem estudado métodos para a determinação das propriedades elásticas da madeira e das chapas de madeira. Ao mesmo tempo, alguns resultados inicialmente obtidos, puderam ser aplicados no cálculo de peças de madeira laminada para estruturas de grande porte.

Gunnerson, Goodman e Bodig (37), utilizaram ensaios de placa para a determinação de parâmetros elásticos da madeira, mas chegaram a resultados estatisticamente dispersos, devidos às modificações sugeridas para a obtenção dos coeficientes de Poisson nos planos principais da madeira.

McLain e Bodig, em 1973 (38), publicaram dados de ensaios de placa para a determinação de propriedades elásticas de diversos tipos de chapas de madeira aglomerada e de madeira compensada.

Por outro lado, Al-Dabbagh, Goodman e Bodig, (39), (40), nesta mesma época, procuraram desenvolver um método baseado em elementos finitos para a análise do comportamento elástico da madeira, na tentativa de fornecerem uma ferramenta para a solução de diversos problemas práticos. Alguns deles, relacionados a vigas de madeira laminada de seção variável, foram estudados por Gopu e Goodman (41).

-
- 37)- GUNNERSON, R.A.; GOODMAN, J.R.; BODIG, J. - Plate tests for determination of elastic parameters of wood. Wood Science 5(4), April, 1973.
- 38)- McLAIN, Thomas E. & BODIG, Jozsef - Determination of elastic parameters of full-size wood composite boards. Forest Products Journal, 24 (4), April, 1974.
- 39)- BODIG, Jozsef & GOODMAN, James R. - Predication of elastic parameters for wood. Wood Science, 5 (4), April, 1973.
- 40)- AL-DABBAGH, A.; GOODMAN, J.R.; BODIG, J. - Finite element method for wood mechanics. Journal of the Structural Divison, 98 (3), March, 1972.
- 41)- GOPU, Vijaija K.A. & GOODMAN, James R. - Full-scale tests on tapered and curved glulam beams. Journal of the Structural Division, 101 (12), Dec. 1975.

Em 1979, Bodig, (42), desenvolveu novas idéias para a análise do comportamento de peças estruturais de madeira na ruptura através da previsão de seu desempenho a partir do conhecimento do módulo de elasticidade longitudinal.

2.2.1.4 - No Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Illinois

As pesquisas, aí desenvolvidas, na área de madeiras, tem-se voltado para a utilização das chapas de madeira compensada e das chapas de madeiras aglomerada em aplicações estruturais.

Chow, desde 1972 (43), (44), tem-se ocupado do estudo de vigas compostas de seção T e I, variando a espessura da alma e das mesas. Concluiu que as flechas, em elementos fletidos desta natureza, são devidas aos esforços cortantes em porcentagem de até setenta por cento.

Chow e Hanson, em 1980 (45), publicaram resultados da análise do comportamento de vigas compostas, relacionando-o a outras propriedades físicas e elásticas da madeira compensada.

-
- 42)- BODIG, Jozsef - Linearized deformation at failure: a proposed design tool. Wood Science, 11 (3), Jan. 1979.
- 43)- CHOW, Poo - Modulus of elasticity and shear deflection of walnut - veneered-particleboard composite beams in flexure Forest Products Journal, 22 (11), Nov. 1972.
- 44)- Id. - Deflection in bending of birch-veneered wood-base composite shelving panels. Forest Products Journal, 29 (12) Dec. 1979. (Technical Note).
- 45)- CHOW, Poo & HANSON, Richard C. - Shelling ratio and core density effects on stiffness, ultimate strength, and toughness of veneered - hardboard beams. Forest Products Journal, 30 (31), Jan. 1980.

2.2.1.5 - Na Universidade de Purdue, Estado de Indiana

Uma das instituições norte americanas mais interessadas no estudo das estruturas de madeira, não tem publicado muitos trabalhos acerca das propriedades elásticas da madeira. Podem ser citadas as publicações de Brown (46), Eckelman (47) e mais especificamente, as de Suddarth, Woeste e Yao, (48), (49), relativas à discussão da variação dos módulos de elasticidade longitudinal de peças comprimidas e fletidas, em serviço, e sob a ação de diferentes tipos de carregamento. Também deve ser citado o trabalho de Della Lucia (50) sobre a classificação de peças estruturais de madeira pela resistência. Através de ensaios não destrutivos para a determinação de diversas características do material, incluindo o módulo de elasticidade, e posterior determinação da tensão de ruptura à flexão, foi possível analisar as relações entre elas, concluindo-se pela maior adequação do módulo de elasticidade para prever as tensões de ruptura.

-
- 46)- BROWN, Kenneth M. - A glue laminated beam analyzer for convention or reliability based engineering design. West Lafayette, Indiana, Purdue University; Agricultural Experiment Station, July, 1977. (Research Bulletin nº 940).
- 47)- ECKELMAN, Carl A. - Effect of holes on the bending strength of wood and particleboard parts. West Lafayette, Indiana, Purdue University, Agricultural Experiment Station, June, 1975. (Research Bulletin nº 922).
- 48)- SUDDARTH, S.K. & WOESTE, F.E. - Influences of variability in loads and modulus of elasticity on wood column strength. Wood Science, 10 (2), Oct. 1977.
- 49)- SUDDARTH, S.K.; WOESTE, F.E.; YAO, J.T.P. - Effect of E-variability on the deflection behavior of a structure. Forest Products Journal, 25 (1), Jan. 1975.
- 50)- DELLA LUCIA, Ricardo M. & SENFT, John F. - Increased utilization of tropical hardwoods through species - independent structural grading. Forest Products Journal, 29 (6): 22-28, June, 1979. (Technical Section).

2.2.1.6 - No Instituto Politécnico da Universidade Estadual de Virginia

Entre outros trabalhos desenvolvidos nesta instituição pode-se relacionar o de Freitas (51), também sobre a classificação de peças estruturais. A partir dos dados obtidos por Della Lúcia (50), apresentou sugestão para uma sistemática de classificação em duas etapas, relacionando módulo de elasticidade e tensões de ruptura para espécies agrupadas em classes, em função da densidade e do módulo de elasticidade.

2.2.1.7 - A "American Society of Testing Materials"(ASTM) entidade que se ocupa das definições, adaptações e revisões das normas para o ensaio e caracterização de materiais em geral, tem diversas especificações a respeito da madeira, madeira modificada, madeira estrutural e chapas de madeira. As especificações consultadas no decorrer do presente trabalho constam da bibliografia citada ao final.

2.2.2 - No Canadá

Pais de tradição eminentemente florestal, o Canadá tem-se destacado como um dos maiores produtores mundiais de madeira. Paralelamente, um dos mais dedicados ao estudo da madeira, nas mais variadas áreas de sua aplicação. Segue-se a citação dos trabalhos mais significativos, em relação ao assunto, desenvolvidos em instituições canadenses.

51)- FREITAS, Amantino Ramos de - Probabilistic approach in the design of wood structures in Brazil based on the variability of 23 species. São Paulo, IPT / Divisão de Madeiras 1978. 79 p. Dissertation - Doctor of Philosophy. (Publicação nº 1198).

2.2.2.1 - Na Universidade de Toronto, Keenan e seus colaboradores tem se interessado pelo estudo das madeiras e das suas propriedades. Em 1973, apresentando trabalho sobre vigas de madeira laminada colada, Keenan, (52), fêz referências às propriedades elásticas como parâmetros indispensáveis para peças de grande porte.

2.2.2.2 - No Laboratório de Produtos Florestais do Oeste, Vancouver, alguns pesquisadores tem-se interessado pela determinação dos valores de projeto para diversas solicitações atuantes em peças estruturais de madeira (53), (54). Foram estabelecidas, para algumas espécies, relações entre os limites de ruptura e o módulo de elasticidade longitudinal da madeira.

2.2.2.3 - Na Escola de Floresta, Universidade de Laval, Quêbec, desde 1974, Goulet e Laforest (55) tem estudado a aplicação da Teoria da Elasticidade no cálculo das deformações da madeira sob pressão, para avaliar, tecnicamente, o emprego do material em estruturas submersas. Os resultados obtidos confirmam as hipóteses da Teoria da Elasticidade aplicadas às madeiras em condições normais de uso estrutural.

52)- KEENAN, F.J. - "Project D: poisson's ratios and orthotropic of Douglas-fir". In _____ - The shear strength of glued laminated timber beams. Toronto, Canada, Department of Civil Engineering; University of Toronto, 1973. (Ph. D. Thesis).

53)- MCGOWAN, W.M. - Tensile and flexural properties of a Douglas - fir lumber/veneer composite. Vancouver, British Columbia Department of the Environment; Canadian Forestry Service, Western Forest Products Laboratory, April, 1973. (Information Report VP-X - 108).

54)- MCGOWAN, W.M. & SMITH, W.J. - Strength and related properties of western red cedar poles. Canada, Department of Forestry, 1965. (Publication n° 1108).

55)- GOULET, Marcel & LAFOREST, Pierre - Étude de l'application de la théorie de l'élasticité aux déformations du bois sous pression. Quêbec, Department d' Exploitation et Utilisation des Bois, Université Laval, Décembre, 1974. (note de Recherches n° 11).

2.2.3 - Na Alemanha

País com tecnologia de vanguarda em quase todas as áreas do conhecimento, mantém desenvolvimento de mesmo nível no estudo da madeira e das estruturas de madeira. São apresentadas a seguir os principais trabalhos sobre propriedades elásticas da madeira, desenvolvidos nos Laboratórios alemães mais conceituados.

2.2.3.1 - No Laboratório Federal de Pesquisas Florestais de Hamburgo, Becker e Noack (56), (57), desenvolvem desde 1968, pesquisas sobre a viscoelasticidade torsional da madeira. Na determinação do módulo de elasticidade transversal (G) em qualquer direção através de ensaio de torsão, ficou evidenciada a interferência dos G dos outros dois planos principais de cisalhamento. Isto leva a significativa dispersão dos valores experimentais, confirmando-se a necessidade de se definir um tipo diferente de ensaio no qual esta interferência seja minimizada.

Nesta mesma linha de pesquisa, Noack e van Roth, em 1976 (58), apresentaram estudo visando a dedução de equações, a partir da Teoria da Elasticidade, tendo em vista a solução de problemas relativos a estados múltiplos de tensões em peças estruturais de madeira. Estas equações foram obtidas utilizando um sistema de coordenadas cartesianas; coordenadas cilíndricas foram empregadas para o caso particular de peças laminadas curvas.

56)- BECKER, Helmut F. & NOACK, Detlev - *Studies on dynamic torsional viscoelasticity of wood.* Wood Science and Technology, 2, 1968.

57)- BECKER, Helmut F - *Messung der Schubmoduln von vollholz mit akustischen torsionsschwingungen.* Holz als Roh - und Werkstoff, 31, 1973.

58)- NOACK, D. & ROTH, W. von - *On the theory of elasticity of the orthotropic material wood.* Wood Science and Technology, 10, 1976.

2.2.3.2 - Foi publicado pelo Instituto Alemão de Normalização (DIN), em 1979 (59) a DIN 68364, na qual são definidos os valores característicos de resistência e elasticidade para aproximadamente cinquenta espécies de madeira. Todavia não há menção aos coeficientes de Poisson. São apresentados valores dos módulos de elasticidade transversal para dez por cento das espécies citadas. Não foi utilizada metodologia sistematizada para a obtenção desses parâmetros.

2.2.4 - Na França

Desde 1976, institutos de pesquisas franceses tem-se interessado mais intensamente pelo estudo da madeira como material estrutural. Podem ser destacados, com referência ao assunto do presente trabalho.

2.2.4.1 - O Instituto Nacional Politécnico de Lorraine, onde, em 1980, Seichepine (60), publicou trabalho acerca da determinação da matriz "tensor - elástico" para materiais anisotrópicos, com aplicação particular à madeira.

2.2.4.2 - O Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Lyon, onde, em 1980 Foudjet, (61), apresentou trabalho acerca dos métodos de caracterização de materiais anisotrópicos, com referências à sua aplicação às madeiras.

59)- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG - Kennwerte von Holzarten. Festigkeit, elastizität, resistenz - DIN 68364. Berlin, Verlag, Nov. 1976.

60)- SEICHEPINE, Jean Louis - Mise au point d'une methode experimentale destinee a l'identification de la matrice des complaisances elastiques de solides anisotropes: application aux materiaux bois. Lorraine, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1980. (These - Docteur Ingenieur).

61)- FOUJDET, Amos - Methodes de caracterisation de materiaux anisotropes application ad bois. Lyon, L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, 1980. (These Docteur - Ingenieur).

2.2.5 - Na Inglaterra

Em 1948, Hearmon, (62), publicou trabalho referente à elasticidade da madeira, comparando-a com a das chapas de madeira compensada. São apresentados comentários e hipóteses acerca do comportamento da madeira quando solicitada em diversas direções relativamente às fibras.

Encontra-se em fase de estudos a definição dos métodos recomendados para a determinação de propriedades físicas e mecânicas da madeira em dimensões estruturais, pelo Conselho Britânico de Pesquisas, em colaboração com o Conselho Internacional de Pesquisas em Construção Civil.

2.2.6 - Na Austrália

Bolza e Kloot publicaram em 1963 (63) dados relativos às propriedades mecânicas de cento e setenta e quatro espécies de madeira australianas, tendo sido realizados os ensaios de acordo com os métodos britânicos e norte-americanos. O interesse maior dos dados apresentados reside na possibilidade de se comparar o desempenho das diversas espécies estudadas.

2.2.7 - No Brasil

Vem sendo implantados no país alguns laboratórios para pesquisa na área de madeiras. A preocupação principal destes Laboratórios tem sido a identificação e caracterização de essências nacionais. Podem ser citados, entre outros, o Centro Tecnológico da Madeira, da Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia, em Santa

62)- HEARMON, R.F.S. - The elasticity of wood and plywood. London, His Majesty's Stationery Office; Department of Scientific and Industrial Research, 1948. (Forest Products Research Special Report n° 7).

63)- BOLZA, E. & KLOOT, N.H. - The mechanical properties of 174 Australian timbers. Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1963. (Division of Forest Products Technological Paper n° 25).

rêm; a Seção de Tecnologia da Madeira, da Secretaria da Agricultura do Estado de Mato Grosso, em Cuiabá; o Laboratório de Produtos Florestais do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, em Brasília.

Por outro lado, as seções de Tecnologia da Madeira do Instituto Nacional de Tecnologia, no Rio de Janeiro; do Instituto de Tecnologia de Pernambuco, em Recife; do Instituto de Tecnologia do Rio Grande do Sul e do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, já de há algum tempo estão implantadas e o foram nos moldes da antiga Seção de Madeiras do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

Para o desenvolvimento da parte experimental da caracterização das espécies de madeira, todos os laboratórios citados utilizam os métodos de ensaio publicados pelo IPT (64) e adotados pela ABNT (65). O Laboratório do IBDF tem utilizado os métodos da Comissão Pan Americana de Normas Técnicas (COPANT), traduzidos dos métodos da ASTM. Estes métodos são omissos em relação aos módulos de elasticidade transversal e aos coeficientes de Poisson.

O Departamento de Silvicultura da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirões, da Universidade de São Paulo, Piracicaba, tem-se interessado pelo estudo das espécies apropriadas para reflorestamento, mais especificamente os pinus e os eucaliptos. Todavia, suas pesquisas são dirigidas para o aperfeiçoamento da silvicultura e para o aproveitamento industrial da madeira.

O Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), existente na Escola de Engenharia de São Carlos, sentiu-se a partir de 1978, a importância do conhecimento das propriedades elásticas da madeira para o desenvolvimento de projetos de estruturas de maior porte.

2.3 - Tópicos Abordados no Presente Trabalho

A revisão bibliográfica realizada evidenciou vários aspectos das pesquisas realizadas a respeito das propriedades de elasti-

64)- BRÓTERO, Frederico A. - *Op. cit.*

65)- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - *Op. cit.*

cidade da madeira bem como do seu relacionamento com as propriedades de resistência.

Observou-se maior desenvolvimento no enfoque teórico do problema, com sugestões de vários autores materializadas na dedução de equações, a partir da Lei de Hooke generalizada e da Teoria da Elasticidade, para possibilitar a determinação dos diversos parâmetros necessários a caracterização da madeira, material tipicamente ortotrópico.

As grandes dificuldades se encontram na parte experimental do problema. Dada a natureza da madeira, na maior parte das vezes as previsões da teoria não são significativamente confirmadas nos ensaios realizados. Há considerável dispersão dos resultados experimentais. A partir desta constatação, são tentadas respostas adequadas para tais diferenças, geralmente baseadas na alusão à precisão dos ensaios.

Todavia, puderam ser observadas também, através da revisão da bibliografia, diversas considerações talvez parcialmente imperfeitas, constantes em publicações de autores, e de métodos nacionais e internacionais para a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. Citam-se:

2.3.1 - O emprego da equação

$$f = \frac{P \ell^2}{48 EJ}$$

para o cálculo das deformações em peças fletidas com carga centrada.

Esta expressão não considera a parcela de deformação devido aos esforços cisalhantes. Valores elevados do módulo de elasticidade transversal (G), tornam desprezível a citada parcela. Porém, considerando-se inexistência de uma metodologia convencional para a determinação de G, seus valores são precariamente conhecidos. Este problema foi observado nos capítulos 4 e 5 do trabalho.

2.3.2 - A indicação para o emprego de corpos de prova com faces paralelas às direções radial e tangencial da madeira dificulta a obtenção dos mesmos. Os resultados dos parâmetros de elasticidade e resistência obtidos a partir de ensaios sobre tais corpos de prova são próximos, permitindo o desenvolvimento de análise estatística para se concluir, de modo confiável a respeito da necessidade,

ou não, de ser mantida a indicação inicial. Este problema foi abordado no capítulo 6 do trabalho.

2.3.3 - A constatação de resultados experimentais sistematicamente maiores de E (módulo de elasticidade real à flexão) em relação ao módulo de elasticidade obtido segundo o MB-26 (Método Brasileiro para Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras), inspirou a abordagem do capítulo 7 do trabalho, tendo sido desenvolvida análise estatística na busca de se determinar, a partir da experimentação, o relacionamento entre aqueles dois parâmetros de elasticidade citados.

2.3.4 - A apresentação tradicional em tabelas nacionais e internacionais, de valores diferentes, para uma dada espécie de madeira, dos módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras e na flexão de peças de madeira. A partir do conhecimento da constituição anatômica da madeira, a diferença pareceu existir apenas em função do emprego inadequado da equação citada em 2.1 e não motivada pela natureza do material. Este assunto é tratado no capítulo 8.

2.3.5 - A tendência, na literatura internacional, de se prever as tensões de ruptura da madeira, a partir de ensaios não destrutivos, ou seja, a partir da determinação de propriedades de elasticidade do material. O estudo das publicações disponíveis levou à ideia de se relacionar os resultados individuais de corpos de prova, com o objetivo de aumentar o coeficiente de correlação linear obtido pela análise de resultados agrupados em função de parâmetros físicos de valores numéricos semelhantes. É esta a abordagem dos capítulos 9 e 10 do presente trabalho.

Com o intuito de colocar o leitor em contato com os conceitos concernentes aos materiais ortotrópicos, é apresentado, no capítulo 3, um sumário da Lei de Hooke voltada para aqueles materiais. São apresentados ao final, os parâmetros de elasticidade necessários para a perfeita caracterização de materiais ortotrópicos. O presente trabalho se preocupa, como se vê nos itens 2.1 a 2.5 em estudar a determinação de diversos deles, deixando o campo aberto para o prosseguimento dos estudos nesta linha de pesquisa.

Outro pormenor a salientar é referente às espécies escolhidas para os ensaios. Paralelamente à Peroba Rosa, largamente em-

pregada na construção civil brasileira e já mostrando sinais de esgotamento, foram ensaiadas espécies nativas com amplas condições de substituí-la: Jatobá, Canafístula, Angico, Pau d'arco e Canela. Foi ensaiado, também, o Eucalipto Tereticornis, essência importada mas com bom desempenho no país e muito utilizada para fins de florestamento e reflorestamento.

Quando foram necessárias observações onde a homogeneidade do material era requerida, optou-se pelo Pinho do Paraná, em virtude da favorável disposição de seus elementos anatômicos.

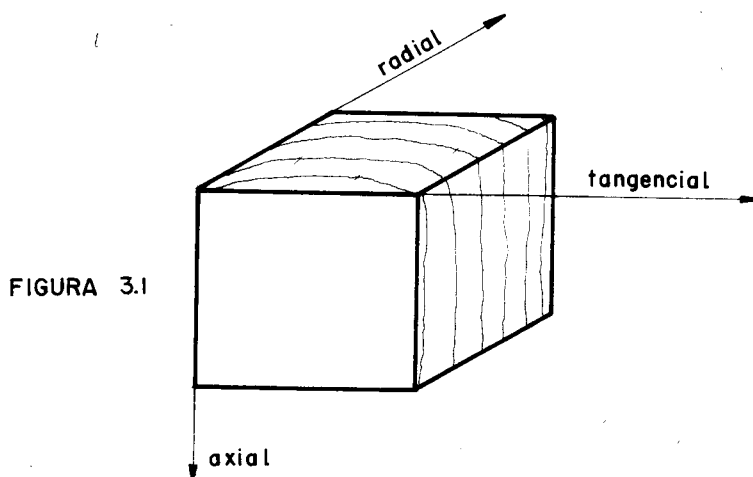
3 - ORTOTROPIA NA MADEIRA

3.1 - Generalidades. Tensor Elástico

Materiais fibrosos de origem natural podem ser classificados, de um modo geral, como ortotrópicos. A ortotropia, quando usada na descrição de sólidos, se refere à estrutura interna do material, caracterizada por três planos de simetria, perpendiculares entre si. Na madeira, a simetria existe já a nível macroscópico, como consequência do arranjo dos elementos anatômicos.

A caracterização mecânica ou a caracterização da elasticidade dos materiais ortotrópicos pode ser feita por intermédio de tensões, ou seja, matrizes-tensor. Este recurso emprega o cálculo matricial e tensorial para a descrição de um sistema físico, simplificando-a, no caso de materiais ortotrópicos, em razão de sua simetria interna.

A descrição se completa com a adoção de um sistema de referência. O mais simples é o de coordenadas retangulares, com os eixos coincidindo com as intersecções dos planos de simetria. Na madeira, os eixos coincidem com as direções longitudinal, tangencial e radial - ver figura 3.1. Para um tratamento mais rigoroso do problema, seria necessário trabalhar com coordenadas cilíndricas, para levar em conta a curvatura dos anéis de crescimento. Na prática, entretanto, a totalidade dos autores consultados admite ser desprezível a interferência da curvatura nas propriedades da madeira nas direções radial e tangencial.



Por vezes, na solução de problemas envolvendo materiais ortotrópicos, determinada propriedade é conhecida para certo sistema de referência e é necessário transformá-la para um outro. O cálculo tensional é utilizado para este tipo de transformações, através dos cossenos dos ângulos entre os eixos do sistema.

3.2 - Tensões e Deformações

As tensões em um meio contínuo são medidas como força por unidade de área e são apresentadas por σ_{ij} , i e j podendo no caso em estudo, assumir os valores 1, 2 e 3.

Estas tensões são obtidas pela associação de um vetor de forças internas a cada uma das tres direções do sistema de eixos adotado. Supondo a condição de não ocorrência de aceleração infinita, tem-se:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1)}$$

Logo, se conclue haver seis tensões independentes. A rotação para o tensor das tensões é σ_{ij} , sendo escrita, em forma de matriz, como segue:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{(eq. 3.2)}$$

A matriz é simétrica em relação à sua diagonal principal. Adota-se a notação, na qual o primeiro índice se refere à direção normal à face onde atua a tensão, e o segundo à própria direção da tensão. Por conseguinte, se $i = j$, os esforços são normais e se $i \neq j$, os esforços são cisalhantes.

Por outro lado, a idéia de deformação está associada ao deslocamento de um ponto interno em um meio contínuo. Forças ou deslocamentos na superfície de um corpo fazem o ponto, inicialmente posicionado em x_1 , x_2 e x_3 , ser deslocado para uma posição $x_1 + \Delta_1$, $x_2 + \Delta_2$ e $x_3 + \Delta_3$. O vetor deslocamento tem componentes Δ_1 , Δ_2 e Δ_3 .

Os elementos do tensor das deformações (ϵ_{ij}) são definidos como funções dos deslocamentos Δ_i , através da equação:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \Delta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \Delta_j}{\partial x_i} \right] \dots\dots\dots \text{(eq. 3.3)}$$

Note-se, também neste caso, a possibilidade de os índices i e j poderem assumir os valores 1, 2 e 3.

Analogamente, se escreve:

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \Delta_1}{\partial x_2} + \frac{\partial \Delta_2}{\partial x_1} \right] \dots \dots \dots \text{(eq. 3.4)}$$

$$\epsilon_{22} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \Delta_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \Delta_2}{\partial x_2} \right] = \frac{\partial \Delta_2}{\partial x_2} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.5)}$$

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.6)}$$

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.7)}$$

A matriz ϵ_{ij} é simétrica em relação à diagonal principal e há seis componentes independentes.

Em alguns casos, é conveniente o uso dos elementos γ_{ij} ; definidos como:

$$\gamma_{ij} = \frac{\partial \Delta_i}{\partial x_j}, \text{ se } i = j \dots \dots \dots \text{(eq. 3.8)}$$

$$\gamma_{ij} = \frac{\partial \Delta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \Delta_j}{\partial x_i}, \text{ se } i \neq j \dots \dots \dots \text{(eq. 3.9)}$$

Comparando com os elementos ϵ_{ij} , tem-se

$$\gamma_{ij} = \epsilon_{ij}, \text{ se } i = j \dots \dots \dots \text{(eq. 3.10)}$$

$$\gamma_{ij} = 2\epsilon_{ij}, \text{ se } i \neq j \dots \dots \dots \text{(eq. 3.11)}$$

Em forma de matriz, tem-se

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.12)}$$

3.3 - Lei de Hooke

Segundo a Lei de Hooke, as tensões são proporcionais às deformações. Esta proporcionalidade define o comportamento elástico linear dos materiais. Em condições limites - tensões e deformações extremamente pequenas - é aplicável a quase todos os materiais. Mas, crescidos os valores das deformações, muitos materiais deixam de seguir a lei de Hooke. As diferenças devem ou não ser consideradas em função da aplicação prática desejada. Em casos comuns, os materiais para uso em estruturas, por hipótese, seguem a lei de Hooke.

Escreve-se a lei de Hooke na forma tensorial do seguinte modo:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl} \dots\dots\dots (eq. 3.13)$$

ou

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \dots\dots\dots (eq. 3.14)$$

A matriz C_{ijkl} é chamada de tensor de rigidez; a sua inversa é a matriz S_{ijkl} , conforme será visto adiante.

De acordo com a convenção usual no cálculo tensorial, um índice repetido em um termo da equação estende a somatória a todos os valores possíveis do índice. No caso em estudo, os valores são 1, 2 e 3. Cada uma das equações 3.13 ou 3.14 apresenta os índices k e l repetidos. A expansão de algumas destas equações resulta em:

$$\sigma_{23} = C_{23kl} \cdot \epsilon_{kl} \text{ , ou seja:}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{23} = & C_{2311} \cdot \epsilon_{11} + C_{2312} \cdot \epsilon_{12} + C_{2313} \cdot \epsilon_{13} + \\ & C_{2321} \cdot \epsilon_{21} + C_{2322} \cdot \epsilon_{22} + C_{2323} \cdot \epsilon_{23} + \\ & C_{2331} \cdot \epsilon_{31} + C_{2332} \cdot \epsilon_{32} + C_{2333} \cdot \epsilon_{33} \dots (eq. 3.15) \end{aligned}$$

$$\epsilon_{11} = S_{11kl} \cdot \sigma_{kl} \text{ , ou seja:}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} = & S_{1111} \cdot \sigma_{11} + S_{1112} \cdot \sigma_{12} + S_{1113} \cdot \sigma_{13} + \\ & S_{1121} \cdot \sigma_{21} + S_{1122} \cdot \sigma_{22} + S_{1123} \cdot \sigma_{23} + \\ & S_{1131} \cdot \sigma_{31} + S_{1132} \cdot \sigma_{32} + S_{1133} \cdot \sigma_{33} \dots (eq. 2.16) \end{aligned}$$

Levando em conta a simetria dos elementos σ_{ij} e ϵ_{ij} , é possível reduzir as equações citadas a seis termos cada. Os resultados podem ser escritos como segue:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix}$$

(eq. 3.17).

Reduzindo-se os índices e substituindo ϵ_{ij} pelos correspondentes γ_{ij} conforme as equações 3.8 a 3.11, tem-se:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \dots(\text{eq. 3.18})$$

De modo análogo, chega-se a:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Em forma matricial, tem-se:

$$\sigma = C\varepsilon \dots\dots\dots (eq. 3.20)$$

$$\varepsilon = S\sigma \dots\dots\dots (eq. 3.21)$$

e conseqüentemente:

$$S = C^{-1} \text{ e } C = S^{-1}$$

3.4 - Lei de Hooke para Materiais Ortotr\u00f3picos

Para o caso de materiais ortotr\u00f3picos, considera-se uma tens\u00e3o σ_{11} aplicada em um elemento c\u00fabico, de volume unit\u00e1rio.

Admite-se a coincid\u00eancia dos eixos geom\u00e9tricos e dos eixos de ortotropia. A tens\u00e3o σ_{11} produz uma deforma\u00e7\u00e3o γ_{11} dada pela seguinte express\u00e3o:

$$\gamma_{11} = \frac{1}{E_1} \cdot \sigma_{11} \dots\dots\dots (eq. 3.22)$$

E_1 \u00e9 o m\u00f3dulo de deforma\u00e7\u00e3o na dire\u00e7\u00e3o x_1 . Igualmente, observa-se:

$$\gamma_{22} = \frac{1}{E_2} \cdot \sigma_{22} \dots\dots\dots (eq. 3.23)$$

\u00c9 poss\u00edvel associar γ_{11} a γ_{22} pela express\u00e3o.

$$\gamma_{11} = - \nu_{12} \gamma_{22} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.24)}$$

ν_{12} é o chamado coeficiente de Poisson.

A combinação das equações 3.23 e 3.24 leva a:

$$\gamma_{11} = - \frac{\nu_{12} \cdot \sigma_{22}}{E_2} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.25)}$$

A tensão σ_{22} produz um incremento na deformação γ_{11} , de sinal contrário à deformação γ_{22} . O mesmo se dá quando for aplicada a tensão σ_{33} , na direção x_3 .

$$\gamma_{11} = - \frac{\nu_{13} \cdot \sigma_{33}}{E_3} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.26)}$$

somando-se os três efeitos, obtêm-se a deformação total:

$$\gamma_{11} = \frac{1}{E_1} \cdot \sigma_{11} - \frac{\nu_{12}}{E_2} \sigma_{22} - \frac{\nu_{13}}{E_3} \cdot \sigma_{33} \dots \dots \text{(eq. 3.27)}$$

Analogamente:

$$\gamma_{22} = - \frac{\nu_{21}}{E_1} \cdot \sigma_{11} + \frac{1}{E_2} \cdot \sigma_{22} - \frac{\nu_{23}}{E_3} \cdot \sigma_{33} \dots \text{(eq. 3.28)}$$

$$\gamma_{33} = - \frac{\nu_{31}}{E_1} \cdot \sigma_{11} - \frac{\nu_{32}}{E_2} \cdot \sigma_{22} + \frac{1}{E_3} \cdot \sigma_{33} \dots \text{(eq. 3.29)}$$

Além das deformações normais γ_{11} , γ_{22} e γ_{33} , há as deformações cisalhantes. Tem sido observado experimentalmente serem as deformações cisalhantes produzidas apenas por tensões cisalhantes no mesmo plano. Daí resulta:

$$\gamma_{23} = \frac{1}{G_{23}} \cdot \sigma_{23} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.30)}$$

$$\gamma_{13} = \frac{1}{G_{13}} \cdot \sigma_{13} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.31)}$$

$$\gamma_{12} = \frac{1}{G_{12}} \cdot \sigma_{12} \dots \dots \dots \text{(eq. 3.32)}$$

Os parâmetros G_{12} , G_{13} e G_{23} são chamados módulos de elasticidade transversal do material.

Combinando as equações 3.27 a 3.32, resulta a lei de Hooke para materiais ortotrópicos, podendo ser apresentada na forma matricial como segue:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \dots(\text{eq. 3.33})$$

Para o caso específico da madeira, os eixos 1, 2 e 3 podem ser considerados coincidentes com as direções longitudinal (L) radial (R) e tangencial (T), conduzindo as equações 3,33 a seguinte notação:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{LL} \\ \gamma_{TT} \\ \gamma_{RR} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{RR} \\ \sigma_{TR} \\ \sigma_{RL} \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} \dots(\text{eq. 3.34})$$

4 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL APARENTE (E_a)

4.1 - Generalidades

Em geral, usa-se a seguinte expressão para o cálculo da flecha (f) no ponto médio de uma viga com uma carga P aplicada neste mesmo ponto:

$$f = \frac{P \ell^3}{48EJ} \dots\dots\dots (eq. 4.1)$$

A expressão leva em conta as deformações na viga devidas ao alongamento das fibras tracionadas e ao encurtamento das fibras comprimidas. Entretanto, é sabido ocorrerem deformações devidas ao cisalhamento, provenientes do esforço cortante agindo na viga.

Seja a situação abaixo apresentada, onde uma viga apoiada nas extremidades é carregada com uma carga P , aplicada a uma distância a do apoio (figura 4.1).

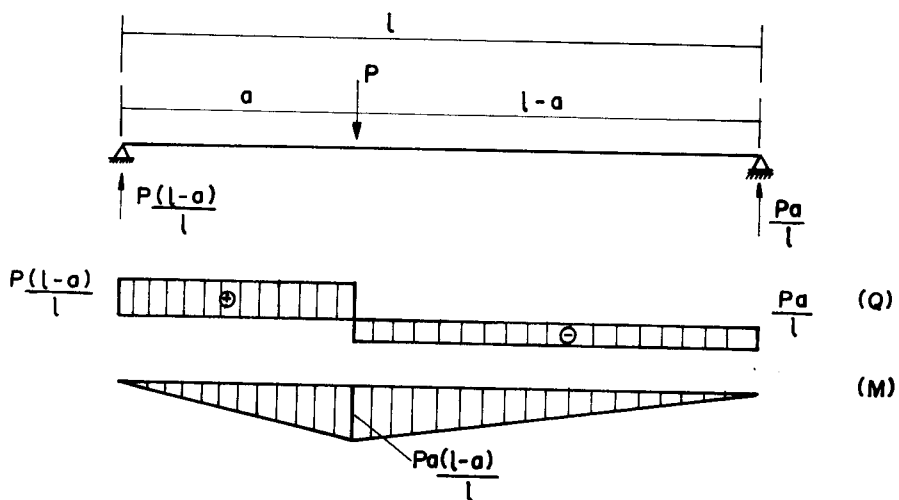
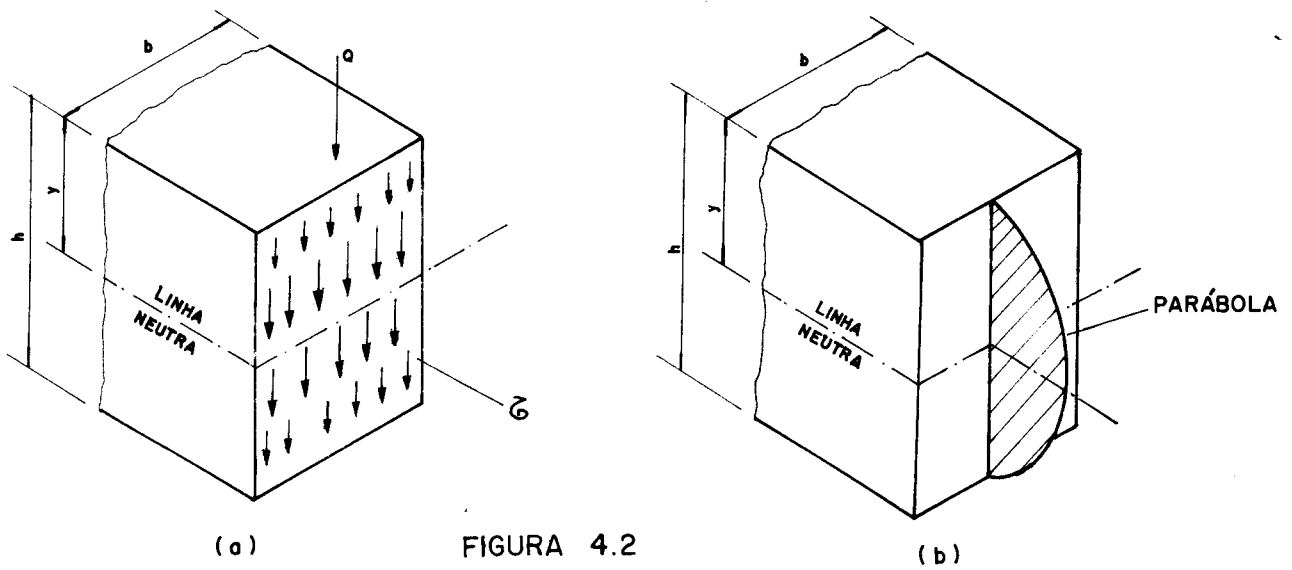


FIGURA 4.1

A distribuição das tensões cisalhantes numa seção genérica da viga considerada está mostrada nas figuras 4.2a e 4.2b.



Do equilíbrio de forças verticais na seção transversal, figura 4.2a, pode-se escrever:

$$Q = \int_s \tau ds \quad \dots\dots\dots (eq. 4.2)$$

O desenvolvimento de 4.2 origina:

$$\tau = \frac{Q}{EJ} (h^2 - 4y^2) \quad \dots\dots\dots (eq. 4.3)$$

a expressão da distribuição de tensões da figura 4.2b.

O trabalho do esforço cortante por unidade de volume é:

$$du = \frac{1}{2} \tau \gamma = \frac{\tau^2}{2G} \quad \dots\dots\dots (eq. 4.4)$$

Substituindo a expressão 4.3 em 4.4, obtêm-se:

$$du = \frac{Q^2(h^4 - 8h^2 y^2 + 16 y^4)}{128 J^2 G} \quad \dots\dots\dots (eq. 4.6)$$

Multiplicando-se a expressão 4.5 por um elemento de volume $b dx dy$ e integrando-se primeiramente em y , com os limites de integração $-\frac{h}{2}$ e $+\frac{h}{2}$, obtêm-se o trabalho interno U .

$$U = \frac{Q^2 b h^5}{128 G J^2} \cdot \frac{8}{15} dx = \frac{3}{5} \cdot \frac{Q^2}{G h b} dx \dots(\text{eq. 4.6})$$

No caso de Q ser constante, a expressão 4.6 passa a ser:

$$U = \frac{3}{5} \cdot \frac{Q^2 \ell}{b h G} \dots(\text{eq. 4.7})$$

Como:

$$Q = \frac{P(\ell - a)}{\ell} = P - \frac{Pa}{\ell} \dots(\text{eq. 4.8})$$

e, fazendo:

$$k = \frac{a}{\ell} \dots(\text{eq. 4.9})$$

a expressão 4.8 passa a ser:

$$Q = P - P k = P(1 - k) \dots(\text{eq. 4.10})$$

Substituindo 4.10 em 4.7, resulta:

$$U = \frac{3}{5} \cdot \frac{P^2(1 - 2k + k^2) \ell}{b h G} \dots(\text{eq. 4.11})$$

Para a viga considerada, o trabalho externo \bar{e} :

$$T = \frac{1}{2} P f_i \dots(\text{eq. 4.12})$$

onde f_i \bar{e} a parcela da flecha da viga, na seção onde está aplicada a carga P, devida ao esforço cortante.

Pelo Teorema da Energia de Deformação tem-se, no caso:

Trabalho interno = trabalho externo

$$\frac{1}{2} P f_i = \frac{3}{5} \cdot \frac{P^2(1 - k)^2 \ell}{b h G} \dots(\text{eq. 4.13})$$

de onde pode-se determinar:

$$f_i = \frac{6P \ell (1 - k)^2}{5b h G} \dots(\text{eq. 4.14})$$

Se a carga estiver aplicada no ponto médio da viga,
k = $\frac{1}{2} \bar{e}$:

$$f_i = \frac{6}{20} \frac{8P \ell}{b h G} \dots\dots\dots (eq. 4.15)$$

Finalmente:

$$f_i = \frac{3}{10} \cdot \frac{P \ell}{S G} \dots\dots\dots (eq. 4.16)$$

Assim sendo, a flecha total (f_t) no ponto médio da viga é:

$$f_t = \frac{P \ell^3}{48 EJ} + \frac{3P \ell}{10 SG} \dots\dots\dots (eq. 4.17)$$

Nesta expressão, os parâmetros E e G , são chamados, respectivamente, de módulo de elasticidade longitudinal e módulo de elasticidade transversal.

Neste trabalho, será chamado de E_a (Módulo de elasticidade longitudinal aparente) ao parâmetro obtido pela expressão:

$$E_a = \frac{PP \ell^3}{48 f J} \dots\dots\dots (eq. 4.18)$$

Na determinação de E_a a partir de dados experimentais obtidos ensaiando-se corpos de prova de madeira, a expressão adotada pelo IPT, em 1934 e, a seguir pela ABNT em 1940, é idêntica à 4.1, não sendo consideradas as deformações devidas ao esforço cortante no cálculo da flecha.

Para materiais cujo G tem valor de até $\frac{E}{5}$, a segunda parcela do segundo membro da expressão 4.17 pode ser tecnologicamente desprezada. Com relação à madeira, os valores de G não são perfeitamente conhecidos.

4.2 - Ensaio Preliminares

Desde as primeiras tentativas para a determinação de valores de E_a , optou-se pelo ensaio de longos corpos de prova, pois,

teoricamente, neste caso, a influência das deformações cisalhantes é menos significativa.

A relação l/h utilizando-se os corpos de prova convencionais para os ensaios de flexão simples é 14.

Tendo em vista avaliar a influência da variação de l/h no valor de E_a , programou-se a execução de ensaios para $l/h < 26$, em corpos de prova de dimensões nominais de $(5 \times 5 \times 140) \text{ cm}^3$, fazendo-se, entretanto, o vão livre variar de 20 até 130 cm.

Foram realizados inicialmente, ensaios de flexão para três espécies: Peroba rosa, Eucalipto Tereticornis e Jatobá. As peças foram ensaiadas com porcentagem de umidade sempre acima do ponto de saturação. Os corpos de prova foram preparados tendo as faces paralelas às direções tangencial e radial da madeira. Nos ensaios foi aplicada carga concentrada no ponto médio da peça simplesmente apoiada. Foi adotada a velocidade de carregamento de 10 MPa por minuto, correspondentes ao 100 kg/cm^2 por minuto indicados pelo MB-26. Como os corpos de prova seriam ensaiados duas posições (uma com carga tangencial e outra com carga perpendicular aos anéis de crescimento) para cada relação l/h , havia interesse em se conduzir os ensaios apenas a tensões abaixo do limite de proporcionalidade do material, este ponto foi estimado ao redor de 70% do valor médio de ruptura da espécie. Foram feitas leituras da flecha central para cada variação de tensão igual a 10 MPa. Com isto, nos ensaios de corpos de prova de Peroba Rosa, eram registradas 7 leituras; para os de Eucalipto Tereticornis, 8 leituras e, para o Jatobá, 9 a 10 leituras.

Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 4.1 a 4.6.

Tabela 4.1 - Peroba Rosa - Carga Tangencial.

Tabela 4.2 - Peroba Rosa - Carga Radial.

Tabela 4.3 - Eucalipto Tereticornis - Carga Tangencial.

Tabela 4.4 - Eucalipto Tereticornis - Carga Radial.

Tabela 4.5 - Jatobá - Carga Tangencial.

Tabela 4.6 - Jatobá - Carga Radial.

TABELA 4.1 - $E_a = f(\ell/h)$ - Peroba Rosa - Ensaio Preliminares - Carga Tangencial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 1	C.P. 2	C.P. 3	C.P. 4	C.P. 5	C.P. 6
26	14833	10233	12383	11919	8772	14926
24	14654	10273	11506	11719	8829	14715
22	14924	10202	11576	11789	8829	15564
20	14336	10016	11190	11740	8706	14611
18	14008	9880	11087	11249	8503	14037
16	13944	9458	10516	11175	8055	13755
14	13618	8901	10427	10880	7479	13311
12	11870	7994	10003	10117	6875	12322
10	11502	7175	8527	8993	6073	11140
8	7913	6538	7537	7379	5397	9651
6	7416	5181	5001	3637	3976	6955
4	3663	2551	2413	2998	2352	3297

TABELA 4.1 - $E_a = f(\ell/h)$ - Peroba Rosa - Ensaios Preliminares - Carga Tanq. - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 7	C.P. 8	C.P. 9	C.P. 10	C.P. 11	C.P. 12	Média	Desvio Pa- drão
26	7271	12457	7986	12301	11113	9850	11170	2453
24	7398	12216	8173	11905	11236	9596	11018	2305
22	7250	12295	8041	11876	11247	9715	11109	2511
20	7223	11832	7862	11850	11038	9431	10820	2307
18	6926	11608	7499	10831	10537	9189	10446	2234
16	6566	11745	6926	10609	10208	8845	10150	2358
14	5930	11612	6076	10307	9865	8270	9723	2510
12	4964	10785	5299	9952	9463	7501	8929	2403
10	4312	8993	4789	8252	7456	6702	7826	2223
8	3601	7474	4118	6851	6518	5664	6553	1674
6	2846	6226	3237	5582	4881	4386	4982	1432
4	2086	2821	2099	2442	----	2551	2661	492

TABELA 4.2 - $E_a = f(\ell/h)$ - Peroba Rosa - Ensaaios Preliminares - Carga Radial - Unidade
MPa

ℓ/h	C.P. 1	C.P. 2	C.P. 3	C.P. 4	C.P. 5	C.P. 6
26	15274	10508	15645	12456	9490	15547
24	15014	10493	12393	12216	9233	15321
22	15193	10542	12403	12295	9355	15401
20	14896	10414	12242	12028	9221	15166
18	13965	9846	12051	11608	8846	14212
16	12649	9656	11651	11453	8164	13552
14	11520	9125	11387	11121	7582	12590
12	10249	8590	10262	10784	7143	11990
10	9567	7928	9698	8993	6435	10834
8	7777	6909	8602	7474	5726	9283
6	6108	5631	5206	6226	4164	5487
4	3061	3296	3063	2821	2934	3346

TABELA 4.2 - $E_a = f(\ell/h)$ - Peroba Rosa - Ensaio Preliminares - Carga Radial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 7	C.P. 8	C.P. 9	C.P. 10	C.P. 11	C.P. 12	Média	Desvio padrão
26	7763	13205	9547	14040	11873	10212	11880	2432
24	7550	13288	9432	13875	11825	10104	11729	2423
22	7585	13197	9595	13650	11689	10071	11748	2405
20	7637	12987	9403	13701	11832	9911	11620	2355
18	7261	12322	8438	11806	11502	9337	10933	2184
16	6719	11861	7490	11623	11637	9124	10682	1838
14	5896	11386	6624	10990	10282	8595	9758	2160
12	5084	10774	5908	10462	10003	7943	9016	2126
10	4509	9461	5591	9306	9367	7500	8266	1905
8	3728	8027	4859	8731	7609	6718	7120	1647
6	3222	6885	3904	6815	5706	5628	5415	1134
4	2427	3564	2233	4199	----	3993	3176	597

TABELA 4.5 - $E_a = f(\ell/h)$ - Jatobá - Ensaio Preliminares - Carga Tangencial - Unidade MPa

ℓ/h	C.P. 1	C.P. 2	C.P. 3	C.P. 4	C.P. 5	C.P. 6	Média	Desvio Pa- drão
26	15006	15144	9684	22736	12597	17552	15454	4453
24	15019	14980	9731	22175	12671	17259	15306	4224
22	15010	15244	9576	22643	12556	17561	15432	4457
20	14997	14742	9499	22119	12636	17297	15215	4280
18	14443	12820	8851	21631	11982	16309	14339	4360
16	13432	12622	8842	21200	11739	15724	13927	4212
14	12547	11907	8643	20088	11297	14729	13202	3906
12	11682	11502	8555	19067	11141	13996	12657	3586
10	10167	9712	7913	16366	10346	12138	11107	2910
8	8873	8479	6522	13660	8851	9969	9392	2374
6	5983	5709	4965	10237	6414	7906	6869	1917
4	3546	3346	3073	6770	3960	5525	4370	1461

TABELA 4.6 - $E_a = f(\ell/h)$ - Jatobá - Ensaios Preliminares - Carga Radial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 1	C.P. 2	C.P. 3	C.P. 4	C.P. 5	C.P. 6	Média	Desvio Pa- drão
26	15847	16189	10515	24412	13426	18846	16539	4773
24	15730	16043	10650	24022	13550	18531	16421	4569
22	15912	16235	10523	24311	13402	18855	16540	4739
20	15605	15759	10310	23974	13368	18572	16265	4675
18	15231	13370	9651	23225	12771	17531	15297	4687
16	14160	13429	9559	22762	12151	16883	14824	4572
14	13205	12728	9280	21560	11840	15814	14085	4242
12	12316	12259	9147	20472	10877	15027	13350	3989
10	10703	10318	8478	17576	10214	13083	11729	3223
8	9307	9066	7079	14667	9033	10708	9977	2572
6	6281	6112	5388	10981	6838	8457	7343	2059
4	3714	3675	3335	7286	4220	5831	4677	1554

4.3 - Análise Qualitativa dos Resultados dos Ensaio Preliminares

Uma observação atenta dos valores obtidos nos ensaios preliminares mostra uma relativa constância de E_a para $20 \leq l/h \leq 26$, intervalo onde são atingidos os seus valores máximos.

Para se chegar a $E_a \cong E$, como tem sido normalmente conven-
cionado, deve-se ter como desprezível a influência das deformações
provocadas pelo cisalhamento, na constituição da flecha total. Po-
de-se-ia inferir ser válida esta convenção para $l/h > 20$.

Diante disto, fêz-se nova programação de ensaios, com o ob-
jetivo de obter a variação de E_a em função da variação de l/h .

4.4 - Ensaio Principais: Resultados

4.4.1 - Material: Peroba Rosa

Foram ensaiados à flexão 35 (trinta e cinco) corpos de
prova de seção nominal $(5 \times 5) \text{ cm}^2$, comprimento de 120 cm, com as
faces paralelas às direções tangencial e radial da madeira, e teor
de umidade sempre superior ao ponto de saturação. As relações l/h
escolhidas foram 5,6,9,12,14,15,18 e 21. Justificam-se os valores
extremos: pelos ensaios preliminares, praticamente não se detectou
variação de E_a para $l/h > 20$; os ensaios com $l/h \leq 4$ são de execução
mais difícil. De propósito foi incluída a relação $l/h = 14$ para
efeito de posterior comparação com resultados apresentados por ins-
tituições que adotam as sugestões do MB-26 para a determinação do
módulo de elasticidade longitudinal da madeira. Os valores interme-
diários (6,9,12,15 e 18) foram adotados para efeito de serem conse-
guidos resultados de modo a possibilitar a determinação de $E_a = f(\frac{l}{h})$

Desejando-se amostragem ocasional, os 35 corpos de prova
foram retirados de 35 vigas de Peroba Rosa chegadas ao LAMEM em di-
ferentes épocas, desde 1979 até 1981, provenientes de três Serra-
rias da cidade de São Carlos. Os resultados obtidos nos 560 (qui-
nhentos e sessenta) ensaios realizados sobre os corpos de prova de
Peroba Rosa são apresentados nas tabela 4.7 e 4.8.

Ao lado de cada valor de E_a , aparece a porcentagem desse
valor em função do E_a para $l/h = 21$. Com isso, será possível, oportu-
namente a análise conjunta dos resultados dos ensaios em Peroba
Rosa, Eucalipto Tereticornis e Jatobá.

TABELA 4.7 - $E_a = f(\ell/h)$ - Peroba Rosa - Carga Aplicada Tangencialmente - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%
21	10358	100	12066	100	11320	100	11352	100	10814	100	9963	100
18	10292	99	10598	96	11166	98	11084	98	10431	96	9526	96
15	9203	89	10317	93	10900	96	10634	94	9977	92	9116	91
14	8898	86	9980	90	10534	93	10403	92	9615	89	8818	89
12	8508	82	9502	86	9964	88	9865	87	9214	85	8658	87
9	7088	68	7722	70	8585	76	8206	72	7296	67	7578	76
6	4411	43	4672	42	5387	47	4723	42	4349	40	4965	50
5	2528	24	3244	29	4186	37	3421	30	3347	31	3842	39

ℓ/h	C.P. 7	%	C.P. 8	%	C.P. 9	%	C.P.10	%	C.P. 11	%	C.P. 12	%
21	10976	100	12385	100	12250	100	10418	100	9546	100	8575	100
18	9129	83	12010	97	12075	99	10050	96	9245	97	8243	96
15	9000	82	10670	86	11450	93	9639	43	8727	91	7876	92
14	8994	82	10674	86	10880	89	9043	87	8440	88	7729	90
12	8948	81	10567	85	10306	84	8724	84	8043	84	7373	86
9	7081	65	9710	78	8610	70	7311	70	6582	69	5882	69
6	4864	44	6885	56	5174	42	4362	42	3997	42	3811	44
5	3882	35	6053	49	3748	31	2814	27	3015	32	2926	34

TABELA 4.7 - $E_a = f(\ell/h)$ - Peroba Rosa - Carga Aplicada Tangencialmente - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P.13	%	C.P.14	%	C.P.15	%	C.P.16	%	C.P.17	%	C.P.18	%
21	9215	100	9980	100	8578	100	8272	100	11157	100	9489	100
18	8891	96	9593	96	8256	96	7838	95	10737	96	9130	96
15	8491	92	9105	91	7837	91	7567	91	10092	90	8640	91
14	8230	89	8802	88	7625	88	7276	88	9746	87	8467	89
12	7808	85	8413	84	7301	85	6903	83	9333	84	7951	84
9	6382	69	6828	68	5936	69	5638	68	7632	68	6521	69
6	4026	44	4012	40	3880	45	3495	42	4544	41	3845	41
5	2783	30	2695	27	2792	33	2552	31	3392	30	2644	28

ℓ/h	C.P.19	%	C.P.20	%	C.P.21	%	C.P.22	%	C.P.23	%	C.P.24	%
21	12270	100	7888	100	8643	100	11166	100	8903	100	7707	100
18	11908	97	7592	96	8230	95	10634	95	8527	96	7495	97
15	11616	95	7204	91	8060	93	10091	90	8124	91	7176	93
14	11371	93	7065	90	7855	91	9222	86	7827	88	7150	92
12	10468	83	6616	84	7247	84	9390	84	7421	83	7142	92
9	8958	73	5356	68	5898	68	7581	68	6067	68	6855	89
6	6613	54	3138	40	3814	44	4381	39	3572	40	5861	76
5	4108	33	2536	32	2870	33	3314	30	3038	34	4566	59

TABELA 4.7 - $E_a = f(l/h)$ - Peroba Rosa - Carga Aplicada Tangencialmente - Unidade = MPa

l/h	C.P. 25	%	C.P. 26	%	C.P. 27	%	C.P. 28	%	C.P. 29	%	C.P. 30	%
21	8846	100	7760	100	8081	100	9870	100	9702	100	9135	100
18	8423	95	7545	97	8920	98	9499	96	9423	97	9030	99
15	7994	90	7012	90	7283	90	8896	90	9042	93	8315	91
14	7694	87	6654	86	6901	85	8410	85	8379	86	7913	87
12	7287	82	6381	82	3740	83	8163	83	7871	81	7594	83
9	5909	67	5150	66	5514	68	6603	67	6520	67	6200	68
6	3520	40	3044	39	3502	43	3961	40	4395	45	3671	40
5	2665	30	2316	30	2514	31	2842	29	2910	30	2937	32

l/h	C.P. 31	%	C.P. 32	%	C.P. 33	%	C.P. 34	%	C.P. 35	%	Média	%	Desvio Padrão	Coef. Variação
21	12114	100	8621	100	9143	100	10959	100	10241	100	9880	100	1400	0,142
18	11688	96	8163	95	8840	97	10544	96	9844	96	9560	97	1332	0,139
15	10998	91	7751	90	8455	92	10022	91	9536	93	9052	92	1287	0,142
14	10796	89	7482	87	8143	89	9451	86	9153	89	8743	88	1258	0,144
12	10212	84	7082	82	7547	83	9123	83	8448	82	8260	84	1406	0,170
9	8286	68	5678	66	6378	70	7474	68	7266	71	6923	70	1099	0,159
6	5516	46	3275	38	3799	42	7230	39	6043	59	4478	45	1052	0,236
5	3823	32	2790	32	2782	30	3737	34	5233	51	3281	33	812	0,245

TABELA 4.8 - $E_a = f(\ell/h)$ - Prova Rosa - Carga Radial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%
21	10020	100	11662	100	11510	100	11598	100	10919	100	9892	100
18	9861	98	11428	98	11028	96	11188	96	10605	97	9490	96
15	9662	96	11074	95	10410	90	10726	92	10268	94	9061	92
14	9464	94	10779	92	10200	89	10526	91	10008	92	8909	90
12	9058	90	10445	90	9470	82	10022	86	9403	86	7144	82
9	7844	78	8742	75	7572	66	8190	71	7809	72	6886	70
6	5183	52	5505	47	4383	38	5186	45	5023	46	4124	42
5	3928	39	4003	34	3209	28	3930	34	3825	35	3113	31

ℓ/h	C.P. 7	%	C.P. 8	%	C.P. 9	%	C.P. 10	%	C.P. 11	%	C.P. 12	%
21	11147	100	11950	100	12474	100	10565	100	9948	100	9033	100
18	9472	85	11695	98	11601	93	10017	95	9691	97	8749	97
15	8848	79	11217	94	11097	89	9646	91	9317	94	8423	93
14	8702	78	10908	91	10888	87	9518	90	8967	90	8175	90
12	8163	73	10458	88	9935	80	9339	88	8614	87	7791	86
9	6758	61	8753	73	9157	73	7344	70	7216	73	6705	74
6	4974	45	6210	52	5125	41	4228	40	4558	46	4383	49
5	2882	26	4819	40	4234	34	3507	33	3239	33	2731	30

TABELA 4.8 - $E_a = f(l/h)$ - Peroba Rosa - Carga Radial - Unidade = MPa

l/h	C.P. 13	%	C.P. 14	%	C.P. 15	%	C.P. 16	%	C.P. 17	%	C.P. 18	%
21	9687	100	10337	100	9184	100	9029	100	11563	100	9886	100
18	9406	96	10048	97	8894	97	8802	97	11191	97	9531	96
15	9064	94	9678	94	8601	94	8429	93	10898	94	9208	93
14	8843	91	9293	90	8318	91	8208	91	10614	92	8995	91
12	8437	87	8650	84	7894	86	7858	87	10035	87	8576	87
9	7029	73	7135	69	6718	73	6511	72	7935	69	6712	68
6	4437	46	4148	40	4190	46	4044	44	5230	45	4434	45
5	2712	28	2884	28	2470	27	2777	31	3226	28	3173	32

l/h	C.P. 19	%	C.P. 20	%	C.P. 21	%	C.P. 22	%	C.P. 23	%	C.P. 24	%
21	12783	100	8134	100	9490	100	12046	100	9549	100	8252	100
18	12757	100	7828	96	9213	97	11580	96	9147	96	7852	95
15	12107	95	7556	93	8847	93	11244	93	8996	94	7851	95
14	11496	90	7438	91	8636	91	11018	91	8829	92	7845	95
12	10526	82	7015	86	8175	86	10147	84	8147	85	7802	95
9	9507	74	5810	71	6837	72	8578	71	6804	71	7502	91
6	6019	47	3663	45	4354	46	5451	45	4235	44	6107	74
5	5158	40	2452	30	3050	32	4003	33	2854	30	4338	53

TABELA 4.8 - $E_a = f(l/h)$ - Peroba Rosa - Carga Radial - Unidade = MPa

l/h	C.P. 25	%	C.P. 26	%	C.P. 27	%	C.P. 28	%	C.P. 29	%	C.P. 30	%
21	9242	100	8260	100	8420	100	10317	100	9990	100	9722	100
18	8976	97	7945	96	8024	95	10028	97	9859	99	9409	97
15	8584	93	7612	92	7698	91	9507	92	9410	94	9055	93
14	8356	90	7476	90	7459	89	9252	90	9023	90	8840	91
12	7929	86	7259	88	7140	85	8945	87	8581	86	8544	88
9	6635	72	5880	71	5708	68	7350	71	7130	71	7029	72
6	3803	41	3266	39	3188	38	4708	46	4440	44	4112	42
5	2714	29	2576	30	2345	28	3322	32	3122	31	2815	29

- 51 -

l/h	C.P. 31	%	C.P. 32	%	C.P. 33	%	C.P. 34	%	C.P. 35	%	Média	%	Desvio Padrão	Coef. Variaç.
21	12701	100	9319	100	9553	100	11789	100	10730	100	10306	100	1316	0,128
18	12288	97	8899	95	9321	98	11459	97	10175	95	9919	96	1302	0,131
15	11837	93	8526	93	8946	94	10952	93	9814	91	9551	93	1218	0,128
14	11420	90	8359	90	8670	91	10631	90	9329	87	9296	90	1159	0,125
12	10961	86	7858	84	8171	86	10148	86	8820	82	8813	86	1062	0,120
9	9127	72	6410	69	6897	72	8400	71	7685	71	7381	72	962	0,130
6	5583	44	3926	42	4215	44	5217	44	6446	60	4689	45	807	0,172
5	3872	30	3608	28	2960	31	3454	29	5317	50	3388	33	752	0,222

4.4.2 - Gráficos de $E_a = f(l/h)$ - Peroba Rosa - Cargas
Tangencial e Radial

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8, foram traçados os gráficos de $E_a = f(l/h)$, para a Peroba Rosa, referentes aos carregamentos tangencial e perpendicular aos anéis de crescimento (radial).

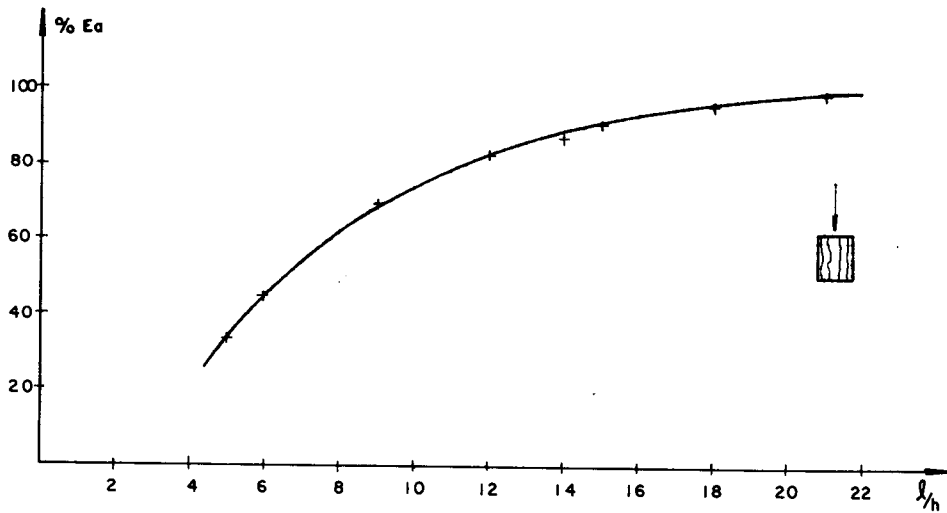


Fig. 4.1 - $E_a = f(l/h)$ - Peroba Rosa - Carga Tangencial

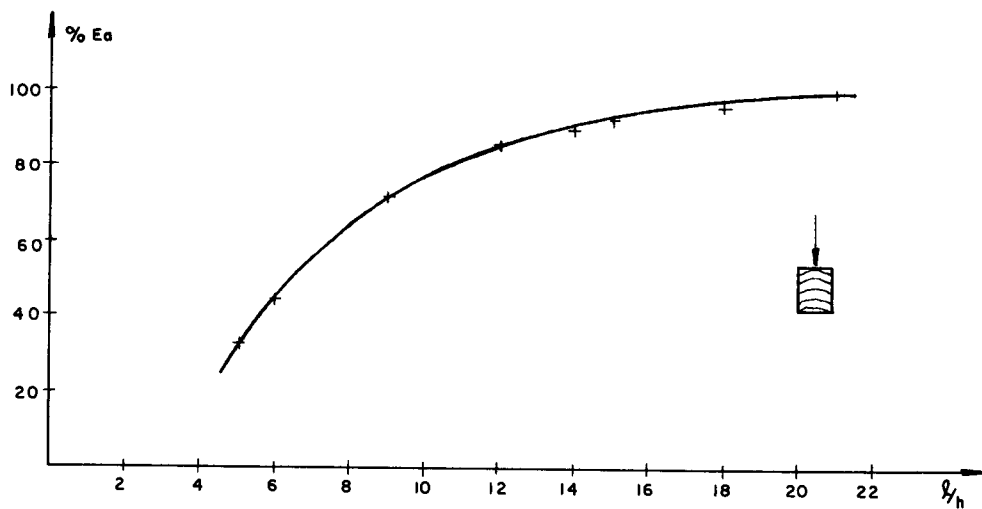


Fig. 4.2 - $E_a = f(l/h)$ - Peroba Rosa - Carga Radial

4.4.3 - Material. Eucalipto Tereticornis

Foram ensaiados 33 (trinta e três) corpos de prova de seção nominal (5 x 5) cm², comprimento de 120 cm, com as faces paralelas às direções tangencial e radial da madeira, e teor de umidade sempre superior ao ponto de saturação. As relações l/h escolhidas foram as mesmas citadas no item 4.3.1.

Todos os corpos de prova de Eucalipto tereticornis foram retirados de uma mesma tora, proveniente da Estação Experimental de Luis Antonio, SP, do Instituto Florestal da Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo.

Também neste caso, houve interesse de se conduzir os ensaios apenas a tensões abaixo do limite de proporcionalidade do material, à vista dos diversos ensaios a realizar sobre um mesmo corpo de prova.

Os resultados obtidos nos 528 (quinhentos e vinte e oito) ensaios realizados sobre os corpos de Prova de Eucalipto Tereticornis são apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

TABELA 4.9 - $E_a = f(\ell/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Tangencial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%
21	11783	100	11039	100	10425	100	11015	100	11126	100	11031	100
18	11616	99	10880	99	10226	98	10849	98	11056	99	10763	97
15	11252	95	10435	95	9630	92	10479	95	10455	94	9957	90
14	10854	92	10284	93	9469	90	10213	93	10306	93	9409	85
12	10058	85	9981	90	9148	88	9708	88	9920	89	9034	82
9	8262	70	8606	78	7247	70	7860	71	8325	75	7490	68
6	5258	45	6100	55	4728	45	5522	50	6126	55	7374	49
5	4166	35	4645	42	3745	36	4386	40	4810	43	4440	40

ℓ/h	C.P. 7	%	C.P. 8	%	C.P. 9	%	C.P. 10	%	C.P. 11	%	C.P. 12	%
21	10036	100	12438	100	12688	100	9350	100	9885	100	11431	100
18	9800	98	12201	98	12484	98	9190	98	9551	97	11274	99
15	9158	91	11675	94	12020	95	8732	93	9104	92	10768	94
14	8908	89	11377	91	11507	91	8149	87	8917	90	10596	93
12	8440	84	10835	87	11008	87	7524	80	8303	84	10167	89
9	7329	73	8827	71	9202	72	6780	73	7252	73	8196	72
6	4895	49	5935	48	6215	49	4565	49	5159	52	5605	49
5	4131	41	5291	43	5206	41	3789	41	3948	40	4522	40

TABELA 4.9 - $E_a = f(\ell/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Tangencial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 13	%	C.P. 14	%	C.P. 15	%	C.P. 16	%	C.P. 17	%	C.P. 18	%
21	8142	100	12002	100	10660	100	13229	100	11872	100	9662	100
18	7938	97	11789	98	10421	98	12785	97	11710	97	9449	98
15	7668	94	11130	93	9898	93	11917	90	11257	95	8911	92
14	7436	91	10596	88	9536	89	11347	86	10833	91	8585	89
12	6910	85	9946	83	8941	84	10265	78	10320	87	7993	83
9	6167	76	8231	69	8020	75	9465	72	8903	75	7114	74
6	4523	56	6526	54	5192	49	6924	52	6410	54	5034	52
5	3900	48	5630	47	4279	40	5987	45	5709	48	4405	46

ℓ/h	C.p. 19	%	C.P. 20	%	C.P. 21	%	C.P. 22	%	C.P. 23	%	C.P. 24	%
21	11221	100	13744	100	10383	100	7412	100	8774	100	12363	100
18	10936	97	13496	98	10221	98	7150	96	8475	97	11735	94
15	10146	90	12889	94	9686	93	6866	93	8188	93	11146	90
14	9754	87	12722	93	9350	90	6684	90	7962	91	10562	85
12	9060	81	12201	89	8806	85	6293	85	7439	85	9909	80
9	8478	76	10187	74	7699	74	5180	70	6051	69	7859	64
6	6928	62	7044	51	4704	45	3541	48	4235	49	5101	41
5	6161	55	5083	37	3841	37	2391	32	3243	37	3531	29

TABELA 4.9 - $E_a = f(\ell/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Tangencial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 25	%	C.P. 26	%	C.P. 27	%	C.P. 28	%	C.P. 29	%	C.P. 30	%
21	11915	100	13456	100	9874	100	10517	100	9124	100	11569	100
18	11009	92	12685	94	9597	97	10036	95	8782	96	11018	95
15	10445	88	11723	87	9189	93	9244	88	8407	92	10425	90
14	10055	84	11209	83	8685	88	8812	84	8002	88	9893	86
12	9363	79	10480	78	8263	84	8191	78	7631	84	8757	76
9	8085	68	8926	66	6764	69	7097	67	6489	71	7750	67
6	4781	40	5397	40	4696	48	5127	49	4450	49	6089	53
5	3318	28	3753	28	3624	37	4401	42	3241	36	4901	42

ℓ/h	C.P. 31	%	C.P. 32	%	C.P. 33	%	Média	%	Desvio Padrão	Coefficiente Variação
21	12992	100	9507	100	11937	100	10988	100	1528	0,139
18	12583	97	9341	98	11444	96	10682	97	1473	0,138
15	11804	91	8806	93	10761	90	10126	92	1379	0,136
14	11218	86	8360	88	9990	84	9745	89	1341	0,138
12	10259	79	7744	81	9274	78	9157	83	1294	0,141
9	8651	67	6539	69	7774	65	7782	71	1071	0,138
6	5731	44	4768	50	6118	51	5418	49	845	0,156
5	4008	31	3673	39	4803	40	4332	39	854	0,197

TABELA 4.10 - $E_a = f(\ell/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Radial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%
21	11399	100	10868	100	11236	100	11290	100	11629	100	11555	100
18	11097	97	10682	98	10563	94	10993	97	11437	98	11298	98
15	10639	93	10317	95	9990	89	10669	94	10984	94	11087	96
14	10301	90	10168	93	9885	88	10464	93	10729	92	10901	94
12	9918	87	9870	91	9675	86	10054	89	10466	90	10810	93
9	9332	82	8646	80	8466	75	8862	78	8233	79	8543	74
6	5887	52	6088	56	6593	59	6740	60	7110	61	6564	57
5	4394	39	4522	42	5585	50	5744	51	5593	48	5576	48

ℓ/h	C.P. 7	%	C.P. 8	%	C.P. 9	%	C.P. 10	%	C.P. 11	%	C.P. 12	%
21	10464	100	12827	100	12998	100	10559	100	10966	100	12774	100
18	10202	97	12540	98	12646	97	10294	97	10617	97	12547	98
15	9868	94	11995	93	12135	93	9560	91	9857	90	11608	91
14	9595	92	11862	92	11789	91	9145	87	9471	86	10834	85
12	9374	90	11515	90	11171	86	8370	79	8783	80	9758	76
9	8259	80	10143	79	9458	73	7681	74	6619	60	8451	67
6	6352	61	7319	57	6703	52	5341	50	4744	43	6853	54
5	4999	48	5972	47	5790	45	4357	41	4040	37	5495	43

TABELA 4.10 - $E_a = f(\ell/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Radial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 13	%	C.P. 14	%	C.P. 15	%	C.P. 16	%	C.P. 17	%	C.P. 18	%
21	9030	100	13187	100	11838	100	14739	100	13082	100	10583	100
18	8889	98	12933	98	11572	98	14525	98	12776	98	10331	98
15	8289	92	11832	90	11017	93	13436	91	11960	91	9750	92
14	8130	90	10799	82	10612	90	12318	84	11576	88	9071	86
12	7718	85	9646	73	9974	84	11637	79	10856	83	8469	80
9	6498	72	9139	69	8713	74	9906	67	9852	75	7883	74
6	4882	54	7723	59	6148	52	7450	51	6581	50	5968	56
5	4201	47	5792	44	4950	42	6695	45	5719	44	5105	48

ℓ/h	C.P. 19	%	C.P. 20	%	C.P. 21	%	C.P. 21	%	C.P. 22	%	C.P. 23	%
21	12104	100	15741	100	11538	100	8243	100	9856	100	13778	100
18	11832	98	15109	96	11235	97	8033	97	9386	95	12973	94
15	10932	90	14345	91	10737	93	7593	92	9013	91	12418	90
14	10537	87	13367	85	10215	89	7539	91	8563	87	11841	86
12	9937	82	12627	80	9529	83	7147	87	8040	82	10884	79
9	8772	72	10834	69	8226	71	6292	76	6680	69	9185	67
6	6555	54	7526	48	5102	44	4027	49	4096	42	6647	48
5	5294	44	5766	37	3885	34	2775	34	2946	30	4239	31

TABELA 4.10 - $E_a f(\ell/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Radial - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 25	%	C.P. 26	%	C.P. 27	%	C.P. 28	%	C.P. 29	%	C.P. 30	%
21	12878	100	16102	100	10407	100	11565	100	9824	100	11662	100
18	12464	97	15506	96	9796	94	10919	94	9541	97	10922	94
15	11752	91	14782	92	9216	89	10192	88	8955	91	10453	90
14	11170	87	13826	86	8748	84	9611	83	8534	87	10055	86
12	10318	80	12919	80	8209	79	8777	76	7915	81	9472	81
9	8682	67	10821	67	6815	65	7585	66	6931	71	8645	74
6	6743	52	6932	43	4383	42	5535	48	4910	49	5710	49
5	4662	36	5265	33	3014	29	4272	37	3602	37	4311	37

ℓ/h	C.P. 31	%	C.P. 32	%	C.P. 33	%	Média	%	Desvio Padrão	Coefficiente Variação
21	14498	100	11597	100	12733	100	11926	100	1766	0,148
18	13584	94	11232	97	12318	97	11539	97	1693	0,147
15	13074	90	10618	92	11620	91	10930	92	1602	0,147
14	12112	84	10058	87	11076	87	10452	88	1430	0,137
12	10683	74	9454	82	10443	82	9830	82	1379	0,141
9	8920	62	8147	70	9080	71	8558	72	1193	0,139
6	5837	40	7077	61	6628	52	6138	51	1007	0,164
5	4174	29	5627	49	4875	38	4825	40	949	0,197

4.4.4 - Gráficos de $E_a = f(l/h)$ - Eucalipto Tereticornis
Cargas Tangencial e Radial

A partir dos dados apresentados nas tabelas 4.9 e 4.10 , são traçados os gráficos de $E_a = f(l/h)$, para o Eucalipto Tereticornis, referentes aos carregamentos tangencial e radial.

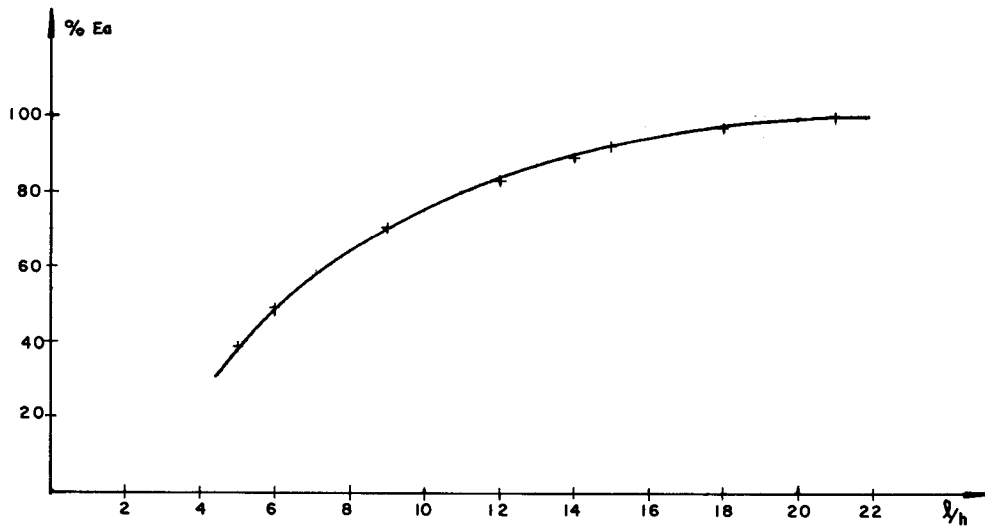


Fig. 4.3 - $E_a = f(l/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Tangencial

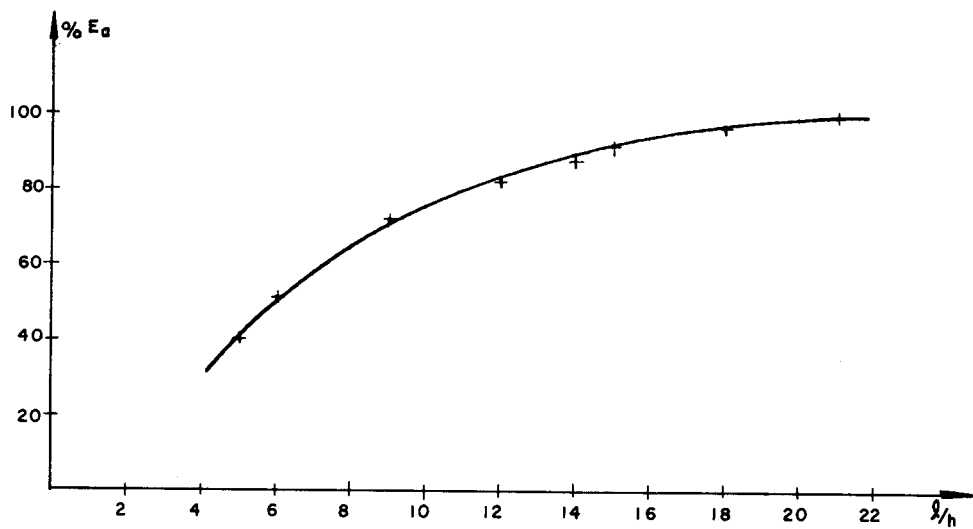


Fig. 4.4 - $E_a = f(l/h)$ - Eucalipto Tereticornis - Carga Radial

4.4.5 - Material. Jatobá

Foram ensaiados à flexão 28 (vinte e oito) corpos de prova de seção nominal $(5 \times 5) \text{ cm}^2$, comprimento de 120 cm, com as faces formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial da madeira, e teor de umidade sempre superior ao ponto de saturação. As relações l/h escolhidas foram as mesmas citadas no item 4.3.1.

Os corpos de prova foram retirados de vigas de Jatobá, de seção nominal $(6 \times 12) \text{ cm}^2$ de um lote de peças destinadas à montagem das estruturas de cobertura de um Conjunto de Residências da Cohab, na cidade de São José do Rio Pardo, SP. Não houve preocupação para a retirada dos corpos de prova com faces paralelas às direções tangencial e radial, preferindo-se manter as dimensões $5 \times 5 \times 120$ cm, já utilizadas nos experimentos anteriores e aceitar a disposição aleatória das camadas de crescimento existente nas peças recebidas para os ensaios.

Os resultados obtidos nos 224 (duzentos e vinte e quatro) ensaios sobre os corpos de prova de Jatobá são apresentados na Tabela 4.11.

TABELA 4.11 - $E_a = f(\ell/h)$ - Jatobá - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%
21	15001	100	11412	100	15011	100	13125	100	14503	100	9531	100
18	14446	96	11164	98	12820	85	12451	95	14244	98	8851	93
15	12881	96	10676	94	12326	82	12073	92	13178	91	8767	92
14	12547	84	10038	88	11908	79	11889	90	12800	88	8643	91
12	11682	78	8928	78	11502	77	11342	86	12317	85	8555	90
9	9697	65	7774	68	9293	62	11049	84	8012	55	7266	76
6	5983	40	4337	38	5709	38	7311	55	6796	47	4966	52
5	4367	29	2969	26	3995	27	5712	44	5605	37	3896	41

ℓ/h	C.P. 7	%	C.P. 8	%	C.P. 9	%	C.P. 10	%	C.P. 11	%	C.P. 12	%
21	17245	100	15839	100	17991	100	17447	100	17475	100	14574	100
18	17096	99	15419	97	17495	97	17168	98	17157	98	12988	89
15	16640	96	13949	88	16750	93	16599	95	15251	87	12538	86
14	16398	95	13922	87	16360	91	16405	94	15011	86	12234	84
12	15914	92	13892	87	15581	87	16017	92	14862	85	11125	76
9	14429	84	11596	73	13797	77	13663	78	13418	77	9240	63
6	11083	64	7988	50	9800	54	9349	54	7346	42	5613	39
5	9121	53	6415	41	7509	42	6778	39	6757	39	3798	26

TABELA 4.11 - $E_a = f(\ell/h)$ - Jatobá - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 13	%	C.P. 14	%	C.P. 15	%	C.P. 16	%	C.P. 17	%	C.P. 18	%
21	12663	100	22272	100	15828	100	13555	100	14719	100	10055	100
18	11982	95	21631	97	15205	96	12791	94	14075	94	9817	98
15	11374	90	20598	42	13744	87	12455	92	12938	88	9416	94
14	11297	89	20087	90	13413	85	11963	78	12719	86	9283	92
12	11141	88	19067	86	12969	82	10960	81	12282	83	8906	82
9	9720	77	15518	70	10971	69	9543	70	11156	76	7822	78
6	6414	51	10237	46	7399	47	7362	54	8347	57	5463	54
5	4683	37	8569	38	6152	39	5223	39	7545	51	4595	46

ℓ/h	C.P. 19	%	C.P. 20	%	C.P. 19	%	C.P. 20	%	C.P. 21	%	C.P. 22	%
21	14107	100	17518	100	18556	100	16430	100	15824	100	19647	100
18	12657	90	16309	93	17609	95	15651	95	15384	97	18307	93
15	11922	85	15313	87	16632	90	14442	88	13765	87	17317	88
14	11665	83	14746	84	16515	89	13997	85	13535	86	16759	58
12	11152	79	13996	80	15424	83	13318	81	12443	79	15927	81
9	8653	61	11544	66	13340	72	10954	67	10711	68	13338	68
6	6805	48	7906	45	4308	50	7578	46	6921	44	9217	47
5	5437	39	6464	37	8001	43	6372	39	5781	37	7686	39

TABELA 4.11 - $E_a = f(\ell/h)$ - Jatobá - Unidade = MPa

ℓ/h	C.P. 25	%	C.P. 26	%	C.P. 27	%	C.P. 28	%	Média	%	Desvio Padrão	Coeffic. Variaç.
21	18161	100	17238	100	13925	100	17490	100	15612	100	2823	0,181
18	17033	94	16742	97	13941	97	16278	93	14889	95	2785	0,187
15	16056	88	15888	92	12952	93	15264	87	13990	90	2593	0,185
14	15680	86	14611	85	12735	91	15066	86	13651	87	2535	0,186
12	14852	82	14322	83	12166	87	14236	81	13031	83	2464	0,189
9	12392	68	12875	75	10958	79	13007	74	11133	71	2228	0,200
6	8070	44	9134	53	7505	54	8517	39	7588	49	1638	0,216
5	6879	38	7548	44	6270	45	6628	38	6098	39	1528	0,251

4.4.6 - Gráfico de $E_a = f(\ell/h)$ - Jatobá

A partir dos dados apresentados na tabela 4.11, é traçado o gráfico de $E_a = f(\ell/h)$, para o Jatobá, referente a carregamento fazendo um ângulo qualquer em relação aos anéis de crescimento.

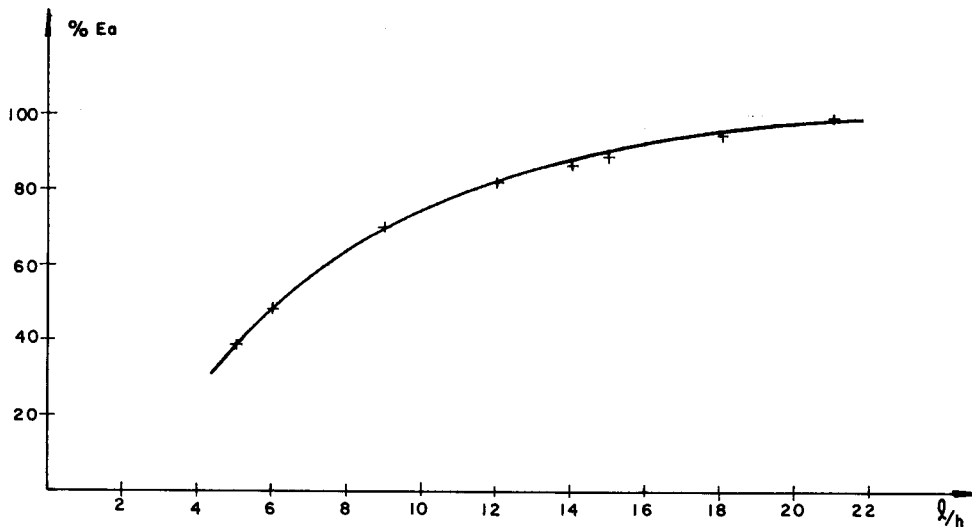


Fig. 4.5 - $E_a = f(\ell/h)$ - Jatobá - Carga em Direção Qualquer Relativamente aos Anéis de Crescimento

4.4.7 - Análise dos Resultados

Uma simples observação dos gráficos e tabelas apresentados evidencia a variação do módulo de elasticidade longitudinal em função da relação ℓ/h da viga, mostrando a influência significativa das deformações de vidas aos esforços cisalhantes na flecha total de uma peça fletida de madeira.

Constata-se valores da % E_a relativamente próximos, para as tres espécies ensaiadas, independentemente da posição relativa entre os anéis de crescimento e a direção da carga aplicada. Observa-se também, uma certa constância dos desvios para valores de $\ell/h \geq 9$. Abaixo disto, crescem os desvios, de um modo geral, por motivos inerentes ao próprio ensaio cada vez de execução mais delicada quanto menor fôr a relação ℓ/h .

4.4.7.1 - Peroba Rosa e Eucal. Tereticornis Carga Tang.

Agrupando-se os resultados obtidos com aplicação de carga tangencial nos cornos de prova de Peroba Rosa e Eucalipto Tereticornis, através das médias dos valores das espécies, obtêm-se a tabela 4.12.

Considerou-se a média ponderada em função do número de corpos de prova das espécies, 35 para a Peroba Rosa e 33 para o Eucalipto Tereticornis; obteve-se a função e a representação gráfica correspondente apresentada na fig. 4.8.

TABELA 4.12

l/h	PEROBA ROSA		EUCALIPTO TERETICORNIS		MÉDIA	
	Média de E_a (M Pa) 35 corpos prova	% Média	Média de E_a (M Pa) 33 corpos prova	% Média	E_a (MPa)	%
21	9880	100	10988	100	10418	100
18	9560	97	10682	97	10105	97
15	9252	92	10126	92	9573	92
14	8743	88	9745	89	9229	89
12	8260	84	9157	83	8695	83
9	6923	70	7782	71	7340	70
6	4478	45	5418	49	4934	47
5	3281	33	4332	39	3791	36

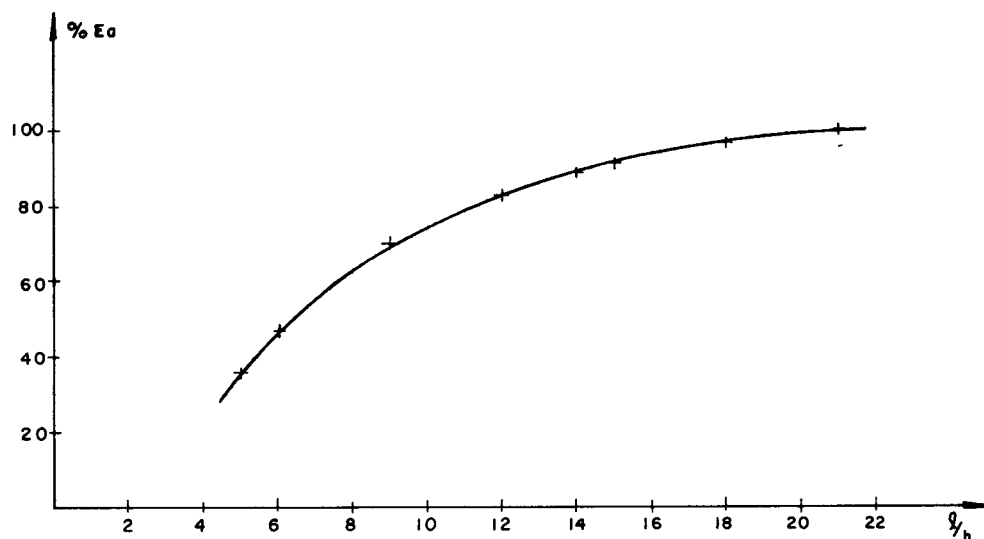


Fig. 4.8 - $E_a = f(l/h)$ para Carga Tangencial - Média Entre Peroba Rosa e Eucalipto Tereticornis.

4.4.7.2 - Peroba Rosa E Eucalipto Tereticornis - Carga Radial

Analogamente para a carga radial para as mesmas espécies, Peroba Rosa e Eucalipto Tereticornis foram obtidas a tabela 4.13 e a figura 4.9

TABELA 4.13

PEROBA ROSA			EUCALIPTO TERETICORNIS		MÉDIA	
ℓ/h	Média de E_a (MPa)	% Média	Média de E_a (MPa)	% Média	E_a (MPa)	%
35 corpos prova			33 corpos prova			
21	10306	100	11926	100	11092	100
18	9919	96	11539	97	10705	97
15	9551	93	10930	92	10220	92
14	9296	90	10452	88	9857	89
12	8813	86	9830	82	9307	84
9	7381	72	8558	72	7952	72
6	4689	45	6138	51	5392	49
5	3388	33	4825	40	4085	37

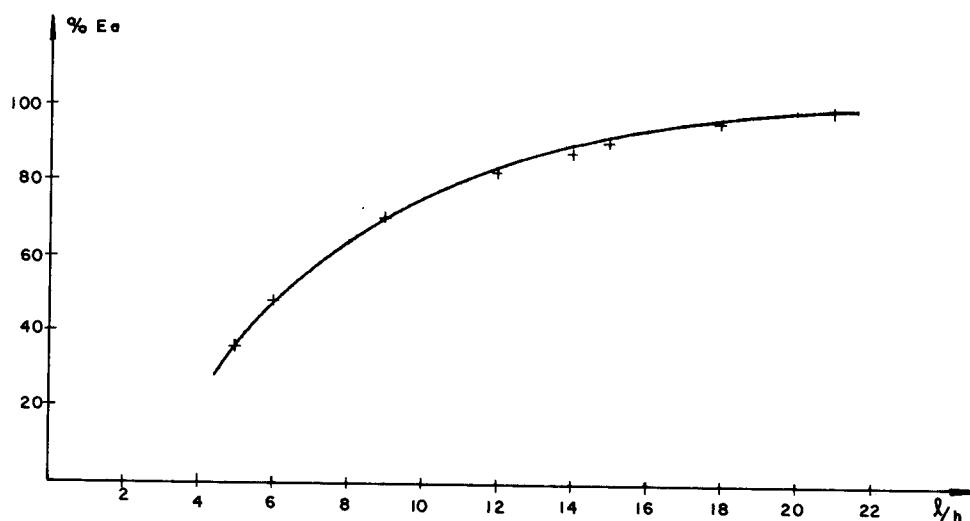


Fig. 4.9 - $E_a = f(\ell/h)$ para Carga Radial - Média entre Peroba Rosa e Eucalipto Tereticornis.

4.4.7.3 - Peroba Rosa, Eucalipto Tereticornis e Jatobá

Agrupando-se os resultados médios, carga radial e tangencial, obtidos para a Peroba Rosa, o Eucalipto Tereticornis e os resultados médios, carga em direção qualquer para o Jatobá, foram obtidos a tabela 4.14 e o gráfico da fig. 4.10.

Fig. 4.10 - $E_a = f(l/h)$ - Carga em ângulos Quaisquer em Relação aos Anéis de Crescimento

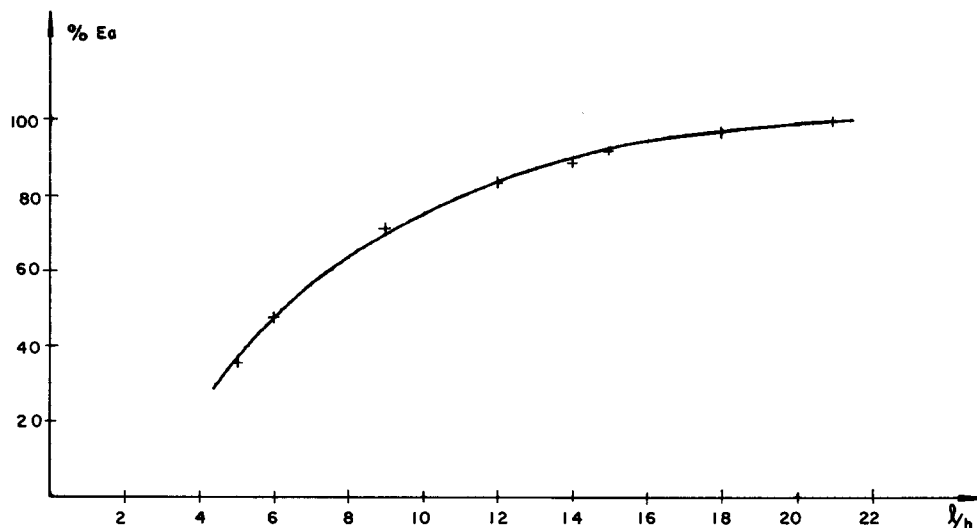


TABELA 4.14

ℓ/h	PERORA ROSA E _a (MPa) - 35 C.P.		EUCALIPTO TERETICORNIS E _a (MPa) - 33 C.P.		JATOBA E _a (MPa) - 28 C.P.		MÉDIA	
	Carga Radial	Carga Tang.	Carga Radial	Carga Tang.	Ângulo Qualquer	E _a (MPa)	%	
21	10306	9880	11926	10988	15612	11584	100	
18	9919	9560	11539	10682	14889	11170	97	
15	9551	9052	10930	10126	13990	10596	92	
14	9296	8743	10452	9475	13651	10190	88	
12	8813	8260	9830	9157	13031	9689	84	
9	7381	6923	8558	7782	11133	8241	71	
6	4689	4478	6138	5418	7588	5177	48	
5	3388	3281	4825	4332	6098	4307	38	

4.4.8 - Outras Madeiras

Há interesse em analisar a variação do módulo de elasticidade aparente em função da relação l/h para outras espécies de madeira, principalmente as de aplicação estrutural e, ainda mais, algumas menos conhecidas com tendência de aceitação na substituição de espécie convencional.

4.4.8.1 - Estimativa do Número Mínimo de Corpos de Prova para a Determinação de $E_a = f(l/h)$.

À vista da inconveniência de se realizar número elevado de ensaios, a partir dos resultados obtidos foi fixado o número estatisticamente suficiente de corpos de prova para se determinar $E_a = f(l/h)$. Para isto admitiu-se desvio padrão $s = 0,17 \bar{x}$, compatível com os dados das tabelas 4.7 a 4.11; $\delta = 0,20 \bar{x}$, ou seja, aceita-se uma variação de 20% para a estimativa do valor médio \bar{x} . O valor de t (tabelado) para um nível de segurança de 95%, e 5 graus de liberdade é $t_{05} = 2,57$ e;

$$n \geq \frac{t_{05}^2 s^2}{\delta^2} ;$$

resulta $n \geq 6$.

Assim, aceita-se como suficiente o ensaio de 6 corpos de prova para cada relação l/h , na determinação de $E_a = f(l/h)$ das diversas espécies de madeira.

Convém registrar a citação feita por Hellmeister, em 1973, acerca da suficiência de apenas 6 corpos de prova, escolhidos ao acaso, para a determinação de propriedades físicas e mecânicas da madeira.

4.4.8.2 - Ensaio de Outras Madeiras

Foram feitos ensaios utilizando corpos de prova obtidos ao acaso, de mais quatro espécies: Canafístula, Canela, Angico e Pau d'arco. Os resultados são apresentados nas tabelas 4.15 até 4.19.

TABELA 4.15 - Canafístula - Carga Tangencial

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%	Média	%	D. Padrão	Coef. Var.
21	12771	100	14904	100	13725	100	13062	100	9747	100	10874	100	12514	100	1892	0,151
18	12516	98	13554	91	12554	92	12776	98	9321	96	10793	99	11949	96	1537	0,129
15	11752	92	12139	81	11620	85	11987	92	8823	91	10354	95	11113	89	1289	0,116
14	11323	89	11312	76	10947	80	11210	86	8297	85	10161	93	10542	84	1183	0,112
12	10610	83	9693	65	10144	74	10184	78	7123	73	9834	90	9598	77	1253	0,131
9	9469	74	9566	64	10048	73	8684	67	5834	60	7553	69	8526	68	1581	0,186
6	5661	44	6868	46	6699	49	6073	47	3909	40	4591	42	5634	45	1176	0,209
5	5254	41	5977	40	6272	46	5723	43	3461	36	4307	40	5167	41	1081	0,209

TABELA 4.16 - Canafístula - Carga Radial

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%	Média	%	D. Padrão	Coef. Var.
21	13657	100	15367	100	16281	100	13543	100	10052	100	11931	100	13472	100	2262	0,170
18	13003	95	14850	97	15790	97	12972	96	9724	97	11604	97	12990	96	2186	0,168
15	12275	90	14098	92	14877	91	12378	91	9134	91	11209	94	12329	92	2054	0,167
14	11980	88	13477	88	14068	86	10923	81	8785	87	10975	92	11701	87	1922	0,164
12	10407	76	12424	81	12605	77	9870	73	8147	81	10413	87	10644	79	1671	0,157
9	8879	65	9872	64	11234	69	8810	65	7083	70	8260	69	9023	67	1416	0,157
6	7600	56	8297	54	8887	55	7167	53	5000	50	4920	41	6979	52	1671	0,239
5	6908	51	7424	48	7165	44	6245	46	4298	43	4291	36	6055	45	1419	0,234

TABELA 4.17 - Canela - Carga em Direção Qualquer

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%	Média	%	D. Padr.	Coef. Var.
21	11773	100	10399	100	11323	100	11987	100	13797	100	13047	100	12054	100	1215	0,101
18	11170	95	10377	99	10999	97	11895	99	13472	98	12674	97	11765	98	1151	0,098
15	10842	92	9879	95	10596	94	11153	93	13042	95	11310	87	11137	92	1060	0,095
14	10792	92	9601	92	9739	86	10754	89	12928	94	11207	86	10837	90	1204	0,111
12	10654	90	9045	87	8025	71	9956	83	12704	92	11009	84	10232	85	1627	0,159
9	9744	83	7355	70	6880	61	7732	65	9984	72	9479	73	8512	71	1376	0,162
6	8342	71	4555	44	6413	57	3883	32	6640	48	6924	53	6126	50	1636	0,267
5	5575	47	3290	32	5109	45	2907	24	5348	39	5668	43	4650	39	1222	0,263

TABELA 4.18 - Angico - Carga em Direção Qualquer

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%	Média	%	D. Padr.	Coef. Var.
21	19622	100	12880	100	13641	100	13950	100	12353	100	11413	100	13977	100	2911	0,208
18	18852	96	12767	99	13203	97	13788	99	12179	98	11237	98	13671	98	2684	0,196
15	17814	91	12236	95	12135	89	13368	96	11994	97	10813	95	13060	93	2466	0,189
14	17071	87	12009	93	11264	83	12870	92	11302	92	10631	93	12523	90	2350	0,188
12	16114	82	11555	90	10565	78	12266	88	10807	87	10014	88	11892	85	2227	0,187
9	13048	67	10350	80	8781	64	10092	72	9830	80	8225	72	10054	72	1677	0,167
6	9199	47	7750	60	5433	40	5890	42	6696	54	6326	55	6882	49	1381	0,201
5	7439	38	5747	45	4590	34	4945	35	5281	43	5197	46	5533	40	1009	0,182

TABELA 4.19 - Pau D'Arco - Carga em Direção Qualquer

ℓ/h	C.P. 1	%	C.P. 2	%	C.P. 3	%	C.P. 4	%	C.P. 5	%	C.P. 6	%	Média	%	D. Padr.	Coef. Var.
21	13844	100	10867	100	15839	100	15957	100	12224	100	11799	100	13422	100	2147	0,160
18	13391	97	10462	96	15420	96	15490	97	11739	96	11662	99	13027	97	2098	0,161
15	12588	91	9932	91	13950	88	14466	91	11060	90	11284	96	12213	91	1768	0,145
14	11766	85	9718	89	13920	88	13776	86	10731	88	10869	92	11796	88	1717	0,146
12	10042	73	9292	86	13438	85	12371	78	10074	82	9595	81	10802	81	1688	0,156
9	9095	66	8192	75	11596	73	11255	71	8805	72	8344	71	9548	71	1494	0,156
6	6180	45	6651	61	8679	55	6548	41	7496	61	6170	72	6954	52	974	0,140
5	4452	33	6085	56	6967	43	4872	31	5862	48	5639	48	5630	42	866	0,154

4.4.8.3 - Resumo dos Resultados

Com base nos resultados dos ensaios para a determinação de E_a em função da variação de $1/h$ para a Peroba Rosa, Eucalipto Tereticornis, Jatobá, Canafístula, Angico, Pau d'arco e Canela, apresentam-se, na tabela 4.20, os valores da % de E_a obtidos experimentalmente (média ponderada em relação ao número de ensaios realizados nos corpos de prova das sete espécies) para diversos valores de $1/h$.

TABELA 4.20.

$1/h$	% E_a
≥ 21	100
18	97
15	92
14	88
12	83
9	70
6	48
5	39

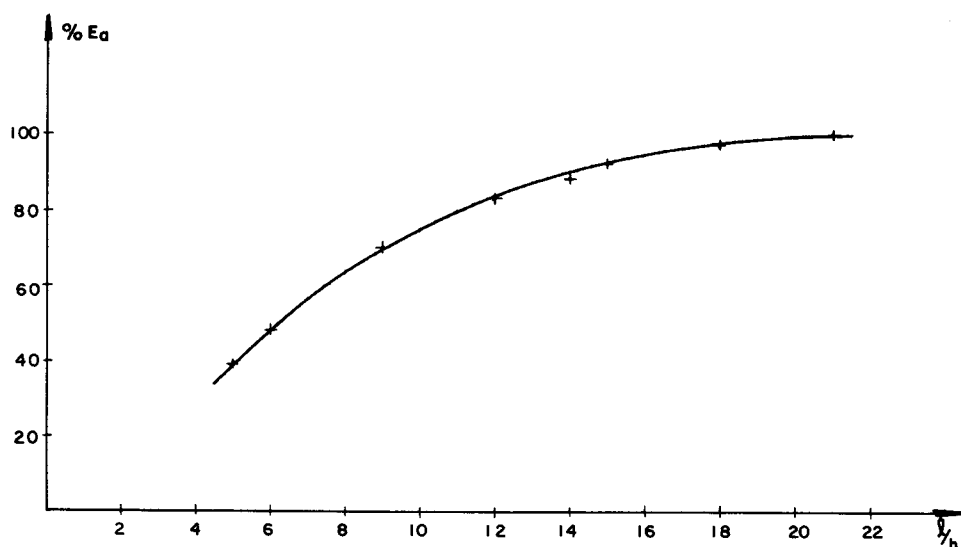


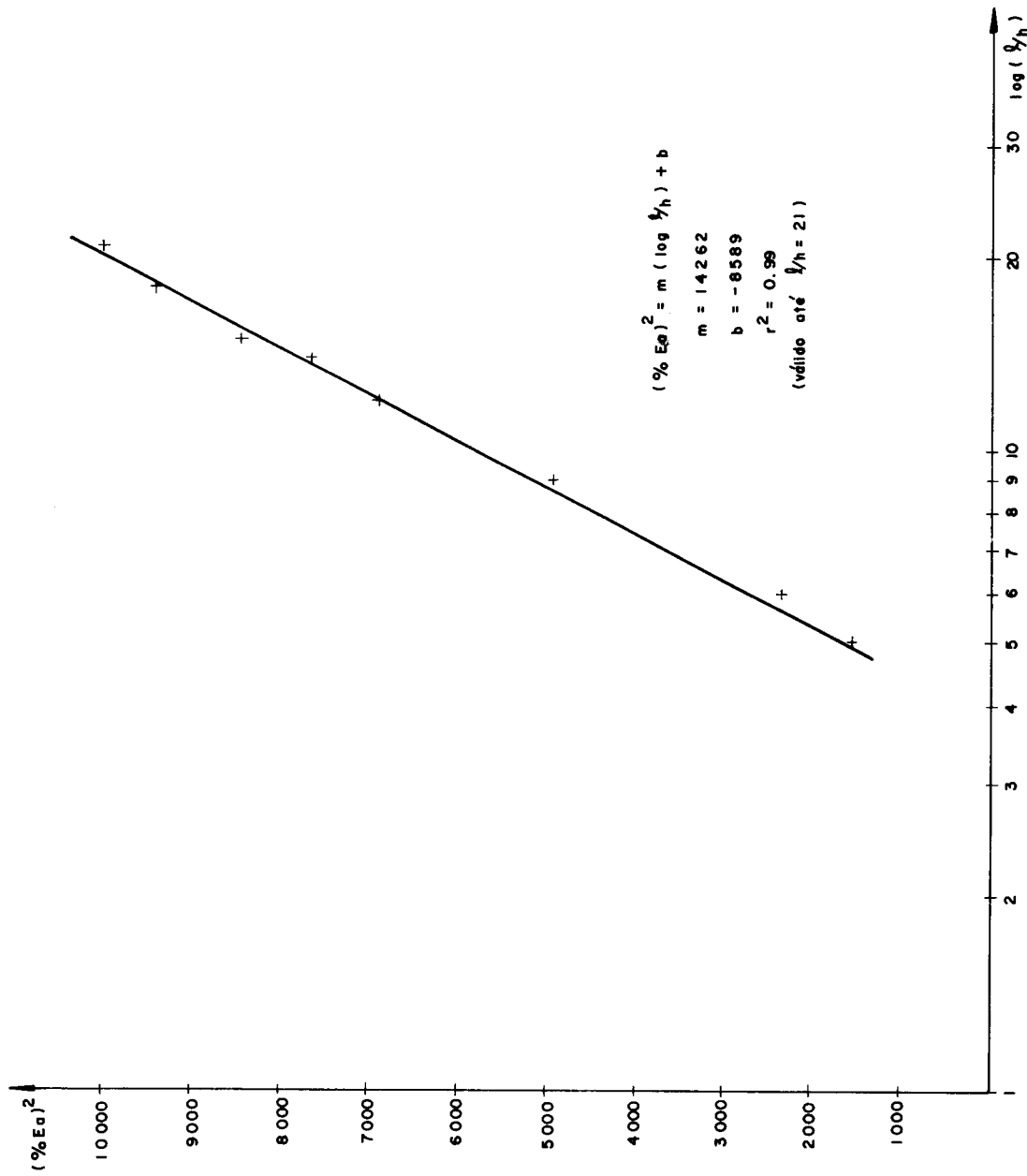
Fig. 4.21 - $E_a = f(1/h)$ - Resultado Final

Dos resultados da tabela 4.20, traça-se o gráfico da Figura 4.21.

Na tentativa de se retificar o gráfico de $E_a = f(1/h)$, foram utilizadas algumas mudanças nas variáveis E_a e $1/h$. No gráfico da figura 4.22. é apresentada a reta representando a função :

$$(\% E_a)^2 = f(\log 1/h)$$

Fig. 4.22.- Gráfico de $(\% E_a)^2 - f(\log 1/h)$



Pela análise de regressão, tem-se:

$$(\% E_a)^2 = 14262 (\log \ell/h) - 8589 \dots\dots\dots (4.19).$$

$$r^2 = 0,99$$

Com $r^2 = 0,99$, admite-se válida a equação 4.19 para relacionar E_a com ℓ/h , para $\ell/h \leq 21$.

4.4.9 - Variação de E_a com outros Parâmetros Geométricos de Peças Fletidas

Buscando verificar se a relação b/h entre a largura e a altura da viga, influi em E_a , foram feitos ensaios utilizando seis peças de Pinho do Paraná e seis de Peroba Rosa, conforme os detalhes a seguir.

Foram preparados, a partir de seis pranchas de Pinho do Paraná e seis de Peroba Rosa, conforme os detalhes a seguir.

Foram preparados, a partir de seis pranchas de Pinho do Paraná de dimensões nominais (4×30) cm², seis corpos de prova de dimensões nominais de (4×15) cm². Escolheu-se madeira apresentando camadas de crescimento paralela às faces principais.

As peças de (4×15) cm² de seção e 120 cm de comprimento foram ensaiadas à flexão com carga central, variando-se a relação b/h diminuindo-se b sucessivamente, mas, mantendo-se h constante. Para cada relação b/h foram feitos ensaios variando-se ℓ/h de 26 a 6. A umidade das peças de Pinho do Paraná esteve em torno de 11 a 12% (madeira seca ao ar).

As peças de Peroba Rosa apresentavam seção transversal nominal de (4×15) cm² e comprimento de 120 cm. Foram ensaiadas à flexão simples com carga central, para relações b/h de 3,4 a 0,5 e ℓ/h de 26 a 6.

Os resultados obtidos nos 432 (quatrocentos e trinta e dois ensaios) estão apresentados nas tabelas 4.21 e 4.22.

TABELA 4.21.1 - $E_a = f(l/h)$ - Para Várias Relações l/h - Pinho do Paraná - Corpo de Prova 1 - Unidade = MPa

l/h b/h	26	22	18	14	10	6
3,4	16339	16010	14406	13154	10480	5602
2,8	16606	15742	14626	12785	10683	5774
2,2	16748	15204	4846	13046	10295	5171
1,6	16506	16145	15129	13201	10469	5552
1,0	16637	15666	14829	13004	10037	5028
0,5	16553	15556	14403	12553	10257	5232
MÉDIA	16565	15888	14707	12957	10370	5394
D. Padrão	138	269	284	246	223	291
C. Variação	0,0083	0,0170	0,0193	0,0189	0,0215	0,0539

TABELA 4.21.2 - $E_a = f(l/h)$ - Para Várias Relações l/h - Pinho do Paraná - Corpo de Prova 2.- Unidade = MPa

l/h b/h	26	22	18	14	10	6
3,4	19085	17226	15256	13877	11073	6166
2,8	19169	16928	15261	13314	10769	6004
2,2	19175	17425	15700	14212	11370	6143
1,6	19211	17669	15660	14094	11009	5643
1,0	19004	17103	15816	14025	11369	5842
0,5	19481	17592	15914	14299	11466	5857
MÉDIA	19187	17324	15601	13970	11176q	6943
D. Padrão	162	289	280	353	270	201
C. Variação	0,0084	0,0167	0,0179	0,0253	0,0241	0,0337

TABELA 4.21.3 - $E_a = f(\ell/h)$ para Várias Relações ℓ/h - Pinho do Paranã, Corpo de Prova 3 - Unidade = MPa

$b/h \backslash \ell/h$	26	22	18	14	10	6
3,4	12598	12489	11578	10243	8135	4459
2,8	12734	12263	11913	10072	8022	4131
2,2	12115	12592	11491	10318	8270	4683
1,6	12391	12254	11742	9998	8355	4542
1,0	12348	12446	11676	10150	8162	4691
0,5	12255	12501	11773	10236	8317	4156
MÉDIA	12407	12424	11695	10170	8210	4444
D. Padrão	226	137	149	119	126	249
C. Variação	0,0182	0,0110	0,0128	0,0117	0,0153	0,0559

TABELA 4.21.4 - $E_a = f(\ell/h)$ Para Várias Relações ℓ/h - Pinho do Paranã, Corpo de Prova 4 - Unidade = MPa

$b/h \backslash \ell/h$	26	22	18	14	10	6
3,4	13105	13610	11751	10319	8773	4827
2,8	13734	13112	12016	10733	8790	4281
2,2	13603	13363	12411	10871	8338	4682
1,6	13161	13444	11866	10472	8573	4157
1,0	13583	13236	11919	10626	8399	4570
0,5	13332	13374	12297	10406	8715	4626
MÉDIA	13420	13357	12044	10571	8598	4524
D. Padrão	258	171	258	210	194	254
C. Variação	0,0192	0,0128	0,0214	0,0198	0,0226	0,056

TABELA 4.22.1 - $E_a = f(\ell/h)$ para Várias Relações b/h. Peroba Rosa
Corpo de Prova 1 - Unidade = MPa

$b/h \backslash \ell/h$	26	22	18	14	10	6
3,4	11670	11434	10799	9970	8720	5740
2,8	11327	11370	10512	9972	8555	5676
2,2	11393	11183	10881	10060	8895	5546
1,6	11578	11429	10852	10020	8761	5713
1,0	11490	11639	11057	9838	8513	5334
0,5	11208	11083	10306	9772	8469	5682
MÉDIA	11444	11357	10734	9922	8619	5618
D. Padrão	169	198	275	95	116	152
C. Variação	0,0148	0,0175	0,0256	0,0096	0,0134	0,0270

TABELA 4.22.2 - $E_a = f(\ell/h)$ para Várias Relações b/h. Peroba Rosa
Corpo de Prova 2 - Unidade = MPa

$b/h \backslash \ell/h$	26	22	18	14	10	6
3,4	13077	12531	12132	10856	9684	7596
2,8	13051	12752	12306	10915	9687	7527
2,2	12951	12760	12187	10996	9563	7315
1,6	13192	12617	12285	11122	9178	7128
1,0	13314	12840	12435	11345	9683	7314
0,5	13261	12845	12206	11136	9631	7518
MÉDIA	13141	12724	12258	11062	9488	7400
D. Padrão	138	126	108	177	263	177
C. Variação	0,0105	0,0099	0,0088	0,0160	0,0277	0,0240

TABELA 4.22.3 - $E_a = f(\ell/h)$ para Várias Relações b/h. Peroba Rosa

Corpo de Prova 3. Unidade: MPa

b/h \ ℓ/h	26	22	18	14	10	6
3,4	7693	7543	7083	6799	5559	3393
2,8	7831	7681	6942	6422	5466	3743
2,2	8271	7830	6850	6517	5707	3364
1,6	8011	8144	6814	6936	5416	3862
1,0	7940	8143	6378	6932	5762	3684
0,5	7495	8110	7009	6504	5786	3482
MÉDIA	7874	7908	6846	6685	5616	3588
D. Padrão	267	262	250	231	158	204
C. Variação	0,0339	0,0331	0,0345	0,0346	0,081	0,0568

TABELA 4.22.4 - $E_a = f(\ell/h)$ para Várias Relações b/h. Peroba Rosa

Corpo de Prova 4. Unidade = MPa

b/h \ ℓ/h	26	22	18	14	10	6
3,4	9973	10289	9748	7923	6711	5272
2,8	9739	9916	9463	8370	6873	4925
2,2	9940	9615	9380	8460	7176	5161
1,6	10169	9849	9719	8450	7064	5095
1,0	9952	10007	9819	7949	6762	5019
0,5	10226	9998	9254	8044	7096	4905
MÉDIA	10000	9946	9564	8199	6944	5063
D. Padrão	176	221	219	254	193	142
C. Variação	0,0176	0,0222	0,0229	0,0310	0,0278	0,0280

TABELA 4.22.5 - $E_a = f(\ell/h)$ para Várias Relações b/h. Peroba Rosa
Corpo de Prova 5 - Unidade = MPa

b/h \ ℓ/h	26	22	18	14	10	6
3,4	10838	11004	10484	9239	7156	3954
2,8	11470	10627	10216	9602	7390	4408
2,2	10431	11252	9989	9421	7322	4304
1,6	10494	11086	9980	9498	6977	4014
1,0	10524	10373	10003	9516	7304	3999
0,5	10738	10426	9937	9169	7290	4301
MEDIA	10749	10795	10102	9408	7240	4163
D. Padrão	386	369	21	150	150	196
C. Variação	0,0359	0,0342	0,0209	0,0159	0,0207	0,0470

TABELA 4.22.6 - E_a q $f(\ell/h)$ para Várias Relações b/h. Peroba Rosa
Corpo de Prova 6. Unidade = MPa

b/h \ ℓ/h	26	22	18	14	10	6
3,4	9232	8911	8171	7187	6419	4369
2,8	9499	8870	8771	7552	6763	4617
2,2	9123	9249	8404	7590	6314	4742
1,6	9087	9153	8732	7612	6593	4264
1,0	9414	9438	8653	7260	6562	4542
0,5	9201	9189	8512	7601	6736	4367
MEDIA	9259	9135	8541	7467	6566	4484
D. Padrão	164	214	227	191	178	181
C. Variação	0,0177	0,0234	0,0266	0,256	0,270	0,403

TABELA 2.22.7 - $E_a = f(\ell/h)$ para Várias Relações b/h. Pinho do Paraná - Média de Seis Corpos de Prova - Unidade MPa

b/h \ ℓ/h	26	22	18	14	10	6
3,4	15405	15008	13229	11647	9392	4968
2,8	15565	14696	13444	11356	9377	4882
2,2	15373	15141	13640	11724	9290	4850
1,6	15284	14964	13760	11522	9364	4860
1,0	15484	14830	13597	11663	9238	4868
0,5	15471	14981	13547	11612	9381	4850
MÉDIA	15431	14937	13536	11587	9340	4880
D. Padrão	98	154	183	131	62	45
C. Variação	0,0063	0,0103	0,0136	0,0113	0,0066	0,0092

TABELA 2.22.8 - $E_a = f(1/h)$ para Várias Relações b/h. Peroba Rosa - Média de Seis Corpos de Prova. Unidade de MPa.

b/h \ ℓ/h	26	22	18	14	10	6
3,4	10414	10322	9736	8662	7375	5054
2,8	10486	10203	9702	8806	7454	5149
2,2	10352	10314	9615	8841	7446	5075
1,6	10422	10380	9730	8940	7332	5013
1,0	10439	10407	9724	8807	7431	4983
0,5	10355	10275	9537	8704	7410	5043
MÉDIA	10411	10317	9674	8793	7408	5053
D. Padrão	51	73	81	99	47	57
C. Variação	0,0049	0,0071	0,0083	0,0113	0,0063	0,113

4.4.9.1 - Análise de Resultados

Nas tabelas 4.23 e 4.24 fêz-se a determinação de valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos diferentes resultados obtidos variando-se b/h , evidenciando-se não haver influência da variação de b/h no valor de E_a .

Para melhor visualizar-se este resultado foram calculados os valores médios obtidos a partir de seis corpos de prova, para cada par de valores de l/h e b/h , apresentados nas tabelas 4.25.

A partir destes valores, foram traçados os gráficos das figuras 4.23 e 4.24.

Pelas equações apresentadas, relacionando E_a e b/h , para Pinho do Paraná e Peroba Rosa, conclui-se pela não variação de E_a com b/h para uma dada relação l/h .

Ainda mais, na tentativa de se relacionar dados para todas as relações l/h , foram obtidos os coeficientes de determinação, $r^2 = 0,0000111$ (Pinho do Paraná) e $0,0000017$ (Peroba Rosa). Com isto ficou demonstrada a não variação de E_a com a variação de b/h .

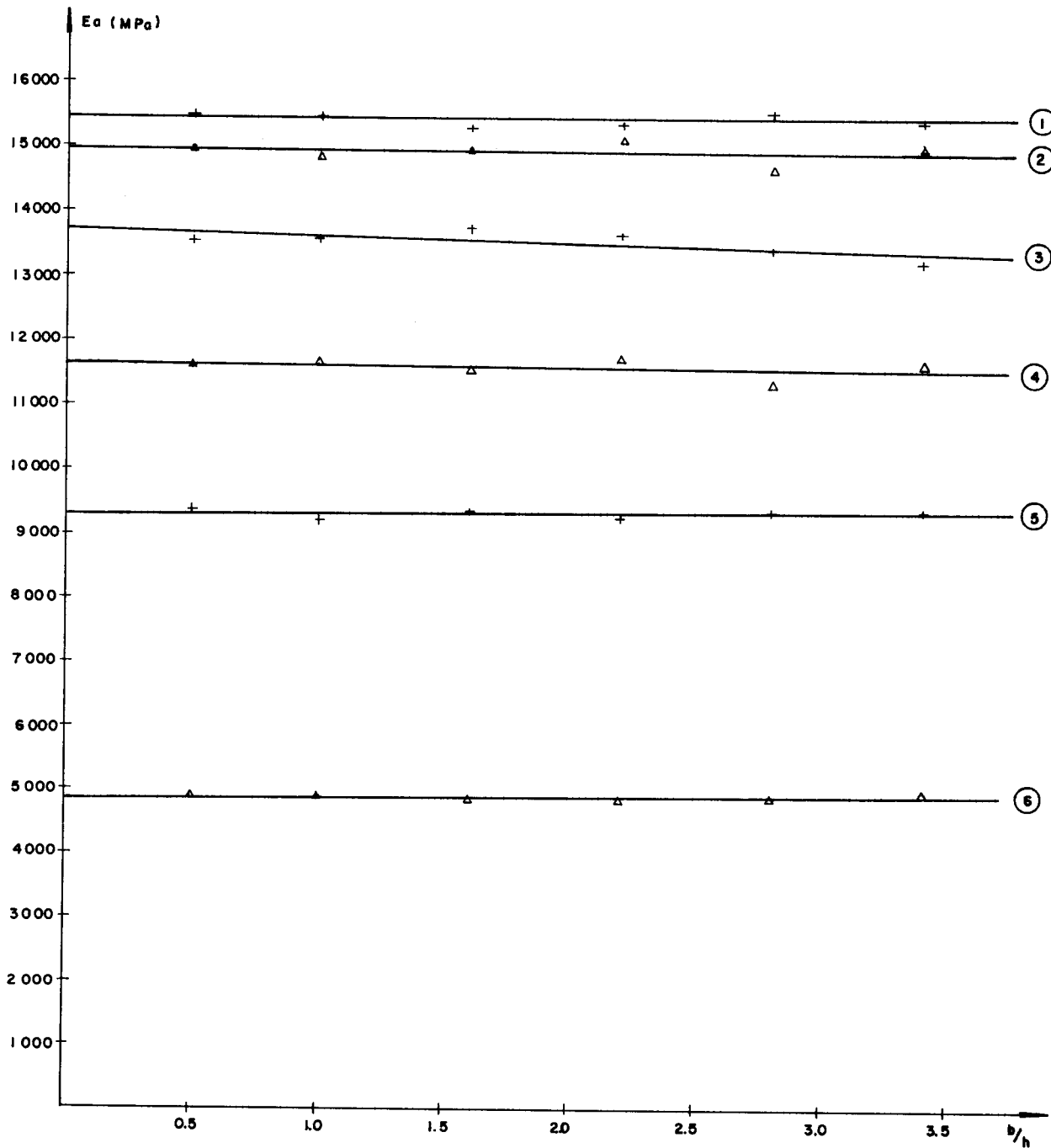


FIG. 4.23 - $E_a = f(b/h)$ PARA DIVERSOS b/h - PINHO DO PARANÁ

- ① PARA $b/h = 26 \rightarrow E_a = 0.8710 (b/h) + 15429$
- ② PARA $b/h = 22 \rightarrow E_a = -3.7559 (b/h) + 14943$
- ③ PARA $b/h = 18 \rightarrow E_a = -108.1193 (b/h) + 13744$
- ④ PARA $b/h = 14 \rightarrow E_a = -26.7517 (b/h) + 11638$
- ⑤ PARA $b/h = 10 \rightarrow E_a = 20.5492 (b/h) + 9301$
- ⑥ PARA $b/h = 6 \rightarrow E_a = 30.5631 (b/h) + 4821$

PARA TODOS OS DADOS DA TABELA 4.25.1

$$E_a = 11634 - 12.0689 (b/h)$$

$$r^2 = 0.000011$$

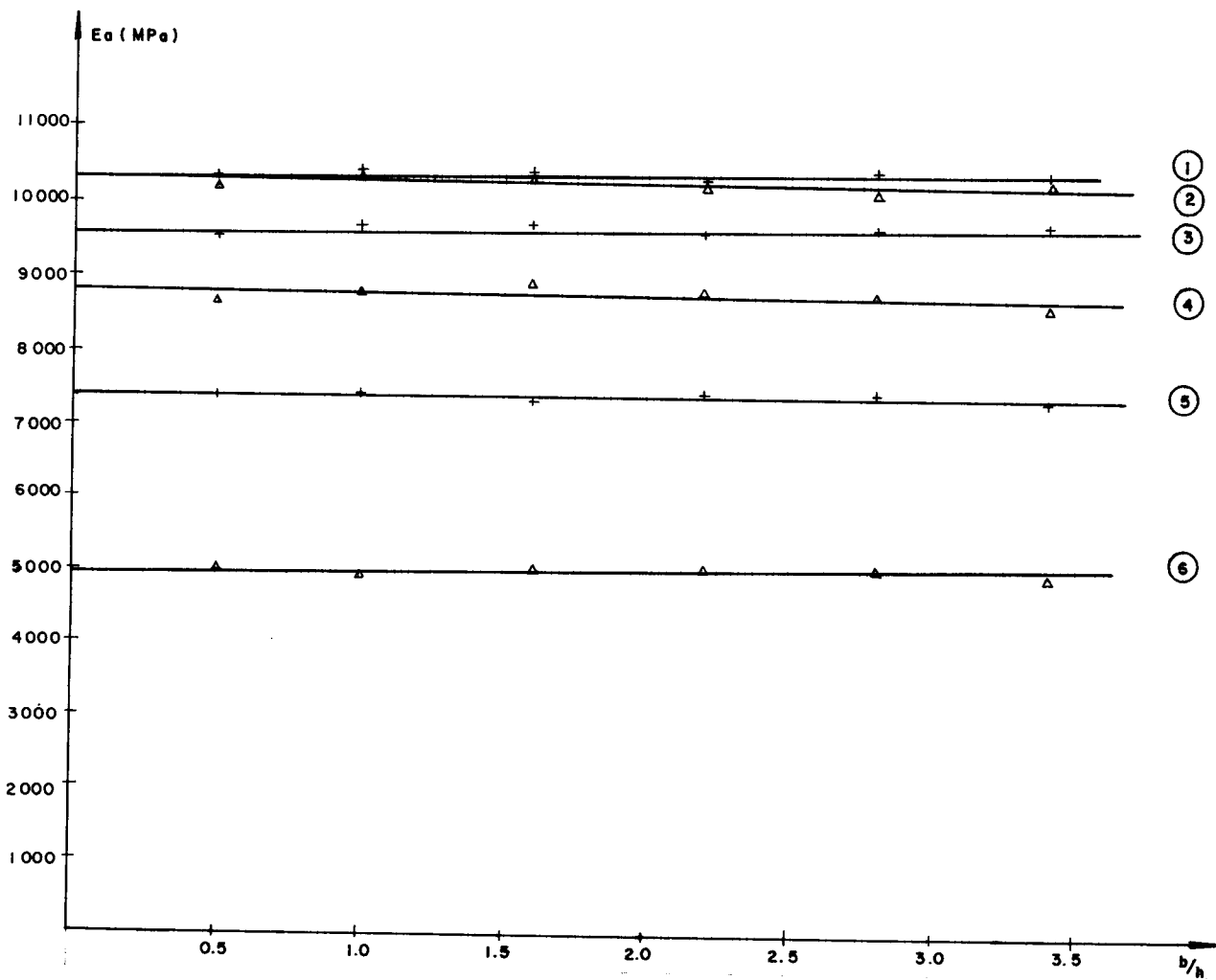


FIG. 4.24 - $E_a = f(b/h)$ PARA DIVERSOS h/h - PEROBA ROSA

- ① PARA $h/h = 26 \rightarrow E_a = 17.3370 (b/h) + 10378$
- ② PARA $h/h = 22 \rightarrow E_a = -22.8155 (b/h) + 10360$
- ③ PARA $h/h = 18 \rightarrow E_a = 38.3634 (b/h) + 9600$
- ④ PARA $h/h = 14 \rightarrow E_a = -17.0652 (b/h) + 8826$
- ⑤ PARA $h/h = 10 \rightarrow E_a = 0.4327 (b/h) + 7407$
- ⑥ PARA $h/h = 6 \rightarrow E_a = 30.6963 (b/h) + 4993$

PARA TODOS OS DADOS DA TABELA 4.25.2

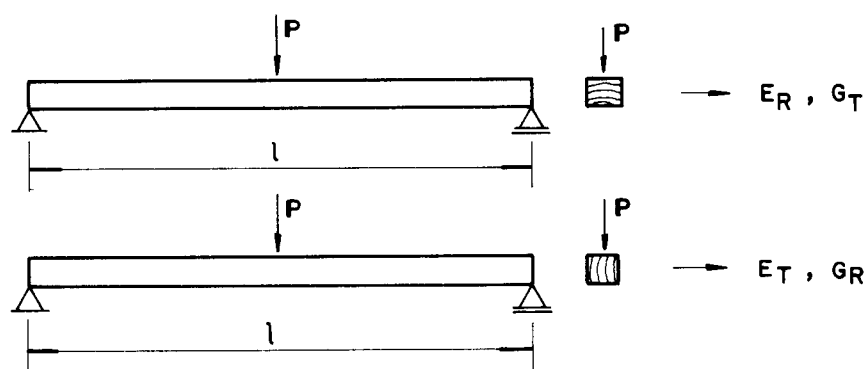
$$E_a = 7.8248 (b/h) + 8594$$

$$r^2 = 0.0000017$$

5 - MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL REAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE TRANSVERSAL

A importância do conhecimento do módulo de elasticidade longitudinal real e do módulo de elasticidade transversal (G) da madeira foi discutida no item 1.2. Neste capítulo serão discutidos alguns procedimentos experimentais para a sua determinação.

Levando em conta a ortotropia da madeira, será adotada a seguinte notação:



sendo:

E_R = módulo de elasticidade longitudinal real e

G_T = módulo de elasticidade transversal quando a flexão se dá com carga radial, i. é, perpendicular aos anéis de crescimento.

E_T = módulo de elasticidade longitudinal real e

G_R = módulo de elasticidade transversal quando a flexão se dá com carga tangencial, i. é, paralela aos anéis de crescimento.

Dada a impossibilidade de se efetuar medida direta de G , são sugeridos a seguir três procedimentos experimentais para a determinação dos módulos de elasticidade transversal.

5.1 - 1º Procedimento para a Determinação de G (1º Método)

Emprega-se um corpo de prova de seção nominal $(5 \times 5) \text{ cm}^2$, comprimento = 120 cm, faces paralelas às direções radial e tangencial, umidade acima do ponto de saturação da madeira. A aplicação de carga se verifica a razão de 10 MPa por minuto, até a tensão aproximadamente equivalente ao limite de proporcionalidade do material.

5.1.1 - Ensaio de Flexão Conforme Esquema da Figura 5.1

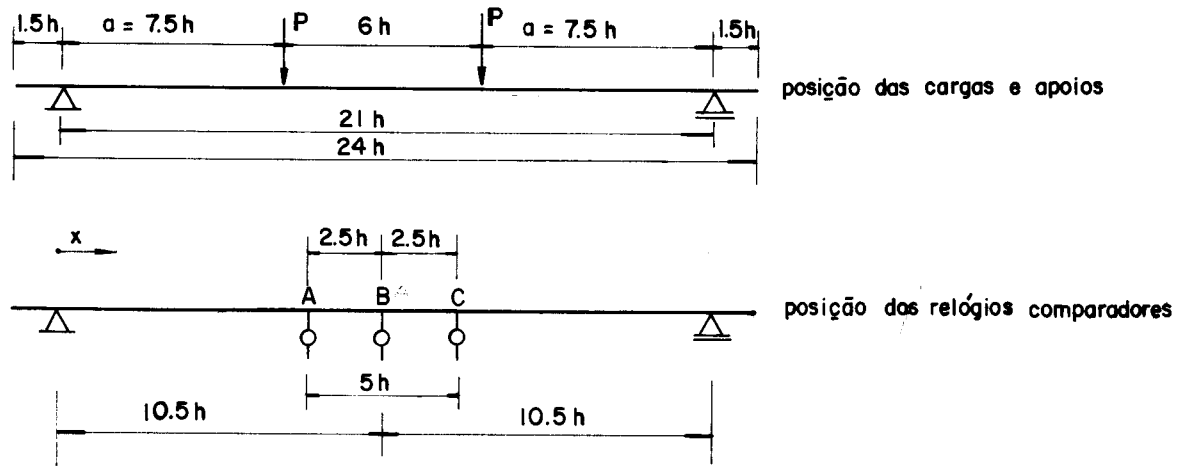


Fig. 5.1 - Ensaio de Flexão para a Determinação de E

No esquema 5.1, o vão livre da peça fletida é 21 h, possibilitando a obtenção de E_R ou de E_T . Adotou-se a aplicação de duas cargas equidistantes dos apoios e medida de flechas no trecho entre as cargas, para garantir a não interferência da parcela de deformação devida às tensões cisalhantes na flecha total do corpo de prova.

Para o cálculo do E, procede-se da seguinte forma:

É conhecida a expressão da flecha nos pontos entre A e B para o carregamento mostrado no esquema 5.1.

$$f(x) = \frac{P a}{6 E J} (3 \ell x - 3 x^2 - a^2) \dots \dots \dots (5.1)$$

Nos pontos A e C: $x = 8h$
 $a = 7,5h$
 $\ell = 21h$

$$J = \frac{b h^3}{12}$$

$$f(a) = f(c) = \frac{P \cdot 7,5h \cdot 12}{6 E b h^3} \cdot \left[(3 \cdot 21h \cdot 8h - 3(8h)^2 - (7,5)^2) \right]$$

$$f(a) = f(c) = \frac{3836,25 P}{E b} \dots \dots \dots (5.2)$$

No ponto B: $x = 10,5h$

$a = 7,5h$

$\ell = 21h$

$$J = \frac{b h^3}{12}$$

$$f(B) = \frac{P \cdot 7,5h \cdot 12}{6E \cdot bh^3} \cdot \left[3,21h \cdot 10,5h - 3(10,5h)^2 - (7,5h)^2 \right]$$

$$f(b) = \frac{4117,5 P}{Eb} \dots\dots\dots(5.3)$$

flecha relativa

$$f_0 = f(B) - \frac{f(A) + f(C)}{2}$$

$$f_0 = \frac{4117,5 P}{Eb} - \frac{3836,25 P}{Eb}$$

$$f_0 = \frac{281,25 P}{Eb} \dots\dots\dots(5.4)$$

Assim:

$$E = \frac{281,25 P}{f_0 \cdot b} \dots\dots\dots(5.5)$$

Como para cada corpo de prova, certamente haverá ligeiras variações do momento de inércia, melhor é empregar a expressão:

$$E = \frac{375}{16} \cdot \frac{P h^3}{f_0 J} \dots\dots\dots (5.6)$$

5.1.2 - Ensaio de Flexão Conforme Esquema da Figura 5.2

Conhecido E, G é determinado a partir de um ensaio de flexão (no mesmo corpo de prova ensaiado) com carga aplicada no ponto médio do vão livre menor que 21h. Adotou-se $\ell/h = 14$.

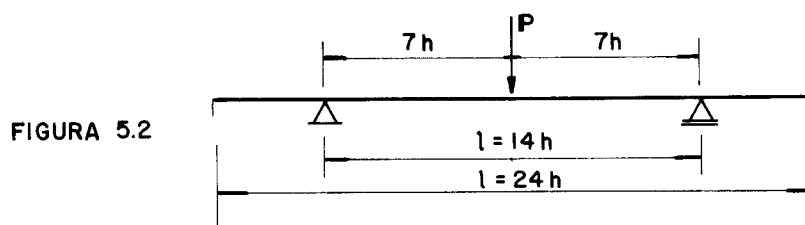


FIGURA 5.2

A flecha no ponto D é dada por:

$$f(D) = \frac{P \ell^3}{48 EJ} + \frac{3 P \ell}{10 GS} \dots\dots\dots(5.7)$$

Fazendo $\ell = 14h$

$$f(D) = \frac{P(14h)^3}{48 EJ} + \frac{3P(14h)}{10 GS}$$

$$f(D) = \frac{2744 Ph^3}{48 EJ} + \frac{42 Ph}{10 GS} \dots\dots\dots(5.8)$$

Observa-se que o único parâmetro desconhecido da equação 5.8 é o G. A função explícita para G será:

$$G = \frac{126P \cdot h \cdot E \cdot J}{S(30EJ f(D) - 1715 Ph^3)} \dots\dots\dots(5.9)$$

Evidentemente, em função da posição da carga em relação às direções radial e tangencial, ter-se-á G_R ou G_T .

5.2 - 2º Procedimento Sugerido para a Determinação de G.

O segundo procedimento sugerido para a determinação do módulo de deformação transversal baseia-se na análise gráfica dos resultados da experimentação.

Ensaia-se à flexão um corpo de prova de seção nominal: $(5 \times 5) \text{ cm}^2$, comprimento 120 cm, faces paralelas às direções radial e tangencial, umidade acima do ponto de saturação da madeira, carga central. A aplicação de carga se verifica à razão de 10 MPa por minuto, até a tensão aproximadamente equivalente ao limite de proporcionalidade do material. Para o desenvolvimento deste procedimento, são necessários ensaios para diversas relações ℓ/h . Em virtude do exposto no capítulo 4, os ensaios foram realizados para $\ell/h = 21, 18, 15, 14, 12, 9, 6$ e 5.

5.2.1 - Determinação dos Parâmetros

Considera-se novamente a expressão completa da flecha de uma peça submetida à flexão:

$$f = \frac{P \ell^3}{48 EJ} + \frac{3P\ell}{10 GS} \dots\dots\dots (5.10)$$

Multiplicando-se a expressão 5.10 por $\frac{E}{f}$

$$E = \frac{P \ell^3}{48fJ} + \frac{0,3 P\ell}{GS} \frac{E}{f} \dots\dots\dots (5.11)$$

Sabe-se que:

$$E_a = \frac{P \ell^3}{48 f J} \dots\dots\dots (5.12)$$

Substituindo-se 5.12 em 5.11 tem-se:

$$E = E_a + \frac{0,3 P\ell}{GS} \frac{E}{f} \dots\dots\dots (5.13)$$

Adotando-se: $\ell/h = 18$ e $S = h^2$, a expressão 5.13 fica:

$$E = E_a + \frac{0,13P \cdot 18h}{G \cdot h^2} \cdot \frac{E}{f}$$

$$E = E_a + \frac{5,4 E}{G h} \cdot \frac{P}{f} \dots\dots\dots (5.14)$$

e, na equação 5.12:

$$E_a = \frac{P(18h)^2 \cdot 12}{48f h^4} \text{ ou}$$

$$E_a = \frac{18^3 P}{4f \cdot h} \dots\dots\dots (5.15)$$

e:

$$\frac{P}{f \cdot h} = \frac{4 E_a}{18^3} \dots\dots\dots (5.16)$$

Substituindo 5.16 em 5.14, tem-se:

$$E = E_a + \frac{5,4 P}{G} \cdot \frac{4 E_a}{18^3} \dots\dots\dots (5.17)$$

$$E = E_a + \frac{1,2 P \cdot E_a}{G \cdot 18^2}$$

$$E = E_a \left(1 + \frac{1,2 E}{18^2 G} \right) \dots\dots\dots (5.18)$$

resultando:

$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E} \left(1 + \frac{1,2 E}{18^2 G} \right)$$

$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E} + \frac{1,2}{18^2 G} \dots\dots\dots (5.20)$$

sendo $l/h = 18$, tem-se:

$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E} + \frac{1,2}{(l/h)^2 G}$$

ou:

$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E} + \left(\frac{h}{l} \right)^2 \cdot \frac{1,2}{G} \dots\dots\dots (5.21)$$

Fazendo: $\frac{1}{E_a} = y$

$$\frac{1}{E} = a$$

$$\left(\frac{h}{l} \right)^2 = x$$

$$\frac{1,2}{G} = b$$

E substituindo estes valores em 5.21, chega-se a:

$$y = a + bx$$

Ou seja, a equação de uma reta co coeficiente angular b , interceptando o eixo das ordenadas em a , conforme figura 5.3.

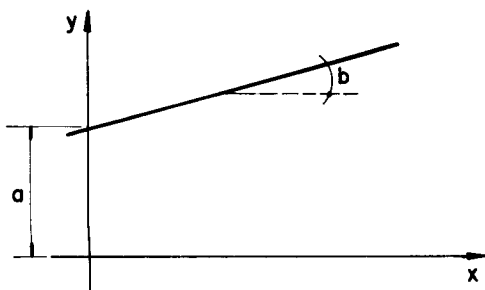


FIGURA 5.3 - $y = a + bx$

Mudando os parâmetros tem-se (figura 5.4)

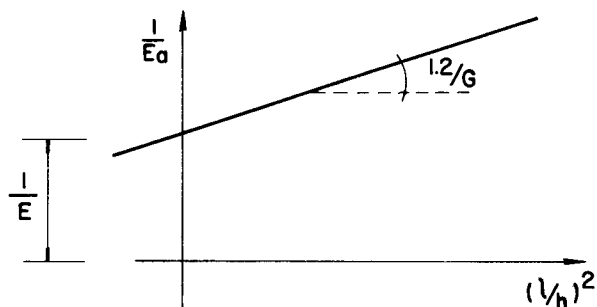


FIGURA 5.4 - $\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E} + \frac{1.2}{G} (l/h)^2$

Por conseguinte, através de ensaios de flexão com carga central, para diversos valores de l/h , obtêm-se uma série de pontos distribuídos ao longo de uma reta.

Os parâmetros E e G são obtidos pelas expressões:

$$E = \frac{1}{a} \dots\dots\dots (5.22)$$

$$G = \frac{1,2}{b} \dots\dots\dots (5.23)$$

5.3 - 3º Procedimento Sugerido para a Determinação de G (3º Método)

A sequência experimental deste procedimento é a mesma do item 5.2, sendo realizados ensaios de flexão para $l/h = 21, 18, 15, 14, 12, 9, 6$ e 5 sobre um mesmo corpo de prova. Com estes ensaios, obtém-se oito equações relacionando G e E. Em síntese, são oito equações a duas incógnitas. O sistema assim constituído pode ser resolvido pela aplicação de vários métodos numéricos. Por sugestão de professores do ICMSC-USP, adotou-se a solução pelo método dos mínimos quadrados.

Para realizar o cálculo, utilizou-se um programa em linguagem FORTRAN, para processamento no computador IBM/370 do Centro de Processamento de Dados da EESC-USP.

5.4 - Comentários Acerca dos Procedimentos Experimentais

Os três procedimentos experimentais sugeridos permitem, além da determinação do módulo de elasticidade transversal, a do módulo de elasticidade longitudinal, real da madeira. No capítulo 4 foi apresentada uma sistemática experimental a partir do qual foi possível o cálculo de E. Fica evidenciada a possibilidade da comparação dos resultados e a escolha do procedimento estatisticamente mais seguro para a determinação de E e G.

5.5 - Apresentação dos Resultados de E

Diante das possibilidades indicadas no item anterior, os resultados dos ensaios são apresentados separadamente. De início, o módulo de elasticidade longitudinal real e, em seguida, o módulo de elasticidade transversal.

Para facilitar a compreensão, será empregada a seguinte notação neste capítulo.

E(1) = módulo de elasticidade longitudinal real obtido através do 1º Método (item 5.1).

E(2) = módulo de elasticidade longitudinal real obtido através do 2º Método (item 5.2).

E(3) = módulo de elasticidade longitudinal real obtido através do 3º Método (item 5.3).

E(21) = módulo de elasticidade longitudinal para $l/h = 21$ equivalente, pelas considerações do capítulo 4, ao módulo de elasticidade longitudinal real.

5.5.1 - Peroba Rosa

O material ensaiado é descrito no item 4.4.1. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2.

TABELA 5.1 - E para os Diversos Procedimentos Experimentais - Carga Tangencial - Unidade = MPa

C.P.	E(21)	E(1)	E(2)	E(3)
1	10358	10111	12075	11808
2	11066	12339	13262	12388
3	11349	12332	13271	12479
4	11352	14446	13960	12491
5	10814	11940	13187	12294
6	9963	10400	11108	10817
7	10976	15200	11312	11594
8	12385	14773	12751	13211
9	12250	18332	15470	13999
10	10418	9692	14085	12242
11	9546	10393	11628	10920
12	8575	9626	10056	9779
13	9215	10093	11555	10927
14	9979	10627	13355	11632
15	8576	8627	10281	9523
16	8272	8748	10175	9580
17	11157	10143	13758	12628
18	9489	9752	12402	10875
19	12270	12945	14859	13074
20	7888	8022	9859	7723
21	8643	9098	10202	9706
22	11166	13146	13921	12919
23	8903	8196	10320	10159
24	7707	7986	8016	7914
25	8846	9151	10808	10138
26	7760	7696	9574	8536
27	8081	8630	9829	8797
28	9871	10365	12439	11324
29	9702	9777	12000	11367
30	9135	9189	10994	10369
31	12114	12687	14648	13732
32	8621	8181	10051	8743
33	9143	9449	11378	10595
34	10959	11204	12741	12366
35	10240	9478	10276	10950
MÉDIA	9908	10508	11846	11076
D. Padrão	1381	2049	1790	1633
C. Variação	0,139	0,195	0,151	0,148

TABELA 5.2 - E para os Diversos Procedimentos Experimentais - Carga Radial - Unidade = MPa

C.P.	E(21)	E(1)	E(2)	E(3)
1	10020	10586	11432	10838
2	11662	11998	13661	12804
3	11510	12458	14162	13247
4	11598	12210	13801	12579
5	10919	10242	12629	12579
6	9892	11055	11665	11075
7	11147	12883	12800	12667
8	11950	13580	13419	13230
9	12474	13878	14314=	13966
10	10559	12365	12668	11996
11	9948	10510	12280	10619
12	9033	9782	11640	10756
13	9687	10988	13124	11079
14	10337	10507	13704	11830
15	9184	9196	13091	10554
16	9029	9718	12378	11003
17	11563	12829	15451	13444
18	9886	10821	12024	11202
19	12783	13567	14302	14100
20	8134	7251	10370	9194
21	9490	9724	11725	10707
22	12047	12807	14447	12968
23	9549	9652	12229	10756
24	8252	8819	8960	8415
25	9242	9381	12041=	10748
26	8252	8885	10472	9375
27	8420	9642	11012	9678
28	10307	10587	12680	10752
29	9990	9757	12619	11801
30	9722	9834	12895	10011
31	12701	13627	16171	14742
32	9319	9549	12144	10797
33	9553	9819	12081	10954
34	11789	12405	15338	13481
35	10730	9580	10779	11357
MÉDIA	10305	10871	12700	11580
D. Padrão	1316	1662	1522	1498
C. Variação	0,128	0,153	0,120	0,129

5.5.1.1 - E para Carga Tangencial

A comparação dos resultados foi feita por intermédio de dois testes, envolvendo os resultados de dois procedimentos, por vez. O primeiro teste, citado por Fusco permite verificar se as duas amostras foram retiradas do mesmo universo. O segundo, sugerido por diversos autores, inclusive por Snedecor, permite verificar se as médias são estatisticamente iguais, a um dado nível de segurança. No caso, será adotado o nível de 95%.

5.5.1.1.1 - Comparação entre E(21) e E(1)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 9908 \text{ MPa}$$

$$\bar{e}(1) = 10508 \text{ Mpa}$$

$$n_{21} = n_1 = 35 \text{ (número de elementos das amostras)}$$

$$\phi_{21} = \phi_1 = 34 \text{ (graus de liberdade das amostras)}$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(1)| = 600 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} E_i(21) - \bar{E}(21)^2 = 64870189$$

$$\sum_1 E_i(1) - \bar{E}(1)^2 = 138.095.408$$

$$n_1 + n_2 = 70$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = 68$$

$$\sqrt{\frac{(64870189 + 138095408) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 413$$

$$t_{\text{dados}} = t_{\bar{E}(21), \bar{E}(1)} = \frac{600}{413} = 1,453$$

$t_{\phi} = 1,996$ (tabelado para ϕ graus de liberdade de 95% de segurança).

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi} \rightarrow$ As amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º Teste - Pairing

$$H_0 : \bar{E}_2(21) - \bar{E}(1) = 0$$

$$\bar{E}(21) = 9908 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 10508 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 600$$

$$s_D = 1653$$

$$s_{\bar{d}} = 298$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 600 - 2,030 \cdot 298 \leq \mu_D \leq - 600 + 2,030 \cdot 298$$

$$- 1205 \leq \mu_D \leq + 5$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita - se a hipótese de que as médias sejam iguais.

5.5.1.1.2 - Comparação entre E(21) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 9908 \text{ MPa} \quad n_{21} = n_2 = 35$$

$$\bar{E}(2) = 18846 \text{ MPa} \quad \phi_{21} = \phi_2 = 34$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(2)| = 1938 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 64870189$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(2) - \bar{E}(2) \right]^2 = 107696892$$

$$\sqrt{\frac{(64870189 + 107696892) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 381$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1938}{381} = 5,085$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi} \rightarrow$ as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.1.1.3 - Comparação entre E(21) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 9908 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 11076 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_3 = 35$$

$$\phi_{21} = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(3)| = 1168$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 64870189$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 90587181$$

$$\sqrt{\frac{(54870189 + 90587181) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 361$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1168}{361} = 3,232$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.1.1.4 - Comparação entre E(1) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(1) = 10508 \text{ M Pa}$$

$$\bar{E}(2) = 11846 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 34$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(2)| = 1338$$

$$\sum_1^{35} [E_i(1) - \bar{E}(1)]^2 = 138095408$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 107969892$$

$$\sqrt{\frac{(138095408 + 107969892) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 455$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1338}{455} = 2,842$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.1.1.5 - Comparação entre E(1) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(1) = 10508 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 11076 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(3)| = 568$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 138095408$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 90587181$$

$$\sqrt{\frac{(138095408 + 90587181) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 438$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{568}{438} = 1,296$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º Teste - "Pairing"

$$H_0 = \bar{E}(1) - \bar{E}(3) = 0$$

$$\bar{E}(1) = 10508 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 11076 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 568 \text{ MPa}$$

$$s_D = 1184$$

$$s_{\bar{d}} = 200$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} s_{\bar{d}}$$

$$- 568 - 2,030 \cdot 200 \leq \mu_D \leq - 568 + 2,030 \cdot 200$$

$$- 974 \leq \mu_D \leq - 162$$

Como o intervalo da média não contém o zero, rejeita-se a hipótese de que as médias sejam iguais.

5.5.1.1.6 - Comparação entre E(2) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(2) = 11846$$

$$\bar{E}(3) = 11076$$

$$n_2 = n_3 = 35$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{E}(2) - \bar{E}(3)| = 770$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 107069892$$

$$\sum_1^{35} [E_i(3) - \bar{E}(3)]^2 = 90587181$$

$$\sqrt{\frac{(107069892 + 90587181) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 408$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{770}{408} = 1,885$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º Teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(2) - \bar{E}(3) = 0$$

$$\bar{E}(2) = 11846$$

$$\bar{E}(3) = 11076$$

$$\bar{d} = 770$$

$$s_d = 641$$

$$s_{\bar{d}} = 108$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D < \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$770 - 2,03 \cdot 108 \leq \mu_D \leq 770 + 2,03 \cdot 108$$

$$551 \leq \mu_D \leq 989$$

Como o intervalo da média não contém o zero, rejeita-se a hipótese de que as médias sejam iguais.

5.5.1.1.7 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.5.2.1.1 a 5.5.2.1.6, para a Peroba Rosa, carga tangencial, há equivalência estatística entre os módulos de elasticidade longitudinal determinados pelo ensaio de flexão simples, carga central, relação $l/h = 2$, e pelo primeiro procedimento experimental sugerido.

5.5.1.2 - E para Carga Radial

Para comparação entre os resultados dos procedimentos experimentais sugeridos, foram feitos os mesmos testes comentados no item 5.5.1.1.

5.5.1.2.1 - Comparação entre E(21) e E(1)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 10305 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 10871 \text{ Mpa}$$

$$n_{21} = n_1 = 35$$

$$\phi_{21} = \phi_1 = 34$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(1)| = 566$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 59673522$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 93861681$$

$$\sqrt{\frac{(59673522 + 93861681)}{68 \cdot 1225}} = 359$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{566}{359} = 1,576$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º Teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(21) - \bar{E}(1) = 0$$

$$\bar{E}(21) = 10305 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 566$$

$$s_D = 1676$$

$$s_{\bar{d}} = 284$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 566 - 2,030 \cdot 284 \leq \mu_D \leq - 566 + 2,030 \cdot 284$$

$$- 1143 \leq \mu_D \leq 11$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, ou seja, $E(21) = \bar{E}(1)$, com 95% de segurança.

5.5.1.2.2. Comparação entre E(21) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 10305 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 12700 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_2 = 35$$

$$\phi_{21} = \phi_2 = 34$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(2)| = 2395$$

$$\sum_1^{35} [E_i(21) - \bar{E}(21)]^2 = 59673522$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 78749403$$

$$\sqrt{\frac{(59673522 + 78749403) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 341$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{2395}{341} = 7,024$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.1.2.3 - Comparação entre E(21) e E(3)

1º teste

$$\bar{E}(21) = 10305 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 11580 \text{ MPa}$$

$$n_{21} \ n_3 = 35$$

$$\phi_{21} = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(3)| = 1275 \text{ Mpa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 59673522$$

$$\sum_1^{35} \left[E(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 76230808$$

$$\sqrt{\frac{(59673522 + 76230808) 70}{68 \cdot 1225}} = 338$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1275}{338} = 3,773$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.1.2.4 - Comparação entre E(1) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(1) = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 12700 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 34$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(2)| = 1829$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 938616881$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(2) - \bar{E}(2) \right]^2 = 78749403$$

$$\sqrt{\frac{(938616881 + 78749403) 70}{68 \cdot 1225}} = 381$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1829}{381} = 4,802$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste "Pairing"

5.5.1.2.5 - Comparação entre E(1) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(1) = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 11580 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(3)| = 709$$

$$\sum_1^{35} [E_i(1) - \bar{E}(1)]^2 = 93861681$$

$$\sum_1^{35} [E_i(3) - \bar{E}(3)]^2 = 76230808$$

$$\sqrt{\frac{(93861681 + 76230808) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 378$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{709}{378} = 1,875$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retirados do mesmo universo.

2º Testes - "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(1) - \bar{E}(3) = 0$$

$$\bar{E}(1) = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 11580 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 709$$

$$s_n = 983$$

$$s_{\bar{d}} = 166$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_n \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 709 - 2,030 \cdot 166 \leq \mu_n \leq - 709 + 2,030 \cdot 166$$

$$- 1046 \leq \mu_n \leq - 372$$

Como o intervalo da média não contém o zero, rejeita-se a hipótese nula.

5.5.1.2.6 - Comparação entre E(2) e F(3)

1º Teste

$$\bar{E}(2) = 12700 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 11580 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 35$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{E}(2) - \bar{E}(3)| = 1120$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 78749403$$

$$\sum_1^{35} [E_i(3) - \bar{E}(3)]^2 = 76230808$$

$$\sqrt{\frac{(78749403 + 76230808) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 361$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1120}{361} = 3,104$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.1.2.7 - Conclusão

Pelas comparações dos itens 5.5.2.2.2.1 a 5.5.2.2.2.6, para a Peroba Rosa, carga radial, há equivalência estatística entre os módulos de elasticidade longitudinal determinados pelo ensaio de flexão simples com carga central, relação $l/h = 21$, e pelo primeiro procedimento experimental sugerido. Pode-se acrescentar serem estes os procedimentos que levaram aos valores mais baixos de E, mais um indício para a definição do procedimento a ser escolhido para a determinação de E e G.

5.5.2 - Eucalypto Tereticornis

O material ensaiado é descrito no item 4.4.3. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4.

TABELA 5.3 - E para os Diversos Procedimentos Experimentais. Carga Tangencial - Unidade = MPa

C.P.	E(21)	E(1)	E(2)	E(3)
1	11784	10517	13901	13244
2	11039	10678	12153	11856
3	10425	12289	12123	11693
4	11015	9703	12112	11857
5	11126	8308	12153	12069
6	11031	12296	11346	12192
7	10036	12691	10964	10971
8	12438	12778	13595	13766
9	12688	13118	14160	14109
10	9350	9971	10216	10785
11	9885	10065	10914	10781
12	11431	11949	12989	12659
13	8142	8613	8584	8756
14	12002	12586	12361	13080
15	10660	10013	11899	11765
16	13229	13601	13502	14232
17	11871	12570	12624	12762
18	9662	10291	10174	10413
19	11221	11324	11212	11712
20	13744	13971	16124	15686
21	10386	10258	12022	11710
22	7412	7869	8950	8374
23	8764	9061	9948	9767
24	12363	12475	15049	14347
25	11915	12165	14635	13626
26	13456	13218	16386	14869
27	9874	9830	11113	11084
28	10517	10730	10709	11640
29	9124	9431	10422	10166
30	11569	11323	11722	12710
31	12992	12845	15300	14787
32	9507	9722	10427	10446
33	11937	11688	12282	13195
MÉDIA	10988	11149	12186	12155
D. Padrão	1528	1632	1937	1746
C. Variação	0,139	0,146	0,159	0,144

TABELA 5.4 - E para os Diversos Procedimentos Experimentais - Car-
ga Radial - Unidade = MPa

C.P.	E(21)	E(1)	E(2)	E(3)
1	11399	11908	13325	12264
2	10868	10026	11954	12869
3	11236	12314	11474	11710
4	11290	10801	12190	12205
5	11629	10538	12327	12343
6	11555	11888	12613	12440
7	10464	10527	11289	11267
8	12827	13087	13964	14109
9	12998	13410	13932	14884
10	10559	10864	15275	11327
11	10966	11636	11624	11700
12	12774	13388	13028	14430
13	9030	9540	9476	9906
14	13186	13603	13260	14515
15	11838	12478	12947	12811
16	14739	15304	15003	16325
17	13082	13470	14027	14501
18	10583	10852	10849	11178
19	12104	12407	12764	14214
20	15759	15433	17264	18383
21	11538	11779	13637	13520
22	8243	8365	10021	9076
23	9856	9521	10791	11112
24	13778	13580	16106	15460
25	12878	12842	14181	16180
26	16102	15990	18664	18396
27	10407	10542	12461	12003
28	11565	11842	12127	12859
29	9824	10437	10919	10398
30	11662	11475	12872	12882
31	14498	13969	16904	16733
32	11597	11747	11645	12659
33	12733	12823	13960	13973
MEDIA	11926	12042	13090	13301
D. Padrão	1767	1742	2075	2226
C. Variação	0,148	0,145	0,158	0,167

5.5.2.1 - E para Carregamento Tangencial

A comparação dos resultados foi feita com os mesmos testes citados no item 5.5.2.2.1.

5.5.2.1.1 - Comparação entre E(21) e E(1)

1º Teste:

$$\bar{E}(21) = 10988 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 11149 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_1 = 33 \text{ (número de elementos das amostras)}$$

$$\phi_{21} = \phi_1 = 32 \text{ (graus de liberdade das amostras)}$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(1)| = 161 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 74693912$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 85171429$$

$$n_1 + n_{21} = 66$$

$$\phi_1 + \phi_{21} = \phi = 64$$

$$\sqrt{\frac{(74693912 + 85171429) 66}{64 \cdot 1089}} = 389$$

$$t_{\text{dados}} = t_{\bar{E}(21), \bar{E}(1)} = \frac{161}{389} = 0,414$$

$t_{\phi} = 1,996$ (tabelado para ϕ graus de liberdade e 95% de segurança).

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(21) - \bar{E}(1) = 0$$

$$\bar{E}(21) = 10988 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 11149 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 162$$

$$s_D = 903$$

$$s_{\bar{d}} = 157$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 162 - 2,035 \cdot 157 \leq \mu_D \leq - 162 + 2,035 \cdot 157$$

$$- 482 \leq \mu_D \leq 158$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, isto é, $\bar{E}(21) = \bar{E}(1)$.

5.5.2.1.2 - Comparação entre E(21) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 10988 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 12186 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_2 = 33$$

$$\phi_{21} = \phi_2 = 32$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(2)| = 1189 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 74693912$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(2) - \bar{E}(2) \right]^2 = 120783408$$

$$\sqrt{\frac{(74693912 + 120783408) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 430$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1198}{430} = 2,785$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing".

5.5.2.1.3 - Comparação entre E(21) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 10988 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 12155 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_3 = 33$$

$$\phi_{21} = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(3)| = 1167 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 74693912$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 97499646$$

$$\sqrt{\frac{(74693912 + 97499646) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 404$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1167}{404} = 2,889$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste: "pairing"

5.5.2.1.4 - Comparação entre E(1) e E(2)

1º Teste:

$$\bar{E}(1) = 11149 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 12186 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 33$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 32$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(2)| = 1037 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_i(1) - \bar{E}(1)]^2 = 85171429$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 120783408$$

$$\sqrt{\frac{(85171429 + 120783408) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 442$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1037}{442} = 2,348$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.2.1.5 - Comparação entre E(1) e E(3).

1º Teste:

$$\bar{E}(1) = 11149 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 12155 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 33$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(3)| = 1006 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_i(1) - \bar{E}(1)]^2 = 85171429$$

$$\sum_1^{35} [E_i(3) - \bar{E}(3)]^2 = 97499646$$

$$\sqrt{\frac{(85171429 + 97499646) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 416$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1006}{416} = 2,419$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.2.1.6 - Comparação entre E(2) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(2) = 12186 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 12155 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 33$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{E}(2) - \bar{E}(3)| = 31 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 120783408$$

$$\sum_1^{35} [E_i(3) - \bar{E}(3)]^2 = 97499646$$

$$\sqrt{\frac{(120783408 + 97499646) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 455$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{31}{455} = 0,068$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2) Teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(2) - \bar{E}(3) = 0$$

$$\bar{E}(2) = 12186 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 12155 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 31$$

$$s_D = 375$$

$$s_{\bar{d}} = 65$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$31 - 2,035 \cdot 65 \leq \mu_D \leq 31 + 2,035 \cdot 65$$

$$- 101 \leq \mu_D < 163$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese de que as médias sejam iguais.

5.5.2.1.7 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.5.3.1.1 a 5.5.3.1.6, para o Eucalipto Tereticornis, há equivalência estatística apenas entre os módulos de elasticidade longitudinal para carga tangencial nos seguintes casos: (a) $\bar{E}(21) \cong \bar{E}(1)$ e (b) $\bar{E}(2) \cong \bar{E}(3)$. Em (a) há equivalência entre o par que leva aos valores de E mais baixos e em (b) entre o par que leva aos valores de E mais altos.

5.5.2.2 - E para Carga Radial

Para comparação entre os resultados dos procedimentos experimentais sugeridos, foram feitos os mesmos testes comentados no item 5.5.1.1.

5.5.2.2.1 - Comparação entre E(21) e E(1)

1º Teste:

$$\bar{E}(21) = 11926 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 12042 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_1 = 33$$

$$\phi_{21} = \phi_1 = 32$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(1)| = 116 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 100011996$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 100045666$$

$$\sqrt{\frac{(100011996 + 100045666) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 435$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{116}{435} = 0,267$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas co
mo retiradas do mesmo universo.

2º Teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(21) - \bar{E}(1) = 0$$

$$\bar{E}(21) = 11926 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 12042 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 116$$

$$s_D = 900$$

$$s_{\bar{d}} = 157$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 116 - 2,035 \cdot 157 \leq \mu_D \leq - 116 + 2,035 \cdot 157$$

$$- 436 \leq \mu_D \leq 204$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, ou seja, $\bar{E}(21) = \bar{E}(1)$, com 95% de segurança.

5.5.2.2.2 - Comparação entre E(21) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 11926 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 13090 \text{ Mpa}$$

$$n_{21} = n_2 = 33$$

$$\phi_{21} = \phi_2 = 32$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(2)| = 1164 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_i(21) - \bar{E}(21)]^2 = 100011996$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 137253737$$

$$\sqrt{\frac{(100011996 + 137253737) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 474$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1164}{474} = 2,456$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.2.2.3 - Comparação entre E(21) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 11926 \text{ MPa}$$

$$E(3) = 13301 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_3 = 32$$

$$\phi_{21} = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(3)| = 1375 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 100011996$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 158557045$$

$$\sqrt{\frac{(100011996 + 158557045) 66}{64 \cdot 1089}} = 495$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1375}{495} = 2,779$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - As amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.2.2.4 - Comparação entre E(1) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(1) = 12042 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 13090 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 33$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 32$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(2)| = 1048 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 100045666$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(2) - \bar{E}(2) \right]^2 = 137253737$$

$$\sqrt{\frac{(100045666 + 137253737) 66}{64 \cdot 1089}} = 474$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1048}{474} = 2,1217$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing".

5.5.2.2.5 - Comparação entre E(1) e E(3)

1º Teste

$$E(1) = 12042 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 13301 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 33$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(3)| = 1259 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 100045666$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 158557045$$

$$\sqrt{\frac{(100045666 + 158557045) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 495$$

$$t_{\text{dados}} \frac{1259}{495} = 2,544$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.2.2.6 - Comparação entre E(2) e E(3)

1º teste

$$\bar{E}(2) = 13090 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 13301 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 33$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{E}(2) - \bar{E}(3)| = 211 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(2) - \bar{E}(2) \right]^2 = 137253737$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 158557045$$

$$\sqrt{\frac{(137253737 + 158557045) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 529$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{211}{529} = 0,399$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas co
mo retirados do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(2) - \bar{E}(3) = 0$$

$$\bar{E}(2) = 13090 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 13301 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 211$$

$$s_D = 827$$

$$s_{\bar{d}} = 144$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 211 - 144 \cdot 2,035 \leq \mu_D \leq - 211 + 144 \cdot 2,035$$

$$- 504 \leq \mu_D \leq 82$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese de que as médias sejam iguais.

5.5.2.2.7 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.5.3.2.1. a 5.5.3.2.6, para o Eucalipto Tereticornis, há equivalência estatística apenas entre os módulos de elasticidade longitudinal para carga radial nos seguintes casos: a)- $\bar{E}(21) \cong \bar{E}(1)$ e b)- $\bar{E}(2) \cong \bar{E}(3)$. Em (a), há equivalência entre o par de valores de E mais baixos e em (b), entre o par de valores de E mais altos.

5.5.3 - Jatobá

O material ensaiado é descrito no item 4.4.5. Os resultados são apresentados na tabela 5.5.

TABELA 5.5 - E para Diversos Procedimentos. Carga em Direção Qual-
quer em Relação aos Anéis de Crescimento-Unidade =MPa

C.P.	E(21)	E(1)	E(2)	E(3)
1	15001	14481	17926	17488
2	11412	11790	15510	13683
3	15011	15667	15609	12181
4	13125	13828	14479	14003
5	14503	13976	15120	16084
6	9531	10006	10587	10192
7	17245	16953	18587	18413
8	15839	17044	17411	17189
9	17991	19112	19989	19677
10	17447	16289	19044	20599
11	17475	18702	19513	19699
12	14574	15215	16781	17990
13	12632	12488	14585	13765
14	22272	23655	24918	24800
15	15828	15524	17008	17596
16	13558	14551	14744	14758
17	14712	14692	14753	15523
18	10055	10579	10946	10828
19	14107	14849	15230	15305
20	17518	18048	16228	19644
21	18556	19659	19516	20066
22	16430	15859	17473	18419
23	15824	16962	17224	17438
24	19647	19754	20790	21074
25	18161	19248	18618	19883
26	17238	18058	18439	18685
27	13925	14596	15158	14963
28	16490	18426	19105	18996
Média	15611	16072	17082	17105
D. Padrão	2824	3015	2939	3306
C. Variação	0,181	0,188	0,172	0,193

5.5.3.1 - E para Carreamento em Direção Qualquer em Relação aos Anéis de Crescimento

A comparação dos resultados foi feita com os mesmos testes citados no item 5.5.1.0.1

5.5.3.1.1 - Comparação E(21) e E(1)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 15611 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 16072 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_1 = 28$$

$$\phi_{21} = \phi_1 = 27$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(1)| = 461$$

$$n_1 + n_{21} = 56$$

$$\phi_1 + \phi_{21} = \phi = 54$$

$$\sum_1^{35} [E_i(21) - \bar{E}(21)]^2 = 215311951$$

$$\sum_1^{35} [E_i(1) - \bar{E}(1)]^2 = 237875430$$

$$\sqrt{\frac{(215311951 + 237875430) \cdot 56}{54 \cdot 784}} = 774$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{461}{774} = 0,595$$

$t_{\phi} = 1,997$ (tabelado para ϕ graus de liberdade e 95% de segurança).

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(21) - \bar{E}(1) = 0$$

$$\bar{E}(21) = 15661 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(1) = 16072 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = -411$$

$$s_D = 1162$$

$$s_{\bar{d}} = 220$$

$$t_{0,5} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{0,5} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{0,5} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-411 - 220 \cdot 2,052 \leq \mu_D \leq -411 + 220 \cdot 2,052$$

$$-862 \leq \mu_D \leq 40$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, isto é $\bar{E}(21) = \bar{E}(1)$.

5.5.3.1.2 - Comparação entre E(21) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 15611 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 17082 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_2 = 28$$

$$\phi_{21} = \phi_2 = 27$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(2)| = 1471 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 215311951$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(2) - \bar{E}(2) \right]^2 = 190213753$$

$$\sqrt{\frac{(215311951 + 190213753) 56}{54 \cdot 784}} = 732$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1471}{732} = 2,008$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - As amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.3.1.3 - Comparação entre E(21) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(21) = 15611 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 17105 \text{ MPa}$$

$$n_{21} = n_3 = 28$$

$$\phi_{21} = \phi_3 = 27$$

$$|\bar{E}(21) - \bar{E}(3)| = 1494$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(21) - \bar{E}(21) \right]^2 = 215311951$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 194613668$$

$$\sqrt{\frac{(215311951 + 194613668) 56}{54 \cdot 784}} = 745$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1494}{736} = 2,029$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.5.3.14 - Comparação entre E(1) e E(2)

1º Teste

$$\bar{E}(1) = 16072 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 17082 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 28$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 27$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(2)| = 1010 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_i(1) - \bar{E}(1)]^2 = 237875430$$

$$\sum_1^{35} [E_i(2) - \bar{E}(2)]^2 = 190213753$$

$$\sqrt{\frac{(237875430 + 190213753) 56}{54 \cdot 784}} = 752$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1010}{752} = 1,342$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas co
mo retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0 : \bar{E}(1) - \bar{E}(2) = 0$$

$$\bar{E}(1) = 16072 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(2) = 17082 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 1010$$

$$s_D = 1825$$

$$s_{\bar{d}} = 345$$

$$t_{0,5} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_{\eta} \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 1010 - 2,052 \cdot 345 \leq \mu_{\eta} \leq - 1010 + 2,052 \cdot 345$$

$$- 1718 \leq \mu_{\eta} \leq - 302$$

Como o intervalo da média não contém o zero, a hipótese nula é rejeitada.

5.5.3.1.5 - Comparação entre E(1) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(1) = 16072 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 17105 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 28$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 27$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(3)| = 1033 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(1) - \bar{E}(1) \right]^2 = 237875430$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 194613668$$

$$\sqrt{\frac{(237875430 + 194613668) \cdot 56}{54 \cdot 784}} = 756$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1033}{756} = 1,366$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(1) - \bar{E}(3) = 0$$

$$\bar{E}(1) = 16072 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 17105 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 1033$$

$$s_D = 1698$$

$$s_{\bar{d}} = 321$$

$$t_{05} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 1033 - 2,052 \cdot 321 \leq \mu_D \leq - 1033 + 2,052 \cdot 321$$

$$- 1692 \leq \mu_D \leq - 374$$

Como o intervalo da média não contém o zero, a hipótese nula é rejeitada.

5.5.3.1.6 - Comparação entre E(2) e E(3)

1º Teste

$$\bar{E}(2) = 17082 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 17105 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 28$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 27$$

$$|\bar{E}(2) - \bar{E}(3)| = 23 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(2) - \bar{E}(2) \right]^2 = 190213753$$

$$\sum_1^{35} \left[E_i(3) - \bar{E}(3) \right]^2 = 194613668$$

$$\sqrt{\frac{(190213753 + 194613668) \cdot 56}{54 \cdot 784}} = 713$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{23}{713} = 0,032$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}(2) - \bar{E}(3) = 0$$

$$\bar{E}(2) = 17082 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(3) = 17105 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 23 \text{ MPa}$$

$$s_D = 275$$

$$s_{\bar{d}} = 52$$

$$t_{0.05} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{0.05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{0.05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 23 - 2,052 \cdot 52 \leq \mu_D \leq - 23 + 2,052 \cdot 52$$

$$- 134 \leq \mu_D \leq 84$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, isto é, $\bar{E}(2) = \bar{E}(3)$ com 95% de segurança.

5.5.3.1.7 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.5.4.1.1 a 5.5.4.1.6, para o Jatobá, há equivalência estatística apenas entre os módulos de elasticidade longitudinal nos seguintes casos: a) $\bar{E}(2) = \bar{E}(1)$ e b) $\bar{E}(2) = \bar{E}(3)$. Em a, há equivalência entre o par de valores de E mais baixos e, em b, entre o par de valores de E mais altos.

5.5.4 - Conclusões

Assumindo como verdadeiro o valor de E determinado a partir do ensaio de flexão simples, carga centrada, $l/h = 21$, conclui-se, pelas comparações dos resultados experimentais obtidos, ser o procedimento experimental sugerido no item 5.1 o único a fornecer resultados estatisticamente equivalente ao $E(l/h = 21)$. Isto ocorreu

nos casos da Peroba Rosa, carga tangencial e carga radial; Eucalipto Tereticornis, carga tangencial e carga radial; e Jatobá, com os anéis de crescimento formando direção qualquer em relação à carga aplicada.

5.6 - Apresentação dos Resultados de G

Neste item são discutidos os valores de G obtidos através dos tres procedimentos experimentais sugeridos. A comprovação da conclusão do item 5.5.4 também para os G, facilitará a escolha de um dos procedimentos para a determinação concomitante dos parâmetros E e G das diversas espécies de madeira.

Por facilidade de compreensão, foi adotada a seguinte notação:

G(1) = módulo de elasticidade transversal obtido por meio do 1º Procedimento Experimental.

G(2) = módulo de elasticidade transversal obtido por meio do 2º Procedimento Experimental.

G(3) = módulo de elasticidade transversal obtido por meio do 3º Procedimento Experimental.

Os índices T e R se referem às direções tangencial e radial, respectivamente.

5.6.1 - Peroba Rosa

O material ensaiado é descrito no item 4.4.1. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.6 e 5.7.

TABELA 5.6 - G para os Diversos Procedimentos Experimentais - Carga Tangencial - Unidade MPa

C. P.	G _R (1)	G _R (2)	G _R (3)
1	181	242	255
2	211	255	304
3	305	321	394
4	215	259	420
5	223	235	277
6	293	319	348
7	287	284	256
8	308	537	449
9	243	246	293
10	279	182	220
11	230	199	223
12	208	201	214
13	177	186	140
14	255	172	213
15	199	192	214
16	210	170	173
17	277	221	259
18	234	170	195
19	275	304	371
20	194	164	139
21	264	196	213
22	294	212	237
23	209	199	219
24	416	567	558
25	189	172	189
26	166	148	179
27	189	169	184
28	296	183	211
29	184	198	215
30	173	176	216
31	341	263	296
32	222	178	289
33	237	182	185
34	275	202	233
35	237	494	381
Média	243	240	262
D. Padrão	55	101	93
C. Variação	0,224	0,423	0,354

TABELA 5.7 - G para os Diversos Procedimentos Experimentais - Carga Radial - Unidade = MPa

C.P.	G _T (1)	G _T (2)	G _T (3)
1	300	330	409
2	262	326	405
3	222	228	262
4	278	276	361
5	279	293	285
6	202	224	255
7	303	200	201
8	269	369	372
9	279	284	276
10	232	228	252
11	184	222	281
12	181	189	228
13	233	181	237
14	243	184	238
15	189	163	217
16	266	184	207
17	277	215	282
18	193	216	246
19	340	375	384
20	144	165	208
21	230	209	246
22	227	276	341
23	263	191	271
24	199	465	524
25	176	175	222
26	196	164	194
27	177	147	177
28	293	227	315
29	180	209	253
30	182	183	284
31	240	215	318
32	240	171	204
33	266	198	242
34	332	230	372
35	237	504	395
Média	238	241	282
D.Padrão	48	84	76
C.Variação	0,202	0,349	0,270

5.6.1.1 - G para Carga Tangencial

A comparação dos resultados foi feita com os mesmos testes citados no item 5.5.1.1.

5.6.1.1.1 - Comparação entre G(1) e G(2)

1º teste

$$\bar{G}(1) = 243 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 240 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 34$$

$$|\bar{E}(1) - \bar{E}(2)| = 3 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(1) - \bar{G}(1) \right]^2 = 135293$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(2) - \bar{G}(2) \right]^2 = 287760$$

$$\sqrt{\frac{(135293 + 287760) 70}{68 \cdot 1225}} = 16$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{3}{16} = 0,193$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as médias podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(2) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 243 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 240 \text{ MPa}$$

$$s_D = 68$$

$$s_{\bar{d}} = 11,7$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$3 - 2,030 \cdot 11,7 \leq \mu_D \leq 3 + 2,030 \cdot 11,7$$

$$- 21 \leq \mu_D \leq 27$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, isto é, $\bar{G}(1) = \bar{G}(2)$ com 95% de segurança.

5.6.1.1.2 - Comparação G(1) e G(3)

1º teste

$$\bar{G}(1) = 243 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 262 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(3)| = 19 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(1) - \bar{G}(1) \right]^2 = 135293$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(3) - \bar{G}(3) \right]^2 = 298860$$

$$\sqrt{\frac{(135293 + 298860) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 19$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{19}{19} = 1,0$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 243 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 262 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 19$$

$$s_d = 53$$

$$s_{\bar{d}} = 9,2$$

$$t_{05} = 2,03$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 19 - 2,03 \cdot 9,8 \leq \mu_d \leq - 19 + 2,03 \cdot 9,8$$

$$- 39 \leq \mu_d \leq - 1$$

Como o intervalo da média contém o zero aceita-se a hipótese nula.

5.6.1.1.3 - Comparação entre G(2) e G(3)

1º teste

$$\bar{G}(2) = 240 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 262 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 35$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(2)| = 20 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(2) - \bar{G}(2) \right]^2 = 287760$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(3) - \bar{G}(3) \right]^2 = 290860$$

$$\sqrt{\frac{(287760 + 290860) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 22$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{21}{22} = 0,954$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(2) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(2) = 240 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 262 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 22$$

$$s_d = 46$$

$$s_{\bar{d}} = 7,8$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 22 - 2,03 \cdot 7,8 \leq \mu_d \leq - 22 + 2,03 \cdot 7,8$$

$$- 44 \leq \mu_d \leq 6$$

Como o intervalo da média não contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.1.1.4 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.6.1.1.1. a 5.6.1.1.3, para a Peroba Rosa, carga tangencial, há equivalência estatística nos se guintes casos: a) $\bar{G}(1) = \bar{G}(2)$ e b) $\bar{G}(1) = \bar{G}(3)$.

5.6.1.2 - G para Carga Radial

Para comparação entre os resultados dos procedimentos experimentais sugeridos foram feitos os mesmos testes indicados no item 5.5.1.1.

5.6.1.2.1 - Comparação entre G(1) e G(2)

1º teste

$$\bar{G}(1) = 238 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 241 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 34$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(2)| = 3 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [G_i(1) - \bar{G}(1)]^2 = 128590$$

$$\sum_1^{35} [G_i(2) - \bar{G}(2)]^2 = 239266$$

$$\sqrt{\frac{(128590 + 239266) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 18$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{3}{18} = 0,171$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retidas do mesmo universo.

2º Teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(2) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 238 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 241 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 3$$

$$s_n = 43$$

$$s_{\bar{d}} = 7,3$$

$$t_{05} = 2,03$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_n \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 3 - 2,030 \cdot 7,3 \leq \mu_n \leq - 3 + 2,030 \cdot 7,3$$

$$- 18 \leq \mu_n \leq 12$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.1.2.2 - Comparação entre G(1) e G(3)

1º teste

$$\bar{G}(1) = 238 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 282 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 35$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(3)| = 44 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(1) - \bar{G}(1) \right]^2 = 128590$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(3) - \bar{G}(3) \right]^2 = 273360$$

$$\sqrt{\frac{(128590 + 273360) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 18$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{44}{18} = 2,394$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing"

5.6.1.2.3 - Comparação entre G(2) e G(3)

1º teste:

$$\bar{G}(2) = 241 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 282 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 35$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 34$$

$$|\bar{G}(2) - \bar{G}(3)| = 41 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [G_i(2) - \bar{G}(2)]^2 = 239266$$

$$\sum_1^{35} [G_i(3) - \bar{G}(3)]^2 = 233360$$

$$\sqrt{\frac{(239266 + 233360) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 20$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{41}{20} = 2,050$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso é omitido o 2º teste - "Pairing".

5.6.1.2.4 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.6.1.2.1 a 5.6.1.2.3, para a Peroba Rosa, carga radial, há equivalência estatística no seguinte caso: $\bar{G}(1) = \bar{G}(2)$.

5.6.2 - Eucalipto Tereticornis

O material ensaiado é descrito no item 4.4.3. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9.

TABELA 5.8 - G para os Diversos Procedimentos Experimentais - Carga Aplicada Tangencialmente aos Anéis de Crescimento.
Unidade = MPa

C.P.	G _R (1)	G _R (2)	G _R (3)
1	331	285	330
2	389	411	460
3	289	268	300
4	384	329	358
5	509	409	424
6	334	314	361
7	277	311	311
8	394	392	394
9	405	387	403
10	395	285	278
11	336	306	331
12	355	532	418
13	388	334	311
14	407	476	365
15	325	318	308
16	403	496	423
17	401	476	483
18	270	358	342
19	501	629	488
20	529	376	437
21	341	269	293
22	246	168	177
23	261	237	251
24	258	232	250
25	277	217	242
26	292	245	285
27	267	262	271
28	294	345	278
29	218	236	258
30	325	404	309
31	243	273	297
32	277	276	252
33	223	381	320
Média	341	334	337
D. Padrão	78	95	82
C. Variação	0,229	0,283	0,244

TABELA 5.9 - G para os Diversos Procedimentos Experimentais - Carga Aplicada Perpendicularmente aos Anéis de Crescimento.
Unidade = MPa.

C.P.	G _T (1)	G _T (2)	G _T (3)
1	334	330	500
2	395	417	229
3	451	506	443
4	481	516	512
5	474	553	545
6	445	447	399
7	385	447	457
8	453	507	403
9	385	459	404
10	402	278	339
11	386	382	283
12	499	455	422
13	375	350	304
14	400	517	352
15	439	387	396
16	415	542	387
17	394	448	526
18	362	452	456
19	453	437	396
20	460	424	421
21	352	266	287
22	298	198	243
23	270	195	225
24	385	302	317
25	304	356	211
26	303	358	252
27	248	201	215
28	322	321	282
29	305	267	268
30	334	323	329
31	304	275	278
32	401	533	391
33	335	377	377
Média	378	385	359
D. Padrão	62	106	95
C. Variação	0,164	0,275	0,265

5.6.2.1 - G para Carga Tangencial

A comparação dos resultados foi feita com os mesmos testes citados no item 5.5.1.1.

5.6.2.1.1 - Comparação entre G(1) e G(2)

1º teste

$$\bar{G}(1) = 341 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 334 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 33$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 32$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(2)| = > \text{MPa}$$

$$\sum_1^{35} [G_i(1) - \bar{G}(1)]^2 = 330661$$

$$\sum_1^{35} [G_i(2) - \bar{G}(2)] = 285701$$

$$\sqrt{\frac{(330661 + 285701) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 24$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{7}{24} = 0,290$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(2) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 341 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 334 \text{ MPa}$$

$$d = 7$$

$$s_D = 63$$

$$s_{\bar{d}} = 11,0$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$7 - 2,035 \cdot 11,0 \leq \mu_D \leq 7 + 2,035 \cdot 11,0$$

$$- 35 \leq \mu_D \leq 9$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.2.1.2 - Comparação entre G(1) e G(3)

1º teste

$$\bar{G}(1) = 341 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 337 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 33$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(3)| = 4 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [G_i(1) - \bar{G}(1)]^2 = 330661$$

$$\sum_1^{35} [G_i(3) - \bar{G}(3)]^2 = 217179$$

$$\sqrt{\frac{(330661 + 217179) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 23$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{4}{23} = 0,176$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste - "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 341 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 337 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 4$$

$$s_{\eta} = 51$$

$$s_{\bar{d}} = 8,9$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_{\eta} \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$4 - 2,035 \cdot 8,9 \leq \mu_{\eta} \leq 4 + 2,035 \cdot 8,9$$

$$- 14 \leq \mu_{\eta} \leq 22$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.2.1.3 - Comparação entre G(2) e G(3)

1º teste

$$\bar{G}(2) = 334 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 337 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 33$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{G}(2) - \bar{G}(3)| = 3 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [G_i(2) - \bar{G}(2)]^2 = 285701$$

$$\sum_1^{35} [G_i(3) - \bar{G}(3)]^2 = 217179$$

$$\sqrt{\frac{(285701 + 217179) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 22$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{3}{22} = 0,137$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(2) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(2) = 334 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 337 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = -3$$

$$s_D = 57$$

$$s_{\bar{d}} = 10,0$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-3 - 2,035 \cdot 10,0 \leq \mu_D \leq -3 + 2,035 \cdot 10$$

$$-23 \leq \mu_D \leq 17$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.2.1.4 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.6.2.1.1 e 5.6.2.1.3 para o Eucalipto Tereticornis, carga tangencial, há equivalência estatística nos seguintes casos: a) $\bar{G}(1) = \bar{G}(2)$, b) $\bar{G}(1) = \bar{G}(3)$ e c) $\bar{G}(2) = \bar{G}(3)$, ou seja, entre todos os procedimentos experimentais sugeridos.

5.6.2.2 - G para Carga Radial

Para comparação entre os resultados dos procedimentos experimentais sugeridos, foram feitos os mesmos testes comentados no item 5.5.1.1.

5.6.2.2.1 - Comparação entre G(1) e G(2)

1º Teste

$$\bar{G}(1) = 378 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 385 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 33$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 32$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(2)| = 7 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(1) - \bar{G}(1) \right]^2 = 304040$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(2) - \bar{G}(2) \right]^2 = 358137$$

$$\sqrt{\frac{(304040 + 358137) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} \cdot 25$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{7}{25} = 0,280$$

$$t_{\text{dados}} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º Teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(2) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 378 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 385 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 7$$

$$s_D = 71$$

$$s_{\bar{d}} = 12$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-7 - 2,035 \cdot 12 \leq \mu_D \leq - 7 + 2,035 \cdot 12$$

$$-31 \leq \mu_D \leq 17$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.2.2.2 - Comparação entre G(1) e G(3)

1º Teste

$$\bar{G}(1) = 378 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 359 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 23$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(3)| = 19 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [G_i(1) - \bar{G}(1)]^2 = 304040$$

$$\sum_1^{35} [G_i(3) - \bar{G}(3)]^2 = 290889$$

$$\sqrt{\frac{(304040 + 290889) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 24$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{19}{24} = 0,792 \quad t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 378 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 359 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 19$$

$$s_D = 71$$

$$s_{\bar{d}} = 12$$

$$t_{05} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$19 - 2,052 \cdot 12 \leq \mu_D \leq 19 + 2,052 \cdot 12$$

$$-6 \leq \mu_D \leq 44$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.2.2.3 - Comparação entre G(2) e G(3)

1º Teste

$$\bar{G}(2) = 385 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 359 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 33$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 32$$

$$|\bar{G}(2) - \bar{G}(3)| = 26 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(2) - \bar{G}(2) \right]^2 = 358137$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(3) - \bar{G}(3) \right]^2 = 290889$$

$$\sqrt{\frac{(358137 + 290889) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 25$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{26}{25} = 1,050$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(2) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(2) = 385 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 359 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 26$$

$$s_D = 76$$

$$s_{\bar{d}} = 14,2$$

$$t_{05} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$26 - 2,052 \cdot 14,2 \leq \mu_D \leq 26 + 2,052 \cdot 14,2$$

$$- 3 \leq \mu_D \leq 55$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.2.2.4 - Observações

Pelas comparações dos itens 5.6.2.2.1 a 5.6.2.2.3 para o Eucalipto Tereticornis, carga radial, há equivalência estatística nos seguintes casos: a) $\bar{G}(1) = \bar{G}(2)$; b) $\bar{G}(1) = \bar{G}(3)$ e c) $\bar{G}(2) = \bar{G}(3)$, ou seja, entre todos os procedimentos experimentais sugeridos.

5.6.3 - Jatobá

O material ensaiado é descrito no item 4.4.5. Os resultados são apresentados na tabela 5.10

TABELA 5.10 - G para os Diversos Procedimentos Experimentais - Carga Aplicada em Direção Qualquer em Relação aos Anéis de Crescimento. Unidade = MPa

C.P.	G (1)	G (2)	G (3)
1	306	285	300
2	254	185	219
3	388	259	624
4	524	472	531
5	411	410	408
6	353	303	343
7	667	734	909
8	502	491	507
9	605	599	653
10	585	514	651
11	412	462	471
12	286	244	264
13	391	349	405
14	505	612	604
15	430	454	432
16	407	414	404
17	580	706	553
18	390	376	395
19	375	431	343
20	448	462	410
21	562	631	578
22	412	468	395
23	466	407	379
24	531	572	713
25	433	491	464
26	559	679	567
27	510	511	524
28	491	499	507
média	457	465	484
D. Padrão	100	139	148
C. Variação	0,219	0,299	0,307

5.6.3.1 - Comparação dos Resultados

A comparação dos resultados foi feita com os mesmos testes citados no item 5.5.1.1.

5.6.3.1.1 - Comparação entre G(1) e G(2)

1º teste:

$$\bar{G}(1) = 457 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 465 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_2 = 28$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 27$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(2)| = 8 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(1) - \bar{G}(1) \right]^2 = 432512$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(2) - \bar{G}(2) \right]^2 = 521068$$

$$\sqrt{\frac{(432512 + 521068) \cdot 56}{54 \cdot 784}} = 36$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{8}{36} = 0,225$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(2) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 457 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(2) = 465 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = -8$$

$$s_D = 46$$

$$s_{\bar{d}} = 8,7$$

$$t_{05} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-8 - 2,052 \cdot 8,7 \leq \mu_D \leq -8 + 2,052 \cdot 8,7$$

$$-26 \leq \mu_D \leq 10$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.3.1.2 - Comparação entre G(1) e G(3)

1º teste:

$$\bar{G}(1) = 457 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 484 \text{ MPa}$$

$$n_1 = n_3 = 28$$

$$\phi_1 = \phi_3 = 27$$

$$|\bar{G}(1) - \bar{G}(3)| = 27 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [G_i(1) - \bar{G}(1)]^2 = 432512$$

$$\sum_1^{35} [G_i(3) - \bar{G}(3)]^2 = 594963$$

$$\sqrt{\frac{(432512 + 594963) \cdot 56}{54 \cdot 784}} = 37$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{27}{37} = 0,732$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{G}(1) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(1) = 457 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 484 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 27$$

$$s_d = 81$$

$$s_{\bar{d}} = 15,4$$

$$t_{05} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-27 - 2,052 \cdot 15,4 \leq \mu_d \leq -28 + 2,052 \cdot 15,4$$

$$- 59 \leq \mu_d \leq 5$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.3.1.3 - Comparação entre G(2) e G(3)

1º teste

$$\bar{G}(2) = 465 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 484 \text{ MPa}$$

$$n_2 = n_3 = 28$$

$$\phi_2 = \phi_3 = 27$$

$$|\bar{G}(2) - \bar{G}(3)| = 19 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(2) - \bar{G}(2) \right]^2 = 521068$$

$$\sum_1^{35} \left[G_i(3) - \bar{G}(3) \right]^2 = 594963$$

$$\sqrt{\frac{(521068 + 594963) 56}{54 \cdot 784}} = 38$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{19}{38} = 0,500$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairino"

$$H_0: \bar{G}(2) - \bar{G}(3) = 0$$

$$\bar{G}(2) = 465 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}(3) = 484 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 21$$

$$s_{\bar{d}} = 97$$

$$s_{\bar{d}} = 18,3$$

$$t_{05} = 2,052$$

$$\bar{d} - s_{\bar{d}} \cdot t_{05} \leq \mu_{\bar{d}} \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-21 - 2,052 \cdot 18,3 \leq \mu_{\bar{d}} \leq - 21 + 2,052 \cdot 18,3$$

$$- 59 \leq \mu_{\bar{d}} \leq 17$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

5.6.3.1.4 - Conclusões

Pelas comparações dos itens 5.6.3.1.1 a 5.6.3.1.3, para o Jatobá, carga formando ângulo qualquer em relação aos anéis de crescimento, há equivalência estatística nos seguintes casos: (a) $\bar{G}(1) = \bar{G}(2)$; (b) $\bar{G}(1) = \bar{G}(3)$ e (c) $\bar{G}(2) = \bar{G}(3)$; ou seja, entre todos os procedimentos experimentais sugeridos.

5.6.4 - Conclusões a Respeito dos Procedimentos Experimentais para a Determinação de G

Diante dos comentários concluídos dos itens 5.6.1.1.4 , 6.6.1.2.4, 5.6.2.1.4, 5.6.2.2.4 e 5.6.3.1.4, pode ser admitida a equivalência estatística entre os tres procedimentos experimentais para a determinação dos módulos de elasticidade transversais.

Ainda mais, em virtude das conclusões apresentadas no ítem 5.5.4, é adotado o procedimento experimental exposto em 5.1 mediante o qual poderão ser determinados os parâmetros E e G. Os ensaios propostos são de execução muito simples e o nível de segurança estatística atinge 95%, valor amplamente satisfatório.

5.6.5 - Estimativa do Número Mínimo de Corpos de Prova para a Determinação de E e G

A vista da inconveniência da realização de um número elevado de ensaios, foi fixado, a partir dos resultados experimentais, o número de corpos de prova estatisticamente suficiente para a determinação de E e G para a madeira. Para isto, foi admitido desvio padrão $s = 0,18 \bar{x}$, compatível com os dados apresentados nas tabelas 5.1 a 5.10; $\delta = 0,20 \bar{x}$, ou seja, aceita-se uma variação de 20% para a estimativa do valor médio \bar{x} . O valor de t (tabelado) para um nível de segurança de 95% e 5 graus de liberdade é $t_{05} = 2,57$ e.

$$n \geq \frac{t_{05}^2 s^2}{\delta^2} ; \text{resultando } n \geq 6$$

De acordo com este resultado, estatisticamente suficiente o ensaio de seis corpos de prova para a determinação dos parâmetros E e G da madeira, através do procedimento experimental sugerido no ítem 5.1.

6 - DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E e G VARIANDO A DIREÇÃO DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

Tendo em vista avaliar a influência da posição das camadas de crescimento da madeira em relação à direção das cargas aplicadas, radial ou tangencial, adotou-se o procedimento experimental, indicado no item 5.1, em face das conclusões apresentadas em 5.5.4. e 5.6.4.

6.1 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade E_T e E_R - Peroba Rosa

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.1. Os resultados são apresentados na tabela 6.1.

A comparação dos resultados foi feita com procedimento semelhante ao já adotado no item 5.5.1.1.

19 teste:

$$\bar{E}_T = 10508 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 10671 \text{ MPa}$$

$$n_T = n_R = 35$$

$$\phi_T = \phi_R = 34$$

$$|\bar{E}_T - \bar{E}_R| = 363 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_{T_i} - \bar{E}_T \right]^2 = 138095408$$

$$\sum_1^{35} \left[E_{R_i} - \bar{E}_R \right]^2 = 93861681$$

$$\sqrt{\frac{(138095408 + 93861681) 70}{68 \cdot 1225}} = 441$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{363}{441} = 0,823$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_T - \bar{E}_R = 0$$

$$\bar{E}_T = 10508 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 363$$

$$s_d = 1145$$

$$s_{\bar{d}} = 193,5$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-363 - 2,030 \cdot 193,5 \leq \mu_D \leq -363 + 2,030 \cdot 193,5$$

$$- 756 \leq \mu_D \leq 30$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, isto é, para a Peroba Rosa $E_T = E_R$.

6.2 - Comparação entre os módulos de elasticidade E_T e E_R Eucalipto Tereticornis

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.3. Os resultados são apresentados na tabela 6.2.

TABELA 6.1 - E_T e E_R para a Peroba Rosa - Unidade = MPa

C.P.	E_T	E_R
1	10111	10586
2	12339	11998
3	12332	12458
4	14446	12210
5	11940	10242
6	10400	11055
7	15200	12883
8	14773	13580
9	13332	13878
10	9692	12365
11	10393	10510
12	9626	9782
13	10093	10988
14	10627	10507
15	8627	9196
16	8748	9718
17	10143	12829
18	9752	10821
19	12945	13567
20	8022	7251
21	9098	9724
22	13146	12807
23	8196	9652
24	7986	8819
25	9151	9381
26	7696	8885
27	8630	9642
28	10365	10587
29	9777	9757
30	9189	9834
31	12687	13627
32	8181	9549
33	9449	9819
34	11204	12405
35	9478	9580
Média	10508	10871
D. Padrão	2049	1662
C. Variação	0,195	0,153

TABELA 6.2 - E_T e E_R para o Eucalipto Tereticornis- Unidade = MPa

C.P.	E_T	E_R
1	10517	11908
2	10678	10026
3	12289	12314
4	9703	10801
5	8308	10538
6	12296	11888
7	12691	10527
8	12778	13087
9	13118	13410
10	9971	10884
11	10065	11636
12	11949	13388
13	8613	9540
14	12586	13603
15	10013	12478
16	13601	15304
17	12570	13460
18	10291	10852
19	11324	12407
20	13971	15433
21	10238	11779
22	7869	8365
23	9061	9521
24	12475	13580
25	12165	12842
26	13218	15990
27	9830	10542
28	10730	11842
29	9431	10437
30	11323	11475
31	12845	13969
32	9722	11747
33	11688	12823
Média	11149	12042
D. Padrão	1632	1742
C. Variação	0,146	0,145

A comparação dos resultados foi feita com procedimento se melhante ao item anterior.

1º teste:

$$\bar{E}_T = 11149 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 12042 \text{ MPa}$$

$$n_T = n_R = 33$$

$$\phi_T = \phi_R = 32$$

$$|\bar{E}_T - \bar{E}_R| = 893 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [(E_{T_i} - \bar{E}_T)]^2 = 851714429$$

$$\sum_1^{35} [(E_{R_i} - \bar{E}_R)]^2 = 100045666$$

$$\sqrt{\frac{(85171429 + 100045666) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 449$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{893}{449} = 1,989$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_T - \bar{E}_R = 0$$

$$\bar{E}_T = 11149 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 12042 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 893$$

$$s_D = 1852$$

$$s_{\bar{d}} = 322$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-893 - 2,030 \cdot 322 \leq \mu_D \leq -880 + 2,030 \cdot 322$$

$$-1547 \leq \mu_D \leq -239$$

Como o intervalo da média não contém o zero, rejeita-se a hipótese nula.

6.3. - Comparação entre os Módulos de Elasticidade E_T e E_R - Jatobá

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.5. Os resultados são apresentados na tabela 6.3, apenas com referência aos ensaios com carga tangencial e radial, 6 corpos de prova, conforme o item 5.6.5.

TABELA 6.3 - E_T e E_R para o Jatobá - Unidade = MPa

C.P.	E_T	E_R
1	15001	15893
2	14503	15008
3	9531	10087
4	22272	22318
5	12632	12800
6	16430	16426
Média	15062	15422
D. Padrão	4258	4106
C. Variação	0,283	0,266

A comparação dos resultados foi feita com procedimento semelhante ao item anterior.

1º teste:

$$\bar{E}_T = 15062 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 15422 \text{ MPa}$$

$$n_T = n_R = 6$$

$$\phi_T = \phi_R = 5$$

$$|\bar{E}_T - \bar{E}_R| = 360 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^6 \left[(E_{T_i} - \bar{E}_T) \right]^2 = 90668587$$

$$\sum_1^6 \left[(E_{R_i} - \bar{E}_R) \right]^2 = 84293178$$

$$\sqrt{\frac{(90668587 + 84293178) \cdot 12}{10 \cdot 36}} = 2415$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{360}{2415} = 0,149$$

$$t_{\phi} = 2,228$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_T - \bar{E}_R = 0$$

$$\bar{E}_T = 15062 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 15422 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 360$$

$$s_D = 349$$

$$s_{\bar{d}} = 143$$

$$t_{05} = 2,571$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq u_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 360 - 2,571 \cdot 143 \leq u_D \leq - 360 + 2,571 \cdot 143$$

$$- 727 \leq u_D \leq 8$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

6.4. - Comparação entre os Módulos de Elasticidade E_T e E_R - Canafístula.

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.8. Os resultados são apresentados na tabela 6.4. e se referem aos ensaios com carga tangencial e radial, 6 corpos de prova, conforme o item 5.6.5.

TABELA 6.4 - E_T e E_R para a Canafístula - Unidade = MPa

C.P.	E_T	E_R
1	12967	13726
2	15306	15401
3	14832	15876
4	13520	13612
5	9861	10100
6	11344	12018
Média	12971	13456
D. Padrão	2075	2267
C. Variação	0,160	0,167

A comparação dos resultados foi feita com procedimento semelhante ao item anterior.

1º teste:

$$\bar{E}_T = 12971 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 13456 \text{ MPa}$$

$$n_T = n_R = 6$$

$$\phi_T = \phi_R = 5$$

$$|\bar{E}_T - \bar{E}_R| = 485 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^6 \left[(E_{T_i} - \bar{E}_T) \right]^2 = 21536192$$

$$\sum_1^6 \left[(E_{R_i} - \bar{E}_R) \right]^2 = 2304295$$

$$\sqrt{\frac{(21536192 + 2304295) \cdot 12}{10 \cdot 36}} = 1219$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{485}{1219} = 0,398$$

$$t_{\phi} = 2,228$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_T - \bar{E}_R = 0$$

$$\bar{E}_T = 12971 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 13456 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 485$$

$$s_d = 773$$

$$s_{\bar{d}} = 315$$

$$t_{05} = 2,571$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 485 - 2,571 \cdot 315 \leq \mu_d \leq - 485 + 2,571 \cdot 315$$

$$- 1295 \leq \mu_d \leq 325$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

6.5 - Conclusões

Dos itens 6.1 a 6.4 observa-se a equivalência estatística entre E_T e E_R para a Peroba Rosa, Jatobá e Canafístula. Em relação ao Eucalipto Tereticornis, embora os valores experimentais E_T e E_R pertençam ao mesmo universo, suas médias são diferentes. Contudo em relação à média entre \bar{E}_T e \bar{E}_R , a diferença para \bar{E}_T e \bar{E}_R , não ultrapassa 3,9%.

6.6 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R e G_T Peroba Rosa

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.1. Os resultados são apresentados na tabela 6.5.

A comparação dos resultados foi feita como anteriormente.

1º teste:

$$\bar{G}_R = 243 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 238 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_T = 35$$

$$\phi_R = \phi_T = 34$$

$$|\bar{G}_R - \bar{G}_T| = 5 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_{T_i} - \bar{G}_T \right]^2 = 128590$$

$$\sum_1^{35} \left[G_{R_i} - \bar{G}_R \right]^2 = 135239$$

$$\sqrt{\frac{(128590 + 135239) 70}{68 \cdot 1225}} = 15$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{5}{15} = 0,333$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

TABELA 6.5 - G_R e G_T para a Peroba Rosa - Unidade = MPa

C.P.	G_R	G_T
1	181	300
2	211	262
3	305	222
4	215	278
5	223	279
6	393	202
7	281	303
8	308	269
9	243	279
10	279	232
11	230	184
12	208	181
13	177	233
14	255	243
15	199	189
16	210	266
17	277	277
18	234	193
19	275	340
20	194	144
21	264	230
22	294	227
23	209	263
24	416	199
25	189	176
26	166	195
27	189	177
28	296	293
29	184	180
30	173	182
31	341	240
32	222	240
33	237	266
34	275	332
35	237	237
Média	243	238
D. Padrão	55	48
C. Variação	0,224	0,202

TABELA 6.6 - G_R e G_T para o Eucalipto Tereticornis - Unidade = MPa

C.P.	G_R	G_T
1	331	334
2	389	395
3	289	451
4	384	481
5	509	474
6	334	445
7	277	385
8	394	453
9	405	385
10	395	402
11	336	386
12	355	419
13	388	375
14	407	400
15	325	439
16	403	415
17	401	394
18	270	362
19	501	453
20	529	460
21	341	352
22	246	298
23	261	270
24	258	385
25	277	304
26	292	303
27	267	248
28	294	322
29	218	305
30	325	334
31	243	304
32	277	401
33	323	335
Média	341	378
D. Padrão	78	62
C. Variação	0,229	0,164

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste "Pairing"

$$H_0: \bar{G}_R - \bar{G}_T = 0$$

$$\bar{G}_R = 243 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 238 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 5$$

$$s_D = 72$$

$$s_{\bar{d}} = 12$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$5 - 2,030 \cdot 12 \leq \mu_D \leq 5 + 2,030 \cdot 12$$

$$- 19 \leq \mu_D \leq 30$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

6.7 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R e G_T Eucalipto Tereticornis

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.3. Os resultados são apresentados na tabela 6.6.

A comparação dos resultados foi feita como anteriormente.

1º teste:

$$\bar{G}_R = 341 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 378 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_T = 33$$

$$\phi_R = \phi_T = 32$$

$$|\bar{G}_R - \bar{G}_T| = 37 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_{Ri} - \bar{G}_R \right]^2 = 330661$$

$$\sum_1^{35} \left[G_{Ti} - \bar{G}_T \right]^2 = 304040$$

$$\sqrt{\frac{(330661 + 304040) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} \cdot 25$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{37}{25} = 1,509$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste "Pairing"

$$H_0: \bar{G}_R = \bar{G}_T$$

$$\bar{G}_R = 341 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 378 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 37$$

$$s_{\bar{d}} = 18,9$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 37 - 2,035 \cdot 18,9 \leq \mu_d \leq - 37 + 2,035 \cdot 18,9$$

$$- 75 \leq \mu_d \leq 2$$

Como o intervalo da μ_d contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

6.8 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R
 E_T - Jatobá

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.5. Os resultados são apresentados na tabela 6.7.

TABELA 6.7 - G_R e G_T para o Jatobá - Unidade = MPa

C.P.	G_R	G_T
1	306	290
2	411	384
3	353	362
4	505	481
5	286	300
6	412	417
Média	379	372
D. Padrão	81	72
C. Variação	0,213	0,194

A comparação dos resultados foi feita como anteriormente.

1º teste:

$$\bar{G}_R = 379 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 372 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_T = 6$$

$$\phi_R = \phi_T = 5$$

$$|\bar{G}_R - \bar{G}_T| = 7 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[G_{Ri} - \bar{G}_R \right]^2 = 32643$$

$$\sum_1^{35} \left[G_{Ti} - \bar{G}_T \right]^2 = 26058$$

$$\sqrt{\frac{(32643 + 26058) \cdot 12}{10 \cdot 36}} = 44$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{7}{44} = 0,158$$

$$t_{\phi} = 2,228$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0 : G_R = G_T$$

$$\bar{G}_R = 379 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 372 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 7$$

$$s_D = 17,9$$

$$s_{\bar{d}} = 7,3$$

$$t_{05} = 2,571$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$7 - 7,3 \cdot 2,571 \leq \mu_D \leq 7 + 7,3 \cdot 2,571$$

$$-12 \leq \mu_D \leq 26$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

6.9 - Comparação entre os Módulos de Elasticidade G_R e G_T - Canafístula

O material ensaiado foi descrito no item 4.4.8. Os resultados são apresentados na tabela 6.8.

TABELA 6.8 - G_R e G_T para a Canafístula - Unidade = MPa

C. P.	G_R	G_T
1	407	382
2	288	299
3	326	361
4	395	400
5	399	378
6	411	485
Média	371	378
D. Padrão	51	63
C. Variação	0,138	0,168

A comparação dos resultados foi feita como anteriormente.

1º teste:

$$\bar{G}_R = 371 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 378 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_T = 6$$

$$\phi_R = \phi_T = 5$$

$$|\bar{G}_R - \bar{G}_T| = 7 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^6 \left[G_{Ri} - \bar{G}_R \right]^2 = 13170$$

$$\sum_1^6 \left[G_{Ti} - \bar{G}_T \right]^2 = 20079$$

$$\sqrt{\frac{(13170 + 20079) \cdot 12}{10 \cdot 36}} = 33$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{7}{33} = 0,21$$

$$t_{\phi} = 0,212$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste. "Pairing"

$$H_0: G_R = \bar{G}_T$$

$$\bar{G}_R = 371 \text{ MPa}$$

$$\bar{G}_T = 378 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 7$$

$$s_D = 47$$

$$s_{\bar{d}} = 19$$

$$t_{0.5} = 2,571$$

$$\bar{d} - t_{0.5} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{0.5} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$- 7 - 2,571 \cdot 19 \leq \mu_D \leq - 7 + 2,571 \cdot 19$$

$$- 56 \leq \mu_D < 42$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

6.10 - Conclusões

Dos itens 6.6 a 6.9, observa-se a equivalência estatística entre G_R e G_T para todas as espécies ensaiadas.

Considerando-se as conclusões do item 6.5, passa-se a admitir a equivalência estatística entre os parâmetros E e G para as direções tangencial e radial da madeira. Obviamente, tal conclusão se estende para quaisquer direções intermediárias. Com isto, evidencia-se a não necessidade da realização de ensaios de flexão em corpos de prova com faces obrigatoriamente paralelas aos anéis de crescimento. Esta é uma conclusão muito importante, pois, possibilita a caracterização mecânica da madeira a partir de amostras retiradas, por exemplo, de vigotas de dimensões nominais (6 x 12), (6 x 16) cm² independentemente da posição dos anéis de crescimento.

7 - COMPARAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO DETERMINADO SEGUNDO O MB-26 E O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL REAL À FLEXÃO

Pelo MB-26, o ensaio de flexão para a determinação do módulo de elasticidade \bar{E} é realizado sobre um corpo de prova de dimensões $(6 \times 6 \times 100) \text{ cm}^3$, carga central, perpendicular às camadas de crescimento e distância entre os apoios (ℓ) catorze vezes, a altura do corpo de prova: $\ell = 14 h$. O módulo de elasticidade obtido através deste ensaio, o $E(14)$, é inferior ao módulo de elasticidade real, E_R .

Tendo em vista encontrar a relação existente entre estes dois módulos, fez-se uma comparação entre resultados obtidos na sua determinação.

7.1 - Material Ensaiado

Foram feitos ensaios de acordo com o procedimento experimental citado em 5.1, utilizando-se 35 (trinta e cinco) corpos de prova de Peroba Rosa e 33 (trinta e tres) corpos de prova de Euca - lipto Tereticornis. Nas tabelas deste capítulo são apresentados, para efeito de comparação, os valores de E_R , $E(14)$ e E_T .

7.2 - Apresentação dos Resultados Peroba Rosa

Na tabela 7.1 são apresentados os valores de E_R e de $E(14)$ para a Peroba Rosa.

7.2.1 - Comparação entre E_R e $E(14)$ - Peroba Rosa

Para esta comparação, foram utilizados os mesmos testes indicados nos item 5.5.1.1.

1º teste:

$$\bar{E}_R = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(14) = 9296 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_{14} = 35$$

TABELA 7.1

C.P.	E_R	$E(14)$	E_T
1	10586	9464	10111
2	11998	10779	12339
3	12458	10200	12332
4	12210	10526	14446
5	10242	10008	11940
6	11055	8909	10400
7	12883	8702	15200
8	13580	10809	14773
9	13878	10888	13332
10	12365	9518	9692
11	10510	8967	10393
12	9782	8175	9626
13	10988	8843	10093
14	10507	9293	10627
15	9196	8318	8627
16	9718	8208	8748
17	12829	10614	10143
18	10821	8995	9752
19	13567	11496	12945
20	7251	7438	8022
21	9724	8636	9098
22	12807	11018	13146
23	9652	8829	8196
24	8819	7849	7986
25	9381	8356	9151
26	8885	7476	7696
27	9642	7459	8630
28	10587	9252	10365
29	9757	9023	9777
30	9834	8840	9189
31	13627	11420	12687
32	9549	8359	8181
33	9819	8670	9449
34	12405	10631	11204
35	9580	9329	9478
Média	10871	9296	10508
D. Padrão	1662	1159	2049
C. Variação	0,153	0,125	0,195

$$\phi_R = \phi_{14} = 34$$

$$|\bar{E}_R - E(14)| = 1575 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_{Ri} - \bar{E}_R] = 93861681$$

$$\sum_1^{35} [E(14) - \bar{E}(14)]^2 = 45710885$$

$$\sqrt{\frac{(93861681 + 45710885) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 342$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1575}{342} = 4,599$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso, é omitido o 2º teste, "Pairing"

Assim, para a Peroba Rosa $\bar{E}(14) \neq \bar{E}_R$ e, ainda mais, $\bar{E}_{14} < \bar{E}_R$.

7.2.2 - Relação entre E_R e $E(14)$ - Peroba Rosa

Utilizando-se análise de regressão em relação aos dados da tabela 7.1. obteve-se:

$$E_R = 1,266 E(14) - 932 \dots \dots \dots (7.1)$$

com $r = 0,87$.

À vista deste coeficiente de correlação, aceita-se a equação 7.1 relacionando E_R e $E(14)$, para a Peroba Rosa.

7.3 - Apresentação dos Resultados. Eucalipto Tereticornis

Na tabela 7.2 são apresentados os valores de E_R e $E(14)$ para o Eucalipto Tereticornis.

TABELA 7.2

C.P.	E_R	E(14)
1	11908	10301
2	10026	10168
3	12314	9885
4	10801	10464
5	10538	10729
6	11888	10901
7	10527	9595
8	13087	11862
9	13410	11789
10	10884	9145
11	11636	9471
12	13388	10834
13	9540	8130
14	13603	10799
15	12478	10612
16	15304	12318
17	13460	11576
18	10852	9071
19	12407	10537
20	15433	13364
21	11779	10215
22	8365	7539
23	9521	8563
24	13580	11841
25	12842	11170
26	15990	13826
27	10542	8748
28	11842	9611
29	10437	8534
30	11475	10055
31	13969	12112
32	11747	10058
33	12823	11076
Média	12042	10452
D. Padrão	1742	1430
C. Variação	0,145	0,137

7.3.1 - Comparação entre E_R e $E(14)$ - Eucalipto Tereti -
cornis

Para esta comparação, foram utilizados os mesmos testes indicados no item 5.5.1.1.

1º teste:

$$\bar{E}_R = 12042 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}(14) = 10452 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_{14} = 33$$

$$\phi_R = \phi_{14} = 32$$

$$|\bar{E}_R - \bar{E}(14)| = 1590 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} \left[E_{Ri} - \bar{E}_R \right]^2 = 100045666$$

$$\sum_1^{35} \left[E(14)_i - \bar{E}(14) \right]^2 = 65388806$$

$$\sqrt{\frac{(100045666 + 65388806) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 396$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{1590}{396} = 4,017$$

$$t_{\phi} = 1996$$

Como $t_{\text{dados}} > t_{\phi}$ - as amostras não podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

Neste caso, é omitido o 2º teste: "Pairing"

Assim, para o Eucalipto Tereticornis $\bar{E}(14) \neq \bar{E}_R$ e, ainda mais $E(14) < E_R$

7.3.2 - Relação entre E_R e $E(14)$. Eucalipto Tereticornis

Utilizando-se análise de regressão em relação aos dados da tabela 7.2 obteve-se:

$$E_R = 1,142 E(14) + 104 \dots\dots\dots (7.2)$$

com $r = 0,91$.

À vista deste coeficiente de correlação, aceita-se a equação 7.2 relacionando E_R e $E(14)$, para o Eucalipto Tereticornis.

7.4 - Generalização da Relação entre E_R e $E(14)$

Com base nos dados utilizados para se obter as equações 7.1 e 7.2, foi feita análise de regressão, chegando-se à seguinte equação:

$$E_R = 1,161 E(14) + 11 \dots\dots\dots (7.3)$$

com $r = 0,91$.

À vista deste coeficiente de correlação, aceita-se a equação 7.3, relacionando E_R e $E(14)$ para espécies estruturais.

7.5 - Conclusões

A observação dos itens 7.1 a 7.4 permite concluir ser o módulo de elasticidade obtido segundo as indicações do MB-26, menor em relação ao módulo de elasticidade longitudinal real, com aplicação de carga radial. Como já foi demonstrada a equivalência estatística entre E_R e E_T , pode-se estender a conclusão para as duas direções principais da madeira. As equações lineares obtidas dos dados, apresentaram coeficiente de correlação satisfatório, permitindo seu emprego em soluções de problemas práticos.

8 - MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL REAL NA FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Com base nasas conclusões dos capítulos 4, 5 e 6, apresenta-se neste capítulo a comparação entre os módulos de elasticidade longitudinal real na flexão e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras.

8.1 - Material e Ensaio Realizados

De cada corpo de prova ensaiado à flexão para a determinação de E e G , foram retirados, das regiões próximas das extremidades, dois corpos de prova para ensaio de compressão paralela às fibras. Suas dimensões nominais eram $(5 \times 5 \times 20)$ cm³, e o conteúdo de umidade superior ao ponto de saturação da madeira. A aplicação de carga foi conduzida até o limite de proporcionalidade, com velocidade de carregamento de 10 MPa por minuto. A leitura das deformações foi feita por intermédio de dois relógios comparadores de precisão 0,001 mm, instalados em faces opostas de corpos de prova. Para os cálculos, empregou-se o valor médio das duas medidas realizadas.

Foram ensaiados 35 (trinta e cinco) pares de corpos de prova de Peroba Rosa e 33 (trinta e tres) pares de corpos de prova de Eucalipto Tereticornis. De cada par se extraiu a média com vistas à elaboração da análise estatística dos resultados.

8.2 - Apresentação dos Resultados. Peroba Rosa

Na tabela 8.1 são apresentados os valores do módulo de elasticidade longitudinal real à flexão, com carga tangencial, E_T , e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, E_C . Para efeito de comparação com os resultados apresentados pelo IPT, são apresentados também os valores do módulo de elasticidade longitudinal real à flexão, com carga radial, E_R . Os valores de E_T e E_R foram obtidos seguindo-se o procedimento experimental sugerido em 5.1.

TABELA 8.1

C.P.	E _T	E _C	E _R
1	10111	11036	10586
2	12339	14152	11998
3	12332	12400	12458
4	14446	13381	12210
5	11940	13026	10242
6	10400	12037	11055
7	15200	12413	12883
8	14773	14358	13580
9	13332	12879	13878
10	9692	10418	12365
11	10393	10262	10510
12	9626	9526	9782
13	10093	9660	10988
14	10627	10624	10507
15	8627	8529	9196
16	8748	9267	9718
17	10143	12277	12829
18	9752	9548	10821
19	12945	13093	13567
20	8022	9118	7251
21	9098	8721	9724
22	13146	11743	12807
23	8196	9766	9652
24	7986	8853	8819
25	9151	9740	9381
26	7696	8058	8885
27	8630	8467	9642
28	10365	10997	10587
29	9777	9567	9757
30	9189	10077	9834
31	12687	12675	13627
32	8181	8936	9549
33	9449	10161	9819
34	11204	12167	12405
35	9478	10394	9580
Média	10508	10806	10871
D. Padrão	2049	1753	1662
C. Variação	0,195	0,162	0,153

8.2.1 - Comparação entre E_T e E_C - Peroba Rosa

Para esta comparação, utilizaram-se os mesmos testes indicados no item 5.5.1.1.

1º teste:

$$\bar{E}_T = 10508 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 10806 \text{ MPa}$$

$$n_T = n_C = 35$$

$$\phi_T = \phi_C = 34$$

$$|\bar{E}_T - \bar{E}_C| = 298 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_{Ti} - \bar{E}_T]^2 = 138095408$$

$$\sum_1^{35} [E_{Ci} - \bar{E}_C]^2 = 109855281$$

$$\sqrt{\frac{(138095408 + 109855281) \cdot 70}{68 \cdot 1225}} = 456$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{298}{456} = 0,653$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_T - \bar{E}_C = 0$$

$$\bar{E}_T = 10508 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 10806 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 298$$

$$s_d = 953$$

$$s_{\bar{d}} = 161$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-298 - 2,03 \cdot 161 \leq \mu_d \leq 298 + 2,03 \cdot 161$$

$$- 625 \leq \mu_d \leq 29$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

8.2.2 - Comparação entre E_R e E_C - Peroba Rosa

Para esta comparação, utilizaram-se os mesmos testes indicados no item 5.5.1.1.

1º teste:

$$\bar{E}_R = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 10806 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_C = 35$$

$$\phi_R = \phi_C = 34$$

$$|\bar{E}_R - \bar{E}_C| = 65 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{35} [E_{Ri} - \bar{E}_R]^2 = 93861681$$

$$\sum_1^{35} [E_{Ci} - \bar{E}_C]^2 = 109955281$$

$$\sqrt{\frac{(93861681 + 109855281) 70}{68 \cdot 1225}} = 414$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{65}{414} = 0,157$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste:

$$H_0: \bar{E}_R - \bar{E}_C = 0$$

$$\bar{E}_R = 10871 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 10806 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 65 \text{ MPa}$$

$$s_d = 383$$

$$s_{\bar{d}} = 65$$

$$t_{05} = 2,03$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$65 - 2,03 \cdot 65 \leq \mu_d \leq 65 + 2,03 \cdot 65$$

$$-67 \leq \mu_d \leq 197$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

8.2.3 - Conclusões

De acordo com 8.2.1 e 8.2.2, para a Peroba Rosa, há equivalência estatística entre os módulos de elasticidade longitudinal na flexão, E_T e E_R , com o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

8.3 - Apresentação dos Resultados: Eucalipto Tereticornis

Na tabela 8.2 são apresentados os valores de E_T e E_C . Para efeito de comparação com os resultados apresentados pelo IPT são apresentados também os valores de E_R . Os valores E_T e E_R foram obtidos seguindo-se o procedimento experimental sugerido em 5.1.

TABELA 8.2

C.P.	E _T	E _C	E _R
1	10517	11557	11908
2	10678	11215	10026
3	12289	10693	12314
4	9703	11305	10801
5	8308	11795	10538
6	12296	11147	11888
7	12691	10398	10527
8	12778	13737	13087
9	13118	12454	13410
10	9971	10330	10884
11	10065	10532	11637
12	11949	11911	13384
13	8613	9686	9540
14	12586	10326	13603
15	10013	11220	12478
16	13601	14026	15304
17	12570	12610	13460
18	10291	9928	10852
19	11324	11283	12407
20	13971	16102	15433
21	10238	11838	11779
22	7869	8748	8355
23	9061	9425	9521
24	12475	16021	13580
25	12165	13336	12842
26	13318	14776	15990
27	9830	12489	10542
28	10730	11127	11842
29	9431	10399	10437
30	11323	10839	11475
31	12845	13660	13969
32	9722	10540	11747
33	11688	12145	12823
Média	11149	11740	12042
D. Padrão	1632	1765	1742
C. Variação	0,146	0,150	0,145

$$s_n = 4462$$

$$s_{\bar{d}} = 777$$

$$t_{05} = 2,030$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_n \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-591 - 2,030 \cdot 777 \leq \mu_n \leq -591 + 2,030 \cdot 777$$

$$-2168 \leq \mu_n \leq 986$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

8.3.2 - Comparação entre E_C e E_R : Eucalipto Tereticornis

Para esta comparação foram utilizados os testes indicados em 5.5.1.1.

1º teste:

$$\bar{E}_R = 12042 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 11740 \text{ MPa}$$

$$n_R = n_C = 33$$

$$\phi_R = \phi_C = 32$$

$$|\bar{E}_T - \bar{E}_C| = 302 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{33} [E_{Ri} - \bar{E}_R]^2 = 100045666$$

$$\sum_1^{33} [E_{Ci} - \bar{E}_C]^2 = 99257552$$

$$\sqrt{\frac{(100045666 + 99257552) \cdot 66}{64 \cdot 1089}} = 434$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{302}{434} = 0,695$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

8.3.1 - Comparação entre E_T e E_C : Eucalipto Tereticornis

Para esta comparação utilizaram-se os mesmos testes indicados no item 5.5.1.1.

1º Teste:

$$\bar{E}_T = 11149 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 11740 \text{ MPa}$$

$$n_T = n_C = 33$$

$$\phi_T = \phi_C = 32$$

$$|\bar{E}_T - \bar{E}_C| = 591 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{33} [E_{Ti} - \bar{E}_T]^2 = 85171429$$

$$\sum_1^{33} [E_{Ci} - \bar{E}_C]^2 = 99257552$$

$$\sqrt{\frac{(85171429 + 99257552) 66}{64 \cdot 1089}} = 418$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{591}{418} = 1,414$$

$$t_{\phi} = 1,996$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_T - \bar{E}_C = 0$$

$$\bar{E}_T = 11149 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 11740 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 591$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\alpha}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_R - \bar{E}_C = 0$$

$$\bar{E}_R = 12042 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 11740 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 302$$

$$s_d = 1126$$

$$s_{\bar{d}} = 196$$

$$t_{05} = 2,035$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$302 - 2,035 \cdot 196 \leq \mu_d \leq 302 + 2,035 \cdot 196$$

$$- 97 \leq \mu_d \leq 701$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

8.3.3 - Conclusões

De acordo com 8.3.1 e 8.3.2, para o Eucalipto Tereticor - nis há equivalência estatística entre os módulos de elasticidade longitudinal na flexão (E_T e E_R) com o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

8.4 - Apresentação dos Resultados: Jatobá

Na tabela 8.3 são apresentados os valores de E e de E_C . Os valores de E foram obtidos seguindo-se o procedimento experimental sugerido em 5.1, mas, com aplicação de carga sem escolha da posição das camadas de crescimento.

TABELA 8.3

C.P.	E	E _C
1	14481	15886
2	11790	12400
3	15667	16530
4	13828	13491
5	13976	14550
6	10006	10001
7	16953	19328
8	17044	16178
9	19112	17681
10	16289	21704
11	18702	18377
12	15215	16540
13	12488	11814
14	23655	25457
15	15524	15582
16	14551	14235
17	14692	16422
18	10579	10373
19	14849	16363
20	18048	16499
21	19659	17862
22	15859	16608
23	16962	14845
24	19754	18865
25	19248	18476
26	18058	17172
27	14596	13628
28	18426	16824
Média	16072	16203
D. Padrão	3015	3212
C. Variação	0,188	0,198

8.4.1 - Comparação entre E e E_C: Jatobá:

Para esta comparação foram utilizados os mesmos testes citados no item 5.5.1.1.

1º teste:

$$\bar{E} = 16072 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_C = 16203 \text{ MPa}$$

$$n = n_C = 28$$

$$\phi = \phi_C = 27$$

$$|\bar{E} - \bar{E}_C| = 131 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{28} (E_i - \bar{E})^2 = 237875430$$

$$\sum_1^{28} (E_{C_i} - \bar{E}_C)^2 = 300362492$$

$$\sqrt{\frac{(237875430 + 300362492) \cdot 56}{54 \cdot 784}} = 844$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{131}{844} = 0,155$$

$$t_{\phi} = 1,997$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas como retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E} - \bar{E}_C = 0$$

$$\bar{E} = 16072 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_T = 16203 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = - 131$$

$$s_D = 1917$$

$$s_{\bar{d}} = 362$$

$$t_{0.05} = 2,052$$

$$\bar{d} - t_{0.05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{0.05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$-131 - 2,052 \cdot 363 \leq \mu_D \leq -131 + 2,052 \cdot 362$$

$$- 876 \leq \mu_D \leq 612$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

8.4.2 - Conclusões

De acordo com 8.4.1., para o Jatobá, há equivalência estatística entre o módulo de elasticidade longitudinal na flexão e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras.

8.5 - Apresentação dos Dados. Outras Madeiras

Com o objetivo de comparar E_R , E_T e E_C de outras madeiras foram escolhidas do Boletim 31 do IPT, quarenta árvores de espécies estruturais. Destas espécies são apresentados, na tabela 8.4 os seguintes parâmetros: $E(14)$ na flexão, MB-26, E_C e E_R obtido a partir da equação 7.3. $\rightarrow E_R = 1,161 E(14) + 11$. Em seguida são feitas comparações entre E_C e E_R para as quarenta árvores escolhidas. Unidade MPa.

TABELA 8.4

ESPÉCIE	E(14)	E_C	E_R
Amendoim.....	11125	11949	12927
Angico Vermelho...	9369	11311	10888
Angico Vermelho...	8741	10183	10159
Araribá.....	13705	16245	15922
Araribá.....	7014	8358	8154
Aroeira do Sertão.	14931	18345	17346

TABELA 8.4

ESPECIE	E(14)	E _C	E _R
Aroeira do Sertão	14470	18963	16811
Cabriúva.....	13754	16638	15979
Cabriúva.....	13381	15696	15546
Cabriúva.....	10477	13371	12174
Canela Branca.....	11233	11488	13053
Canela Parda.....	12361	13165	14362
Canela Sassafrãs...	7544	9006	8770
Canela Vermelha....	8240	9113	9577
Canela Vermelha....	7956	9339	9248
Copaíba.....	11772	13773	13678
Copaíba.....	12773	14274	14841
Copaíba.....	10840	12321	12596
Copaíba.....	9918	12213	11526
Combaru	13440	15274	15615
Eucalipto Citriodora	13342	15873	15501
Eucalipto Citriodora	17354	20601	20171
Faveiro.....	13018	17275	15125
Faveiro.....	12557	15009	14590
Guaribu.....	16667	17943	19361
Guatambu Rosa.....	13165	14284	15296
Ipê Tabaco.....	15088	17511	17528
Itaúba.....	14225	15774	16526
Itaúba.....	14794	17001	17187
Jataí Peba.....	21160	24084	24578
Maçaranduba.....	15284	16883	17756
Maçaranduba.....	14774	16589	17164
Sucupira Amarela....	13373	17589	15420
Sucupira Amarela....	16245	18903	18871
Sucupira Amarela....	15755	19021	18303
Sucupira Amarela....	12733	15147	14794
Sucupira Parda.....	16746	19522	19453
Taiúva.....	14146	15323	16435
Taiúva.....	10301	12626	11971
Taiúva.....	15284	17756	17756
Média.....	12974	15146	15075
Desvio Padrão.....	2971	3500	3450
Coef. de Variação...	0,229	0,231	0,229

8.5.1 - Comparação entre E_C e E_R

Para esta comparação foram utilizados os mesmos testes in
dicados no item 5.5.1.1.

1º Teste:

$$\bar{E}_C = 15146 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 15075 \text{ MPa}$$

$$n_C = n_R = 40$$

$$\phi_C = \phi_R = 39$$

$$|\bar{E}_C - \bar{E}_R| = 71 \text{ MPa}$$

$$\sum_1^{40} [E_{Ci} - \bar{E}_C]^2 = 483543013$$

$$\sum_1^{40} [E_{Ri} - \bar{E}_R]^2 = 464335612$$

$$\sqrt{\frac{(483543013 + 464335612) 80}{78 \cdot 1600}} = 780$$

$$t_{\text{dados}} = \frac{71}{780} = 0,091$$

$$t_{\phi} = 1,989$$

Como $t_{\text{dados}} < t_{\phi}$ - as amostras podem ser consideradas co
mo retiradas do mesmo universo.

2º teste: "Pairing"

$$H_0: \bar{E}_C = \bar{E}_R$$

$$\bar{E}_C = 15146 \text{ MPa}$$

$$\bar{E}_R = 15075 \text{ MPa}$$

$$\bar{d} = 71$$

$$s_D = 890$$

$$s_{\bar{d}} = 141$$

$$t_{05} = 2,021$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$71 - 2,021 \cdot 141 \leq \mu_D \leq 71 + 2,021 \cdot 141$$

$$- 214 \leq \mu_D \leq 356$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula.

Estendendo-se a comparação para 404 árvores constantes do Boletim 31 do IPT, obteve-se:

$$n = 404$$

$$\bar{d} = 143$$

$$s_D = 3245$$

$$s_{\bar{d}} = 161$$

$$t_{05} = 1,905$$

$$\bar{d} - t_{05} \cdot s_{\bar{d}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + t_{05} \cdot s_{\bar{d}}$$

$$143 - 1,905 \cdot 161 \leq \mu_D \leq 143 + 1,905 \cdot 161$$

$$- 165 \leq \mu_D \leq 450$$

Como o intervalo da média contém o zero, aceita-se a hipótese nula, isto é, o módulo de elasticidade à compressão é estatisticamente equivalente ao módulo de elasticidade longitudinal real à flexão, com aplicação de carga radial.

8.6 - Conclusões

A constatação da equivalência estatística entre E e E_c para todas as espécies ensaiadas e para as 404 árvores cujos dados se encontram no Boletim 31 do IPT é de enorme importância para o estudo da caracterização mecânica da madeira. Os resultados diferentes, publicados na literatura nacional e internacional se devem ao fato dos métodos indicarem o ensaio de flexão para a relação $l/h = 14$, quando apenas com ensaios onde $l/h \geq 21$ se tem o módulo de elasticidade real à flexão. Com a citada constatação, torna-se possível a conjectura a respeito da eventual supressão de alguns ensaios para a caracterização da madeira, sem prejuízos de quaisquer natureza.

9 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE l/h NO MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MRF) DA MADEIRA

9.1 - Introdução e Apresentação de Resultados

Buscando verificar se a relação entre o vão livre e a altura da peça ensaiada influi no valor do módulo de ruptura à flexão (MRF) foram feitos ensaios utilizando peças de Pinho do Paraná e Peroba Rosa, conforme os detalhes a seguir.

Foram preparados, a partir de seis vigotas de Peroba Rosa de dimensões nominais $(6 \times 12 \times 450)$ cm³, 6 conjuntos de corpos de prova, de seção nominal (5×5) cm² e vários comprimentos, de modo a se ter a relação l/h variando entre 4 e 22. Utilizou-se madeira com teor de umidade acima do ponto de saturação.

Procedimento semelhante se adotou com relação ao Pinho do Paraná. Os comprimentos dos corpos de prova variaram para se ter l/h entre 6 e 24. Empregou-se madeira seca ao ar (teor de umidade em torno de 11 a 12%).

Os ensaios de flexão foram conduzidos até a ruptura, com aplicação de carga central. O cálculo de MRF foi feito através da expressão: $MRF = My/J$. Ao todo foram ensaiados 48 (quarenta e oito) corpos de prova de Peroba Rosa e 36 (trinta e seis) corpos de prova de Pinho do Paraná. Os resultados são apresentados nas tabelas 9.1. e 9.2.

9.2 - Análise de Resultados

Nas tabelas 9.1 e 9.2 fêz-se a determinação dos valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos diferentes resultados de MRF, variando-se l/h , ficando evidente, para os ensaios realizados, não haver influência da variação de l/h no valor de MRF.

A partir dos valores das tabelas 9.1 e 9.2, foram traçados os gráficos das figuras 9.1 e 9.2.

Pelas equações apresentadas, relacionando MRF e l/h para a Peroba Rosa e o Pinho do Paraná, conclui-se, em função dos ensaios realizados, pela não variação de MRF com l/h .

Ainda mais, na tentativa de se relacionar os dados para diversas relações l/h , foram os coeficientes de correlação $r=0,0552$ (Peroba Rosa) e $0,0696$ (Pinho do Paraná). Com isto, fica demonstrada a não variação de MRF com a variação de l/h .

TABELA 9.1 - MRF = $f(\ell/h)$ - Peroba Rosa. Unidade MPa

Conjunto ℓ/h	1	2	3	4	5	6
22	74	85	75	90	-	-
20	-	92	75	-	76	-
18	81	87	81	100	86	86
16	73	85	78	91	-	-
14	83	91	74	94	89	87
12	76	90	83	98	77	88
10	72	85	73	95	89	92
8	-	89	75	91	79	83
6	79	86	83	93	83	90
4	76	-	78	-	-	-
Média	77	88	78	94	83	88
D. Padrão	5	3	4	4	6	3
C. Variação	0,067	0,032	0,048	0,039	0,066	0,032

TABELA 9.2 - MRF = $f(\ell/h)$ - Pinho do Paraná: MPa

Conjunto ℓ/h	1	2	3	4	5	6
24	69	68	62	58	70	62
20	66	68	61	62	71	56
16	63	69	63	63	68	56
12	67	69	64	61	66	56
10	64	68	62	60	68	58
6	66	67	61	60	70	60
Média	66	68	62	61	69	58
D. Padrão	2	1	1	2	2	3
C. Variação	0,032	0,011	0,019	0,29	0,027	0,044

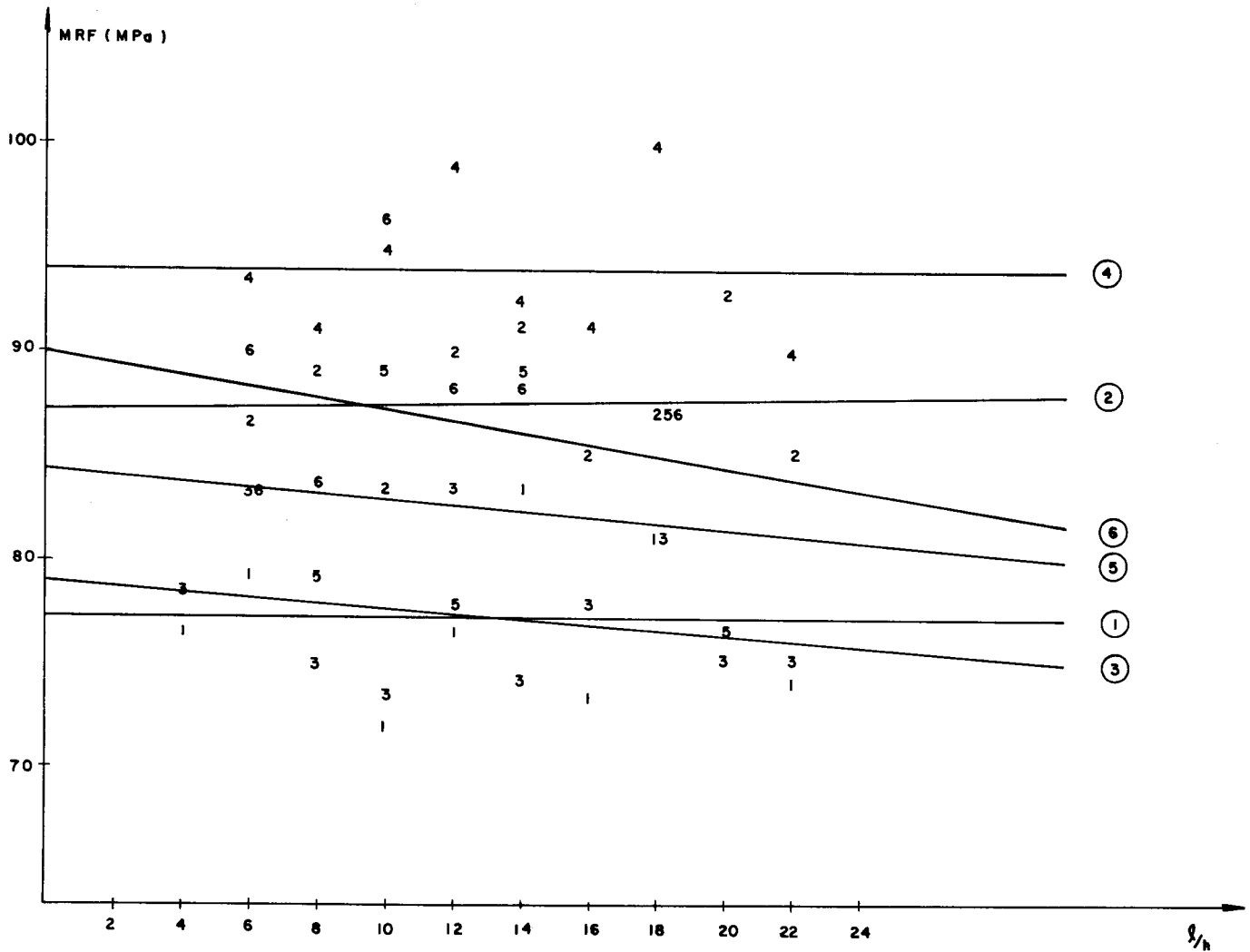


FIG. 9.1 - $MRF = f(l/h)$ PARA PEROBA ROSA

- ① C.P. 1 $\rightarrow MRF = -0.010 (l/h) + 77$
- ② C.P. 2 $\rightarrow MRF = 0.033 (l/h) + 87$
- ③ C.P. 3 $\rightarrow MRF = -0.142 (l/h) + 79$
- ④ C.P. 4 $\rightarrow MRF = -0.008 (l/h) + 94$
- ⑤ C.P. 5 $\rightarrow MRF = -0.132 (l/h) + 84$
- ⑥ C.P. 6 $\rightarrow MRF = -0.161 (l/h) + 90$

PARA TODOS OS DADOS DA TABELA

$$MRF = -0.082 (l/h) + 86$$

$$r = 0.0552$$

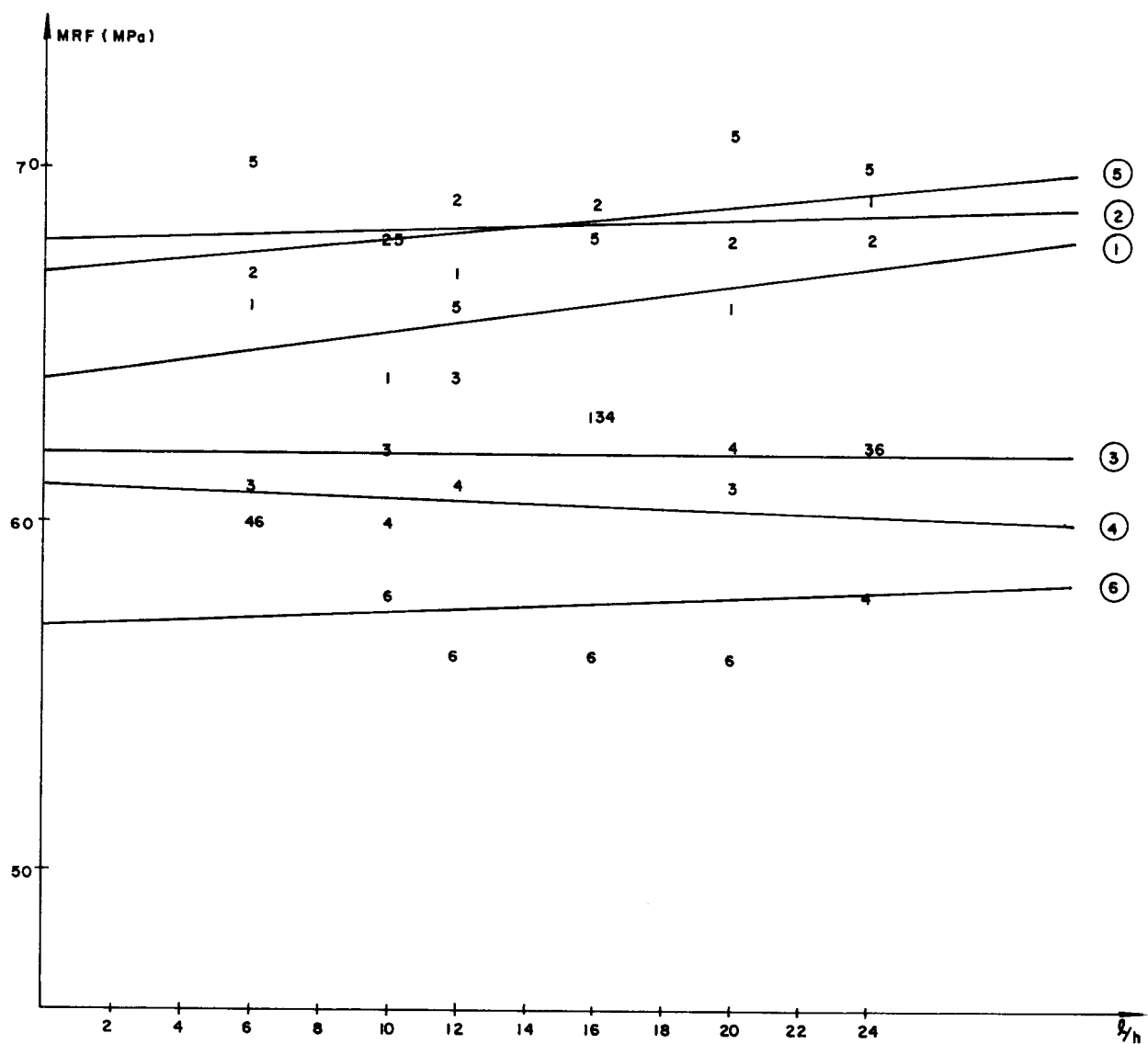


FIG. 9.2 - $MRF = f(l/h)$ PARA PINHO DO PARANÁ

- ① C.P. 1 → $MRF = 0.139 (l/h) + 64$
- ② C.P. 2 → $MRF = 0.0331 (l/h) + 68$
- ③ C.P. 3 → $MRF = -0.003 (l/h) + 62$
- ④ C.P. 4 → $MRF = -0.0301 (l/h) + 61$
- ⑤ C.P. 5 → $MRF = 0.1024 (l/h) + 67$
- ⑥ C.P. 6 → $MRF = 0.0493 (l/h) + 57$

PARA TODOS OS DADOS DA TABELA

$$MRF = 0.0492 (l/h) + 63$$

$$r = 0.0696$$

10 - OUTRAS RELAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIA E ELASTICIDADE DA MADEIRA:

Na tentativa de relacionar a resistência e elasticidade da madeira foi desenvolvida a análise estatística apresentada neste capítulo.

10.1 - Relação entre E_T e MRF

Descobrir uma relação de dependência entre a resistência e a elasticidade da madeira é da maior importância para se prever, através de ensaios no regime elástico, o módulo limite de resistência de peças de madeira submetidas à flexão. Esta relação é fundamental para a classificação de peças pela sua resistência.

10.1.1 - Apresentação dos Resultados: Peroba Rosa

A partir do material descrito em 4.4.1. foi feito ensaio de flexão até a ruptura, com distância entre apoios do corno de prova igual a 14 h, à vista das conclusões do capítulo 9. A carga central, de acordo com o MB-26, foi aplicada tangencialmente aos anéis de crescimento.

Na tabela 10.1 são apresentados os resultados de $E(14)$, carga tangencial, E_T e MRF para os 35 (trinta e cinco) corpos de prova de Peroba Rosa. Unidade: MPa.

TABELA 10.1

C.P.	$E(14)$	E_T	MRF
1	8898	10111	93
2	9989	12339	97
3	10534	12332	110
4	10403	14446	99
5	9615	11940	97
6	8818	10400	91

TABELA 10.1 - Continuação

C.P.	E(14)	E _T	MRF
7	8994	15200	96
8	10664	14773	128
9	10880	13332	116
10	9043	9692	88
11	8440	10393	88
12	7729	9626	69
13	8230	10093	77
14	8802	10627	91
15	7625	8627	81
16	7276	8748	71
17	9746	10143	103
18	8467	9752	86
19	11371	12945	118
20	7065	8022	75
21	7855	9099	82
22	9622	13146	110
23	7827	8196	78
24	7150	7986	74
25	7694	9151	82
26	6654	7696	69
27	6901	8630	71
28	8410	10365	94
29	8379	9777	95
30	7913	9189	87
31	10796	12687	127
32	7482	8181	82
33	8143	9449	86
34	9451	11204	103
35	9153	9478	90
Média	8743	10508	92
D. Padrão	1258	2049	16
C. Variação	0,144	0,195	0,170

TABELA 10.2

C.P.	E(14)	E _T	MRF
1	10854	10517	94
2	10284	10678	97
3	9469	12289	108
4	10213	9703	85
5	10306	8308	80
6	9409	12296	110
7	8908	12691	109
8	11377	12778	109
9	11507	13118	119
10	8149	9971	86
11	8917	10065	92
12	10596	11949	114
13	7436	8613	75
14	10596	12586	108
15	9536	10013	91
16	11347	13061	118
17	10833	12570	110
18	8585	10291	93
19	9754	11324	101
20	12722	13971	128
21	9350	10238	93
22	66840	7869	71
23	7962	9061	84
24	10562	12475	112
25	10055	12165	109
26	11209	13218	120
27	8685	9830	88
28	8212	10730	100
29	8002	9431	87
30	9893	11323	100
31	11218	12845	118
32	8360	9722	90
33	9990	11688	103
Média	9745	11149	100
D. Padrão	1341	1632	14
C. Variação	0,138	0,146	0,140

Utilizando-se a análise de regressão em relação aos dados da tabela 10.1, obteve-se:

$$.MRF = 0,00062 E_T + 26 \dots\dots\dots (19.1)$$

com $r = 0,86$

$$.MRF = 0,0116 E(14) - 9 \dots\dots\dots (10.2)$$

com $r = 0,93$

À vista dos coeficientes de correlação, são aceitas as equações 10.1 e 10.2 para relacionar MRF e E_T , MRF e $E(14)$, para a Peroba Rosa.

10.1.2 - Apresentação dos Resultados: Eucalipto Tereti - cornis

A partir do material descrito em 4.4.3, os corpos de prova com distância entre apoios igual a 14 h foram ensaiados até a ruptura à flexão, com carga central aplicada tangencialmente aos anéis de crescimento, de acordo com o MB-26.

Na tabela 10.2 são apresentados os resultados de $E(14)$, carga tangencial. E_T e MRF para os 33 (trinta e tres) corpos de prova de Eucalipto Tereticornis: Unidade = MPa

Utilizando-se a análise de regressão em relação aos dados da tabela 10.2. obteve-se:

$$. MRF = 0,0086 E_T + 4 \dots\dots\dots (10.3)$$

com $r = 0,96$

$$. MRF = 0,0031 E(14) + 71 \dots\dots\dots (10.4)$$

com $r = 0,45$

10.1.3 - Outras Madeiras

Com o objetivo de se obter uma equação relacionando MRF e E(14), a partir dos dados de 404 árvores apresentadas no Boletim 31 do IPT, obteve-se, através de análise de regressão:

$$\text{MRF} = 0,0076 \text{ E}(14) \dots\dots\dots (10.5)$$

com $r = 0,86$

À vista deste coeficiente de correlação aceita-se a equação 10.5 para relacionar E(14) e MRF.

10.2 - Relação E_c e σ_c

10.2.1 - Apresentação dos Resultados: Peroba Rosa

A partir do material descrito em 4.4.1 e 8.1, foram feitos ensaios de compressão paralela, até à ruptura, em 2 corpos de prova por peça ensaiada à flexão para efeito da análise dos resultados, utilizou-se a média aritmética dos 2 corpos de prova.

Na tabela 10.3, são apresentados os resultados de E_c e σ_c para os 35 (trinta e cinco) corpos de prova de Peroba Rosa. Unidade MPa.

Utilizando-se a análise de regressão em relação aos dados da tabela 10.3, obteve-se:

$$\sigma_c = 0,0038 E_c \dots\dots\dots (10.6)$$

com $r = 0,92$

À vista deste coeficiente de correlação, aceita-se a equação 10.6 relacionando σ_c e E_c para a Peroba Rosa.

TABELA 10.3

C.P.	E_c	σ_c
1	11036	41
2	14152	49
3	13400	47
4	13381	48
5	13026	50
6	12027	51
7	12413	46
8	14358	53
9	12878	47
10	10418	38
11	10262	40
12	9526	36
13	9660	36
14	10624	41
15	8529	30
16	9267	36
17	12277	49
18	9548	35
19	13003	43
20	9119	32
21	8721	31
22	11743	43
23	9766	41
24	8853	28
25	9740	40
26	8058	24
27	8467	31
28	10997	37
29	9567	41
30	10077	38
31	12675	50
32	8936	33
33	10161	34
34	12167	44
35	10394	42
Média	10806	40
D. Padrão	1753	7
C. Variação	0,162	0,181

10.2.2 - Apresentação dos Resultados: Eucalipto Tereti - cornis

A partir do material descrito em 4.4.3 e 8.2 foram feitos ensaios de compressão paralela, até a ruptura, em 2 corpos de prova para cada peça ensaiada à flexão. Na análise dos resultados, utilizou-se a média aritmética dos resultados destes 2 corpos de prova.

Na tabela 10.4, são apresentados os resultados de E_C e σ_C para os 33 (trinta e tres) corpos de prova de Eucalipto Tereticornis. Unidade = MPa.

TABELA 10.4

C.P.	E_C	σ_C
1	11557	42
2	11215	41
3	10693	38
4	11305	44
5	11795	48
6	11147	48
7	10398	42
8	13737	54
9	12454	48
10	10330	38
11	10532	39
12	11911	44
13	9686	38
14	10326	36
15	11220	42
16	14026	53
17	12610	49
18	9928	39
19	11283	47
20	16102	59
21	11838	48
22	8748	30
23	9425	35
24	16021	63
25	13336	50

TABELA 10.4 - Continuação

C.P.	E_C	σ_C
26	14776	53
27	12489	42
28	11127	40
29	10399	42
30	10839	42
31	13660	54
32	10540	43
33	12145	49
Média	11740	45
D. Padrão	1765	7
C. Variação	0,150	0,159

Utilizando-se análise de regressão em relação aos dados da tabela 10.4, obteve-se:

$$\sigma_C = 0,0037 E_C \dots\dots\dots (10.7)$$

com $r = 0,94$

À vista deste coeficiente de correlação, aceita-se a equação (10.7) relacionando σ_C e E_C para o Eucalipto Tereticornis.

10.2.3 - Apresentação dos Resultados: Jatobá

A partir do material descrito em 4.4.5 e 8.3 foram feitos ensaios de compressão paralela, até a ruptura, em 2 corpos de prova para cada peça ensaiada à flexão. Na análise dos resultados, utilizou-se a média aritmética dos resultados destes 2 corpos de prova.

Na tabela 10.5 são apresentados os resultados de E_C e σ_C , para os 28 (vinte e oito) corpos de prova de Jatobá: Unidade = MPa.

Utilizando-se a análise de regressão em relação aos dados da tabela 10.5, obteve-se a equação 10.8.

TABELA 10.5

C.P.	E_c	σ_c
1	15886	57
2	12400	43
3	15530	58
4	12510	42
5	14550	53
6	9020	31
7	19324	76
8	16178	60
9	17681	67
10	21704	77
11	18077	74
12	15540	62
13	11414	42
14	25457	97
15	15582	67
16	14235	52
17	16422	64
18	10373	36
19	15363	58
20	16099	67
21	17861	68
22	16608	59
23	14844	53
24	18865	76
25	18476	80
26	17172	69
27	13627	47
28	16824	60
Média	15987	61
D. Padrão	3335	15
C. Variação	0,209	0,242

$$\sigma_c = 0,0042 E_c - 7 \dots\dots\dots (10.8)$$

com $r = 0,96$

10.2.4 - Equação de $\sigma_C = f(E_C)$

A partir dos dados das tabelas 10.3, 10.4 e 10.5, com a utilização de análise de regressão, obteve-se a equação (10.7) para relacionar σ_C e E_C , no caso de madeiras estruturais.

$$\sigma_C = 0,004 E_C \dots\dots\dots (10.9)$$

com $r = 0,97$

À vista deste coeficiente de correlação, aceita-se a equação (10.9) para relacionar σ_C e E_C , referentes às espécies estudadas.

10.3 - Relação entre E_C e σ_C . Outras Madeiras

Com o objetivo de se obter uma equação relacionando σ_C e E_C , a partir dos dados de 404 árvores apresentadas no Boletim 31 do IPT, obteve-se, através de análise de regressão:

$$\sigma_C = 0,0026 E_C \dots\dots\dots (10.10)$$

com $r = 0,77$

10.4 - Conclusões

O fato de terem sido correlacionados individualmente os resultados dos corpos de prova, possibilitou um incremento nos valores dos coeficientes de correlação se comparados com os apresentados por outros autores, por exemplo, Freitas. Desnecessária seria a repetição, neste item, das considerações a respeito da importância das equações obtidas, para a previsão das propriedades de resistência da madeira a partir de parâmetros de elasticidade, obtidos pela realização de ensaios não destrutivos. A aplicação na prática das citadas equações permitirá melhor utilização da madeira, a nível do projeto e da construção de obras de médio e grande porte. Ao lado da utilização racional do material, a segurança das estruturas de madeira será significativamente aumentada.

11 - CONCLUSÕES FINAIS

Com base na experimentação realizada e na análise estatística dos resultados obtidos, as conclusões finais aqui são resumidas. Ao longo do trabalho, foram sendo apresentadas as conclusões relativas a cada capítulo desenvolvido. Entretanto, agrupá-las no final, se constitui em facilidade para permitir a observação de todo o desenrolar dos estudos.

11.1 - A não consideração das deformações cisalhantes no cálculo das flechas de elementos estruturais conduz a uma variação do módulo de elasticidade aparente à flexão (E_a) para valores da relação vão livre-altura da viga inferiores a 21. Esta constatação permitirá a estimativa mais precisa do desempenho de peças de madeira submetidas a solicitações de flexão.

11.2 - O módulo de elasticidade aparente à flexão não varia para valores da relação largura-altura da peça fletida compreendidos entre 0,5 e 3,4, considerando-se relações vão livre-altura da peça inferiores a 26. Esta constatação é interessante subsídio para a verificação do comportamento de peças de madeira submetidas à flexão.

11.3 - Entre os procedimentos experimentais sugeridos para a determinação do módulo de elasticidade real à flexão (E) e do módulo de elasticidade transversal (G) da madeira, o mais favorável é aquele comentado no item 5.1 do trabalho. Este procedimento experimental se constitui em importante subsídio a ser apresentado à ABNT, visando à futura redação do MB-26, com a introdução do ensaio para a determinação dos dois parâmetros citados.

11.4 - O número estatisticamente mínimo de corpos de prova para a determinação de E e G é de seis por espécie. O interesse do conhecimento deste número reside na complementação da sugestão comentada em 11.3. Trata-se de uma quantidade relativamente pequena de ensaios, com representatividade estatística altamente significativa.

11.5 - São estatisticamente equivalente os valores dos módulos de elasticidade na flexão, com cargas aplicadas tangencialmente aos anéis de crescimento (E_T) e perpendicularmente aos anéis de crescimento (E_R). Igualmente, há equivalência estatística entre os módulos de elasticidade transversais na flexão, com os carregamentos citados (G_R e G_T). O número de ensaios para a determinação destes parâmetros fica reduzido à metade. Outra consequência importante se refere à possibilidade da realização de ensaios em corpos de prova com direções quaisquer entre suas faces e as camadas de crescimento da madeira, não convencional nos métodos nacionais e internacionais. Assim, a amostragem por espécie pode ser feita a partir de peças de seções comerciais, encontradas em serrarias.

11.6 - O valor de G , para as espécies de madeira ensaiadas, é da ordem de $E/30$ a $E/40$. Isto vem corroborar com a conclusão apresentada em 11.1, ficando tacitamente firmado o fato da impossibilidade da não consideração das deformações cisalhantes no cálculo da flecha total de elementos estruturais de madeira submetidos à solicitações de flexão.

11.7 - O módulo de elasticidade aparente obtido pelo ensaio sugerido pelo MB-26 e outros métodos internacionais, tem valor inferior ao módulo de elasticidade real à flexão. Em virtude disto, foi verificada a existência de uma relação linear entre os dois parâmetros citados. A importância da relação reside no fato da plena possibilidade de aproveitamento dos resultados de E_a obtidos na experimentação efetuada com base no MB-26, ou seja, a partir dos dados já conhecidos, pode-se estimar, com satisfatório nível de significância estatística, os valores de E para mais de trezentas espécies de madeira crescidas no país.

11.8 - O módulo de elasticidade longitudinal real na flexão e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, na madeira, são estatisticamente equivalentes. Nas tabelas de características físicas e mecânicas de madeiras, publicadas no Brasil e, também, fora dele, os valores desses dois parâmetros são bem diferentes. Isto se justifica pelo fato de o módulo da flexão ser obtido por expressão simplificada, não se considerando as deformações devidas aos esforços cisalhantes. A constatação da equivalência estatística dos módulos citados possibilitará a racionalização dos en

saios para caracterizar a madeira.

11.9 - Não há influência da relação vão livre-altura no módulo de ruptura de peças de madeira submetidas a esforços de flexão. Com isto, torna-se indiferente a adoção de corpos de prova com quaisquer valores de l/h para a determinação da resistência da madeira à flexão, podendo ser aproveitados para este objetivo, os mesmos corpos de prova utilizados para se estabelecerem os valores do módulo de elasticidade longitudinal real e o módulo de elasticidade transversal na flexão.

11.10 - Existe dependência linear entre o módulo de elasticidade longitudinal real e o módulo de resistência ruptura à flexão, apresentando satisfatório coeficiente de correlação. Existe também dependência linear entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura à compressão paralela às fibras da madeira, e, igualmente satisfatório coeficiente de correlação. Os citados coeficientes foram obtidos mediante análise de resultados válidos para corpos de prova individuais, das diversas espécies ensaiadas.

O conhecimento destas relações permitirá a previsão, sem ensaios destrutivos, dos parâmetros de ruptura à flexão e à compressão paralela às fibras, possibilitando aproveitamento mais racional da madeira, através da prévia classificação das peças a serem empregadas estruturalmente.

BIBLIOGRAFIA

- 1- AL-DABBAGH, A.; GOODMAN, J.R.; BODIG, J.- Finite element method for wood mechanics. Journal of the Structural Division, 98 (3), March, 1972.
- 2- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS- Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, ASTM, 1952. (ASTM Designation: D 143-52).
- 3- _____ - Standard methods of testing veneer, plywood, and other glued veneer constructions. Philadelphia, ASTM, 1952. (ASTM Designation: D 805-52).
- 4- ASSOCIAÇÃO DE ALUNOS DA ESCOLA POLITÉCNICA DE SÃO PAULO- Manual de resistência dos materiais. São Paulo, Grêmio Politécnico, 1905.
- 5- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- Cálculo e execução de estruturas de madeira - NB-11. Rio de Janeiro, ABNT, 1951.
- 6- _____ - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras - MB-26. Rio de Janeiro, ABNT, 1940.
- 7- BECKER, Helmut F.- Messung der schubmoduln von volholz mit akustischen torsionsschwingungen. Holz als Roh-und Werkstoff, 31, 1973.
- 8- BECKER, Helmut F. & NOACK, Detlev- Studies on dynamic torsional viscoelasticity of wood. Wood Science and Technology, 2, 1968.
- 9- BEGHTEL, S.C. & NORRIS, Charles B.- Strength of wood beams of rectangular cross section as affected by span-depth ratio. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (1910), Jan. 1959.
- 10- BODIG, Jozsef- Linearized deformation at failure: a proposed design tool. Wood Science, 11(3), Jan. 1979.

- 11- BODIG, Jozsef & GOODMAN, James R.- Prediction of elastic parameters for wood. Wood Science, 5(4), April, 1973.
- 12- BOLZA, E. & KLOOT, H.H.- The mechanical properties of 174 Australian timbers. Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1963. (Division of Forest Products Technological Paper nº 25).
- 13- BOOTH, L.G.- The Strength testing of timber during the 17th and 18th centuries. Journal of the Institute of Wood Science, London, (13): 9, nov. 1964.
- 14- BROTERO, Frederico A.- Métodos de ensaios adotados no I.P.T. para o estudo de madeiras nacionais. 2.ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1956. (Boletim nº 31).
- 15- BROTERO, Frederico A. & LARRABURE, Fernando J.- Tubos de aduelas de madeira (dados para o cálculo e execução). Sep. do: Boletim da Inspetoria de Serviços Públicos, (6), maio, 1941.
- 16- BROWN, Kenneth M.- A glue laminated beam analyzer for convention or reliability based engineering design. West Lafayette, Indiana, Purdue University; Agricultural Experiment Station, july, 1977. (Research Bulletin nº 940).
- 17- CHOW, Poo- Deflection in bending of birch-veneered wood-base composite Shelving panels. Forest Products Journal, 29 (12), Dec. 1979. (Technical Note).
- 18- _____ - Modulus of elasticity and shear deflection of walnut-veneered-particleboard composite beams in flexure. Forest Products Journal, 22 (11), nov. 1972.
- 19- CHOW, Poo & HANSON, Richard C.- Shelling ratio and core density effects on stiffness, ultimate strength, and toughness of veneer-ed-hardboard beams. Forest Products Journal, 30 (1), jan. 1980.

- 20- COCHRAN, W. & COX, G.M.- Experimental desings. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1957. 611p. (A Wiley Publications in Statistics).
- 21- CORDER, S.E.- Localized deflection related to bending strength of lumber. Sep. de: Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 2. - PROCEEDING. Washington, April, 1965.
- 22- CURRY, W.T. & FEWELL, A.R.- The relations between the ultimate tension an ultimate compression strength of timber and its modulus of elasticity. Building Research Establishment; Princes Risborough Laboratory, May, 1977. (Current Paper, 22/77).
- 23- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG- Kennwerte von holzarten: festigkeit, elastizität, resistenz - DIN 68364. Berlin, Verlag, Nov. 1979.
- 24- DOYLE, D.V.; DROW, J.T.; McBURNEY, R.S.- Elastic properties of wood: The young's moduli, moduli of rigidity, and Poisson's ratios of Balsa and Quipo. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., s/d. (Report n^o 1528).
- 25- ECKELMAN, Carl A.- Effect of holes on the bending strength of wood and particleboard parts. West Lafayette, Indiana, Purdue University; Agricultural Experiment Station, June, 1975. (Research Bulletin n^o 922).
26. ETHINGTON, Robert L.- Stiffness and bending strength of beams laminated from two species of wood. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (2156), Sept. 1960.
- 27- ETHINGTON, R.L. & HILBRAND, H.C.- Anisotropy in wood. Orientation Effects in the Mechanical Behavior of Anisotropic Structural Materials, ASTM, 1966. (Special Technical Publication n^o 405).
- 28- FERNANDEZ, Virgilio A. & POLENSEK, Anton- Model for predictin strength and stiffness of wood studs. Wood Science, 12 (2), October, 1979.

- 29- FOUJNET, Amos- Methodes de caracterisation de materiaux anisotropes: application ad bois. Lyon, L'Institut National des Sciences Appliques de Lyon, 1980. (These-Docteur-Ingenieur).
- 30- FREITAS, Amantino Ramos de- Probabilistic approach in the design of wood structures in Brazil based on the variability of 23 species. São Paulo, I.P.T./Divisão de Madeiras, 1978. 79p. Dissertation-Doctor of Philosophy. (Publicação nº 1198).
- 31- FUSCO, Pêricles Brasiliense- Estruturas de concreto: fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, EDUSP, 1976. 274p.
- 32- GOPU, Vijaya K.A. & GOODMAN, James R.- Full-scale tests on tapered and curved glulam beams. Journal of the Structural Division, 101 (12), Dec. 1975.
- 33- GOULET, Marcel & LAFOREST, Pierre- Étude de l'application de la théorie de l'élasticité aux déformations du bois sous pression. Québec, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois, Université Laval, Décembre, 1974. (Note de Recherches nº 11).
- 34- GUNNERSON, R.A.; GOODMAN, J.R.; BODIG, J.- Plate tests for determination of elastic parameters of wood. Wood Science, 5 (4), April, 1973.
- 35- HEARMON, R.F.S.- The elasticity of wood and plywood. London, His Majesty's Stationery office; Department of Scientific and Industrial Research, 1948. (Forest Products Research Special Report nº 7).
- 36- HELLMEISTER, João Cesar- Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, EESC-USP, 1973. Tese (Doutor-Engenheiro). p.8.
- 37- HUNT, Michael O. & SENFT, John F.- Derivation of stress grades for structural lumber. Lafayette, Indiana, Purdue University; Cooperative Extension Service, May, 1965. (Mimeo F-50).

- 38- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- Boletim informativo das cerimônias do cincoentenário do I.P.T. e da inauguração de suas instalações experimentais de metalurgia, na cidade Universitária, sob a presidência de V. Excia. o governador do Estado e do Magnífico Reitor da Universidade. São Paulo, I.P.T., julho, 1949. (Boletim nº 35).
- 39- JAYNE, B.A. & SUDDARTH, S.K.- Matrix-tensor mathematics in orthotropic elasticity. Orientation Effects in the Mechanical Behavior of Anisotropic Materials, ASTM: 39-58, 1966. (Special Technical Publication nº 405).
- 40- JOHNSON, J.W.- Relationships among moduli of elasticity and rupture: seasoned and unseasoned coast-type douglas fir and seasoned Western hemlock. sep. de: Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 2. - PROCEEDINGS. Washington, April, 1965.
- 41- JOHNSON, J.W. & KUNESH, R.H.- Tensile strength of special douglas-fir and hem-fir 2-inch dimension lumber. Sep. de: Wood and Fiber, 6 (4), 1975.
- 42- KEENAN, F.J.- "Project D: poisson's ratios and orthotropic of Douglas-fir". In: _____ - The ghear strength of glued laminated timber beams. Toronto, Canada, Department of Civil Engineering; University of Toronto, 1973. (Ph. D. Thesis).
- 43- KOEHLER, Arthur- The shrinking and swelling of wood. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., July, 1931.
- 44- KOLLMANN, Franz- Tecnologia de la madera y sus aplicaciones. Madri, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera, 1959. v.1.
- 45- KUENZI, E.W.- Methods for determining the elastic constants of nonmetallic materials. Sep. de: American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA, (160), 1952.

- 46- LIU, J.Y. & CHENG, S.- Analysis of orthotropic beams. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., May, 1979. (Research Paper. FPL 343).
- 47- MARCH, H.W.- Stress-strain relations in wood and plywood considered as orthotropic materials. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., s/d. (Mimeo nº 1503).
- 48- MARCH, H.W.; KUENZI, E.W.; KOMMERS, W.J.- Method of measuring the shearing moduli in wood. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (1301), June, 1942.
- 49- MARKWARDT, L.J.- New toughness machine is aid in wood selection. Wood Working Industries, Jan. 1926
- 50- McGOWAN, W.M.- Tensile and flexural properties of a Douglas-fir lumber/veneer composite. Vancouver, British Columbia, Department of the Environment; Canadian Forestry Service, Western Forest Products Laboratory, April, 1973. (Information Report VP-X-108).
- 51- McGOWAN, W.M. & SMITH, W.J.- Strength and related properties of western red cedar poles. Canada, Department of Forestry, 1965. (Publication nº 1108).
- 52- McLAIN, Thomas E. & BODIG, Jozsef- Determination of elastic parameters of full-size wood composite boards. Forest Products Journal, 24(4), April, 1974.
- 53- MEILLER, João L. & SILVA, Francisco I. A.- Meio século de tecnologia (1899-1949). São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Junho, 1949. (Boletim nº 34).
- 54- MEYER, Paul L.- Probalilidade: aplicações à estatística. Trad. do Prof. Ruy de C.B. Lorenço Filho. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1972.
- 55- MONNIN, M.- Essais physiques, statiques et dynamiques des bois. Bulletin de La Section Technique de L'Aéronautique Militaire, (29), Juin, 1919.

- 56- MONNIN, M.- Leçons sur les bois de construction. Ecole Nationale Supérieure de L'Aéronautique, 1930/31.
- 57- NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION-Design values for wood construction. Washington, NFPA, July, 1981. (Supplement to the 1977 edition of National Design Specification for wood Construction).
- 58- _____ - National design specification for wood construction. Washington, NFPA, 1977. (6d - Lumber).
- 59- NEMETH, L.J.- Correlation between tensile strength and modulus of elasticity for dimension lumber. Sep. de: Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 2. PROCEEDINGS. Washington, April, 1965.
- 60- NEWLIN, J.A. & TRAYER, G.W.- Deflection of beams with special reference to shear deformations. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (1309), March, 1956. (Reprint from National Advisory Committee for Aeronautics, report 180, 1924).
- 61- NOACK, D. & ROTH, W. von- On the theory of elasticity of the orthotropic material wood. Wood Science and Technology, 10, 1976.
- 62- NORRIS, Charles B.- Strength of orthotropic materials subjected to combined stress. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (1816), May, 1962.
- 63- NORRIS, C.B. & MCKINNON, P.F.- Compression, tension and shear tests on yellow-poplar plywood panels of sizes that do not buckle with tests made at various angles to the face grain. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (1328), 1962.
- 64- POLENSEK, Anton- Properties of components and joints for rational design procedure of wood-stud walls. Wood Science, 10 (4), April, 1978.

- 65- ROTH, Walter von- Zur kennzeichnung der elastomechanischen eigenschaften von holzwerkstoffen: ein weiterer vorschlag. Holz als Roh-und Werkstoff, 31, 1973.
- 66- SCHWAB, E. & POLACZEK, P.- Bestimmung der schubmoduln von holz durch statische torsionsversuche: beitrag zur neufassung DIN 52 190. Holz als Roh-und Werkstoff, 35, 1977.
- 67- SEICHEPINE, Jean Louis- Mise au point d'une methode experimentale destinee a l'identification de la matrice des complaisances elastiques de solides anisotropes: application aux materiaux bois. Lorraine, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1980. (These - Docteur Ingenieur).
- 68- SENFT, John F.- & DELLA LUCIA, Ricardo M.- Increased utilization of tropical hardwood through species-independent structural grading. Forest Products Journal, 29(6), June, 1979. (Technical Section).
- 69- SNEDECOR, G.W.- Statistical methods: applied to experiments in agriculture and biology. 5. ed. Ames, Iowa, The Iowa State University, 1956. 534p.
- 70- STEEL, R.G.D. & TORRIE, J.H.- Principles and procedures of statistics. New York, MdGraw-Hill, 1960. 481p.
- 71- SUDDARTH, S.K. & WOESTE, F.E.- Influences of variability in loads and modulus of elasticity on wood column strength. Wood Science, 10(2), Oct. 1977.
- 72- SUDDARTH, S.K.; WOESTE, F.E.; YAO, J.T.P.- Effect of E-variability on the deflection behavior of a structure. Forest Products Journal, 25(1), Jan. 1975.
- 73- TIMOSHENKO, S.P. & GOODIER, J.N.- Theory of elasticity. 3. ed. New York, McGraw-Hill; Tokyo, Kogakusha, 1970. 567p. (International Student Edition).

- 74- WILSON, T.R.C.; CARLSON, T.A.; LUXFORD, R.F.- The effect of partial seasoning on the strength of wood. In: AMERICAN WOOD PRESERVER'S ASSOCIATION - Proceedings. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., 1930.
- 75- WOOD, Lyman W.- Factor of safety in design of timber structures. Sep. de: Transaction, 125, P.I., 1960. (Paper n° 3051).