

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

TRAÇÃO PARALELA EM PEÇAS DE MADEIRA

EDUARDO CHAHUD

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de "Mestre em Engenharia de Estruturas"

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR - ORIENTADOR (EESC-USP)
PROF. DR. TELEMACO HIPPOLYTO DE MACEDO VAN LANGENDONCK (EPUSP)
PROF. DR. JOÃO CESAR HELLMEISTER (EESC-USP)

SÃO CARLOS, JUNHO DE 1985

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, e em particular:

- aos Professores Doutores: João Cesar Hellmeister e Carlito Calil Junior, pelas valiosas sugestões e amizade demonstrada.
- ao Jaime Galindo e ao Roberto Galindo pela elaboração dos desenhos.
- ao José Francisco e à Tânia Maria pela datilografia.
- ao Arnaldo, Aparecido, Antonio e Silvio pelo apoio na confecção e ensaios dos corpos de prova.
- à bibliotecária Neide pelo grande apoio no desenrolar da pesquisa bibliográfica.
- à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro.
- Ao Professor Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr pela sua incansável dedicação na orientação técnica do trabalho, bem como à paciência e amizade demonstrada nos momentos de dificuldade.
- Ao Professor Francisco Antonio Romero Gesualdo pela colaboração na análise estatística dos resultados.

A meus pais Natal e Glória e a minha noiva Eliana

"Adquire a sabedoria, adquiere a inteligência, e não te esqueças nem te apartes das palavras da minha boca".

(Provêrbios 4:5)

RESUMO

A grande maioria das normas internacionais a respeito do projeto e da execução de estruturas adota, atualmente, o Método Semi Probabilístico para a estimativa e a avaliação da segurança estrutural. No Brasil, isto já ocorre com relação às normas de estruturas de concreto armado e de estruturas metálicas. A norma de estruturas de madeira também vai caminhando para esta adoção.

Neste contexto foi desenvolvido o presente trabalho. Em seguida a revisão da bibliografia, foi apresentada uma descrição do equipamento de ensaio utilizado, bem como um estudo a respeito do tipo de corpo de prova a ser empregado na parte experimental da pesquisa. Como fundamentos para a introdução das idéias a respeito dos parâmetros característicos e de cálculo para a madeira foram apresentados capítulos a respeito da distribuição de frequência das resistências e dos módulos de elasticidade à tração, da estimativa dos valores característicos e de cálculo daquelas propriedades. É introduzida, também, a idéia da aceitação e de rejeição de um lote de madeira.

Como contribuição adicionais, são apresentados capítulos abordando a variação da resistência à tração ao longo do comprimento de peças de madeira, e o relacionamento entre as propriedades físicas de resistência e de elasticidade à tração da madeira.

Com base nas conclusões do trabalho, é proposta a redação inicial de item a respeito da tração para o Método Brasileiro de Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras e da Norma Brasileira para o Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira.

TRAÇÃO PARALELA, EM PEÇAS, DE MADEIRA 33

Edição: Curitiba

ABSTRACT

Almost all of the international norms concerning structures design and building adapt, nowadays, the Semi Probabilistic Method to estimate and evaluate the structural reliability. In Brazil, as far as, reinforced concrete structures and steel structures are concerned it is a true fact. Wood structures will receive this treatment, in the future.

In this context, the following dissertation was developed. After the revision of the literature, a description of the used equipment as well as an study about the specimen were presented. As a basis to the introduction on to the ideas concerning the characteristical and design values, chapters were presented abording the frequency distribution of tensile strength, modulus of elasticity, characteristical estimative values and value design of these properties. The idea related to the reception and rejection of a wood lot is also presented.

As an additional contribution, chapters abording the variation of tensile strength through the wood joists, relations between physics and mechanical properties were presented.

Based on the conclusions of this dissertation, an initial essay abording strength is proposed to the revision of the Brazilian Norms and Methods related to the design and building of wood structures.

SUMÁRIO

	Pág.
INTRODUÇÃO.....	1
1 - Revisão Bibliográfica.....	3
2 - Experimentação Preliminar.....	23
3 - Definição da Geometria e das Dimensões do Corpo de Prova.	28
4 - Distribuição de Frequência da Resistência à Tração da Madeira.....	48
5 - Distribuição de Frequência do Módulo de Elasticidade à Tração da Madeira.....	64
6 - Valores Característicos de Propriedades da Madeira à Tração.....	79
7 - Valores de Cálculo para Resistência da Madeira.....	86
8 - Introdução a Idéia da Aceitação ou Rejeição de um Lote de Madeira.....	93
9 - Introdução ao Estudo da Influência da Posição do Corpo de Prova ao Longo de uma Peça na Resistência à Tração.....	99
10 - Uma Tentativa de Estimar o Módulo de Elasticidade à Tração a Partir da Resistência à Tração de Peças de Madeira.	104
11 - Conclusões.....	111

	Pág.
12 - Proposta para a Revisão do MB-26 e da NB-11.....	113
13 - Proposta para a Realização de Trabalhos de Pesquisa em Continuação ao aqui Apresentado.....	118
14 - Anexo I.....	119
15 - Referências Bibliográficas.....	125
16 - Bibliografia.....	129

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das técnicas construtivas de estruturas de madeira tem se acelerado no país na última década, com o emprego cada vez mais difundido deste material para a montagem de estruturas objetivando as mais diversas finalidades.

Entretanto, todo o desenvolvimento atingido, inclusive apoiado pela participação de alguns institutos de pesquisa entre eles o Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira do SET-EESC - USP, não foram ainda incorporados a Norma Brasileira para o Cálculo e a Execução de Estruturas de Madeira, NB-11, cujo texto data de 1951.

A defasagem entre o estágio atual do conhecimento das madeiras e das estruturas de madeiras e as recomendações da NB-11 precipitaram a instalação da Comissão de Revisão da NB-11 pelo Comitê Brasileiro de Construção Civil, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Cabe, aqui comentar o fato de o Método das Tensões Admissíveis, uma das bases do texto da NB-11, já não se constitui em critérios aceitáveis para o cálculo de elementos estruturais. Por este motivo as normas para o cálculo de estruturas de concreto armado e de estruturas metálicas já se baseiam no Método Semi-Probabilístico para a avaliação da segurança estrutural. Este fato deve ocorrer também com relação às estruturas de madeira.

Mais especificamente, um dos itens NB-11 a receber as atenções dos pesquisadores, se refere à tração paralela às fibras. A omissão do MB-26: Método Brasileiro para Ensaios Físicos e Mecânicos de Madeiras a respeito dos ensaios de tração conduziu a NB-11 a adotar os "valores admissíveis da tensão de ruptura a tração" a partir das "tensões de ruptura de corpos de prova à flexão".

Nestas circunstâncias, o trabalho apresentado Tração em Peças de Madeira visa gerar subsídios para permitir a continuidade das discussões sobre o tema, bem como definir propostas para:

- . o novo texto do MB-26 e
- . o novo texto da NB-11

nos itens referentes à metodologia do ensaio de tração e do dimensionamento de elementos estruturais de madeira submetidos à tra -

ção, respectivamente.

Outras relações entre propriedades físicas, de resistência e de elasticidade da madeira foram discutidas e as conclusões do trabalho efetivamente se constituirão em tópicos de relevante importância para ampliação do conhecimento da madeira como um dos materiais mais indicados para o emprego em estruturas.

1 - REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

1.1 - INTRODUÇÃO

1.1.1 - Generalidades

A revisão bibliográfica apresentada a seguir foi dividida em alguns itens para proporcionar mais clareza à sequência de assuntos, todos relacionados com o comportamento da madeira quando submetida a esforços de tração paralela às suas fibras.

Os itens referidos são:

. Composição da Madeira - onde são definidos os elementos anatômicos básicos da madeira, bem como é dado um resumo do processo envolvendo a formação da madeira.

. Algumas Considerações a Respeito do Comportamento da Madeira à Tração - neste item são apresentadas as informações importantes, obtidas através da experiência de diversos pesquisadores, a respeito do comportamento da madeira à tração, em pequenos corpos de prova e em peças de dimensões estruturais.

. Fatores que Influem na Resistência da Madeira à Tração - foram agrupadas, neste item, as informações de diversos autores em relação a alguns dos fatores de maior influência na resistência da madeira à tração.

. A Tração em Peças de Madeira Segundo Alguns Métodos e Normas - foram abordadas, neste item, diversas recomendações sugeridas nos textos de alguns dos métodos de ensaio e das normas para o dimensionamento das peças tracionadas de madeira.

1.1.2 - A Tração

Pode-se, em linhas gerais, definir a solicitação "tração" da maneira a seguir. Quando, ao ser aplicado um esforço em um corpo de determinado material, ocorrer alongamento do mesmo na direção do esforço, diz-se que este corpo está submetido à tração. Considerando uma certa seção, define-se tensão como sendo forças internas por unidade de área na seção, em oposição ao esforço aplicado.

Por meio de experiências, Hooke (1678) estabeleceu que,

para determinados materiais, até uma certa intensidade do esforço, o alongamento da barra tracionada é proporcional ao esforço aplicado. Nascia, assim, a idéia do módulo de elasticidade que, com algumas considerações adicionais, permanece aceitável até hoje(1).

No presente trabalho, serão abordados aspectos referentes à tensão de tração e ao módulo de elasticidade na tração paralela às fibras da madeira. Deste ponto em diante a referida solicitação será simplesmente denominada de tração.

1.2 - COMPOSIÇÃO DA MADEIRA

A madeira é um material orgânico de origem vegetal. Matéria prima praticamente inesgotável, é encontrada em todo o mundo em contínua formação sob a forma de árvores, em florestas naturais ou em reflorestamentos.

As partes básicas de uma árvore são:

. Copa - é a parte da árvore onde se encontram os ramos, folhas, flores e frutos(2).

. Tronco - é a parte da árvore de maior interesse sob a ótica da engenharia e para estudo anatômico, visto ser a região de onde se obtém a madeira. Tem a função de sustentação da copa e condução da seiva, sendo subdividido em:

- Medula - é um tecido primário, contínuo, localizado na região central do tronco(3).

- Cerne - composto pelas camadas mais antigas, tende a armazenar resinas, gomas, óleos, taninos e corantes, sendo mecanicamente mais resistente e menos susceptível ao ataque de micro-organismos e insetos(4).

- Alburno - composto das camadas externas, mais novas, responsáveis pela condução ascendente de seiva, mais claras, menos densas, e geralmente menos resistentes mecanicamente e ao ataque de micro-organismos e insetos(5).

- Câmbio - é uma camada microscópica de tecido meristemático entre o alburno e a casca; suas células se reproduzem, algumas mantendo seu caráter meristemático, outras se modificando e formando tecido permanente, regenerando a casca ou formando a madeira(6).

- Casca - é constituída de uma camada fina, fisiologicamente ativa, adjacente ao câmbio, de cor clara e uma camada externa, inerte, geralmente escura, cuja principal função é proteger o câmbio e evitar perda d'água(7).

. Sistema Radicular - é constituído de um sistema de raízes que absorvem água e sais minerais e que sustentam e apoiam o vegetal no solo(8).

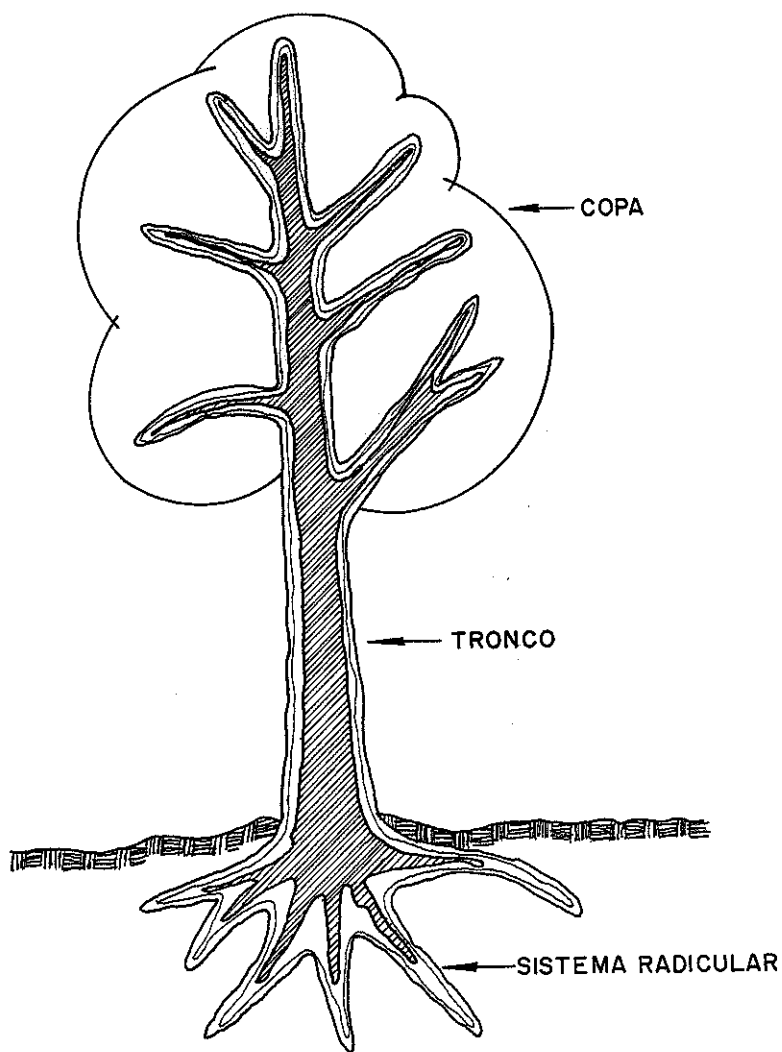


Figura 1.1 - Esboço de uma Árvore

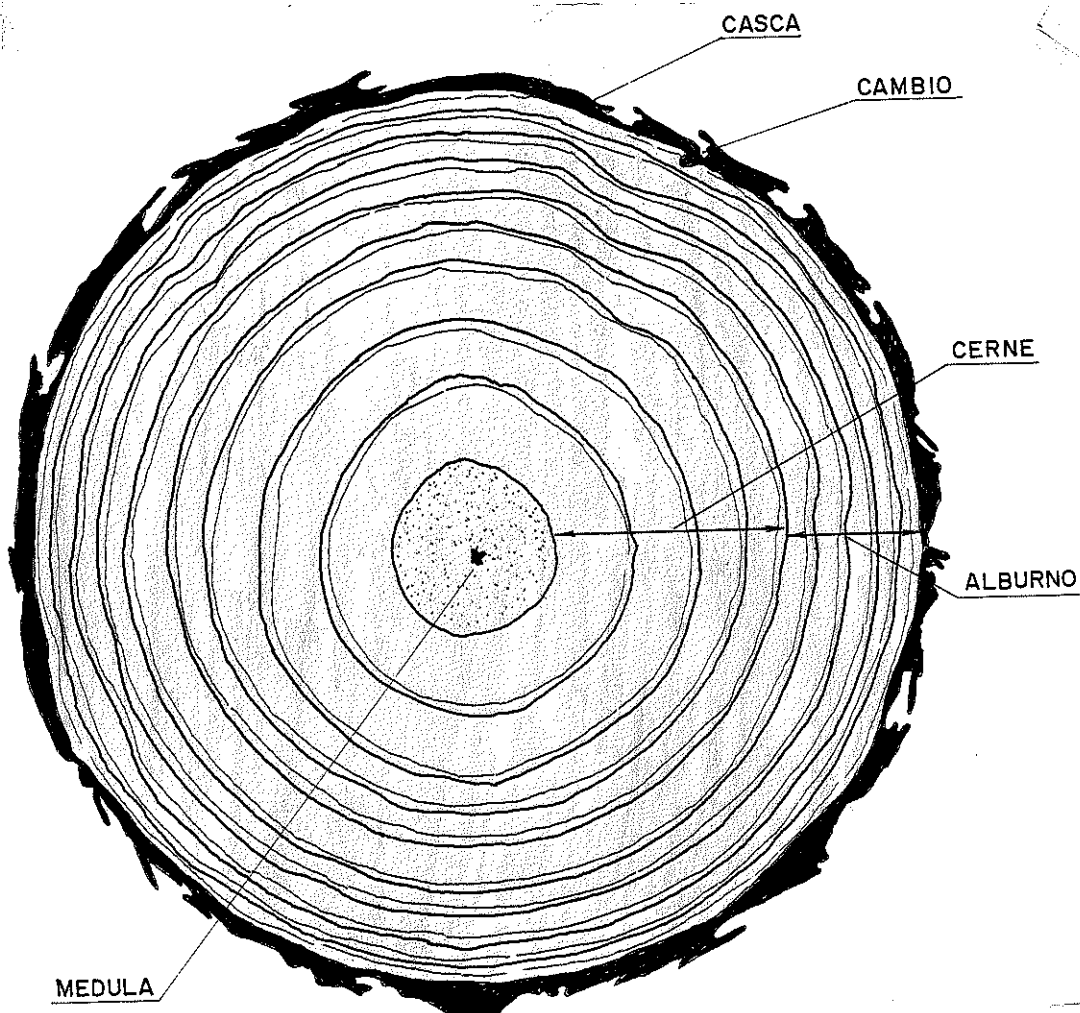


Figura 1.2 - Secção Transversal de um Tronco de Árvore

A nível anatômico, a madeira é constituída principalmente por células de formato alongado, com vazios nos espaços interiores. De acordo com a classificação botânica da árvore, os elementos anatômicos (microscópicos) são basicamente os seguintes(9).

- . Árvores do Grupo das Gimnospermas (coníferas)

- Traqueídes - são constituídos por células alongadas com extremidades afiladas e fechadas no início de sua formação. Os traqueídes têm como uma de suas principais funções, a de resistir às solicitações mecânicas.

- Raios Medulares - Células alongadas, de diâmetro bem maior que os traqueídes; posicionam-se radialmente, sendo orientadas da periferia ao centro do lenho.

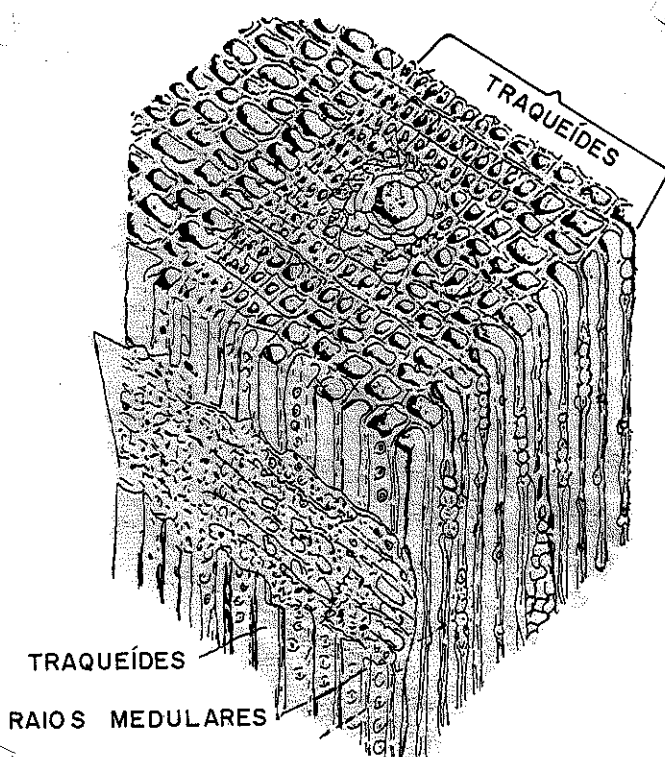


Figura 1.3 - Elementos Anatômicos de uma Conífera

. Árvores do Grupo das Angiospermas (Dicotiledôneas)

- Vasos - são constituídos por células alongadas, fechadas no início de sua formação e com posterior dissolução das paredes formando um duto contínuo. Em cortes transversais do tronco, aparecem como se fossem poros, com grande espaço vazio interno.

- Fibras - são longas, de paredes relativamente grossas, apresentam restrito espaço vazio interno. Têm basicamente a função de resistir às solicitações mecânicas.

- Raios medulares - têm características anatômicas e funcionais idênticas aos citados anteriormente.

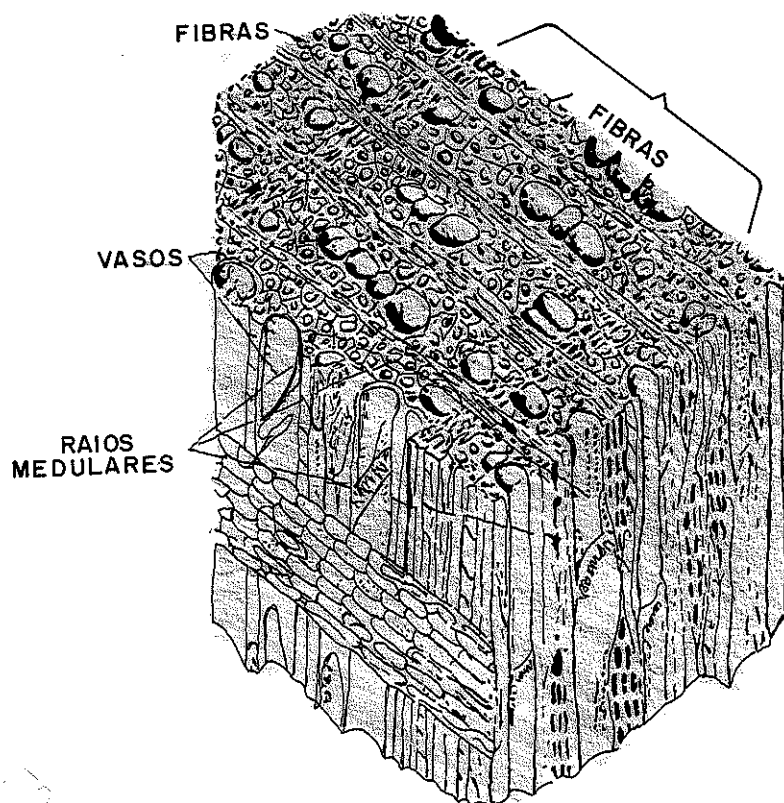


Figura 1.4 - Elementos Anatômicos de uma Dicotiledônea

Como as propriedades de resistência e de elasticidade da madeira se relacionam estreitamente com os aspectos anatômicos do material, é necessário fixar bem as informações básicas a respeito da formação da madeira.

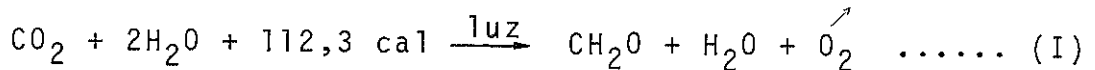
Sob o ponto de vista químico, a madeira é formada essencialmente por:

- . carbono - 50%
- . oxigênio - 43%
- . hidrogênio - 6,1%
- . outros - 0,9%

com parte de C, O e H obtida pela árvore através da fotossíntese realizada nas folhas e parte proveniente do solo através do sistema radicular.

Para a ocorrência da fotossíntese são necessários a presença da clorofila existente nas folhas, de gás carbônico existente no ar, de uma intensidade luminosa (na maior parte dos casos a luz solar) e de água obtida pelo sistema radicular.

A equação básica da fotossíntese na sua forma final é a seguinte (10).



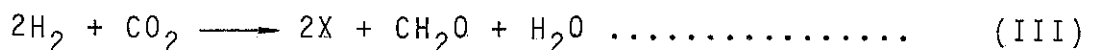
As 112,3 cal necessárias para a reação se constituem na energia armazenada pela planta por meio da assimilação do carbono (em geral é a energia solar).

A reação básica da fotossíntese pode ser descrita em duas etapas (11).

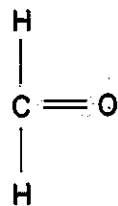
. Etapa Fotoquímica - nessa etapa a presença de luz só é fundamental para fornecer a energia necessária à ocorrência da fotólise da água. Existe a absorção da energia luminosa, com a conseqüente quebra das moléculas de água. Ao se quebrarem, as moléculas de água liberam oxigênio enquanto o hidrogênio se liga a uma substância intermediária ainda não conhecida, que pode ser chamada de substância X.



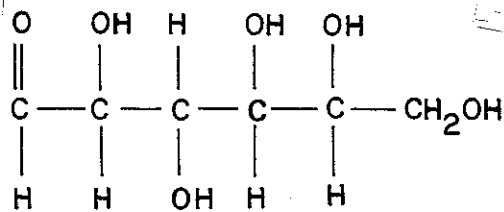
. Etapa Puramente Química - nesta etapa, a presença da luz já perde a sua importância, preponderando a existência de carbono. A substância X libera o hidrogênio que irá reduzir o CO_2 e libertar H_2O . Após essa etapa, a substância X está disponível para novamente ser aproveitada em outra etapa fotoquímica.



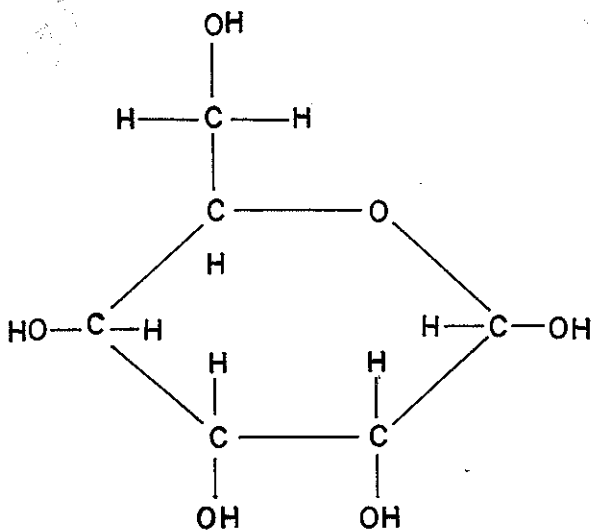
A soma das equações (II) e (III) reproduz a equação (I) que representa a reação que dá origem ao monossacarídeo CH_2O .



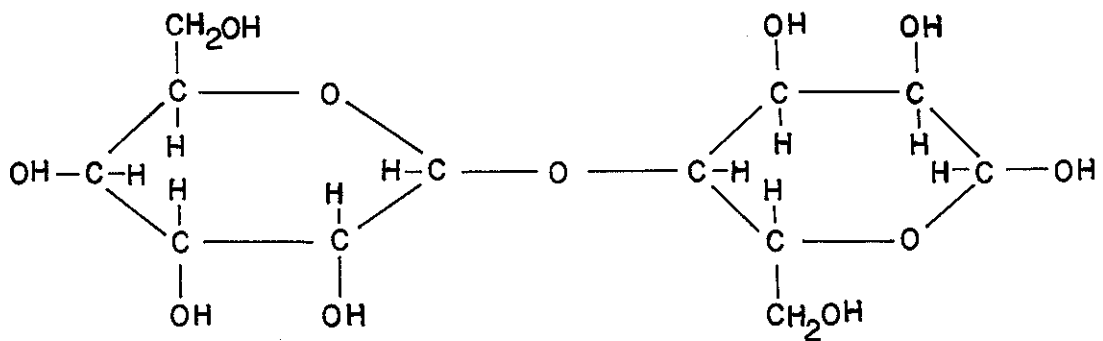
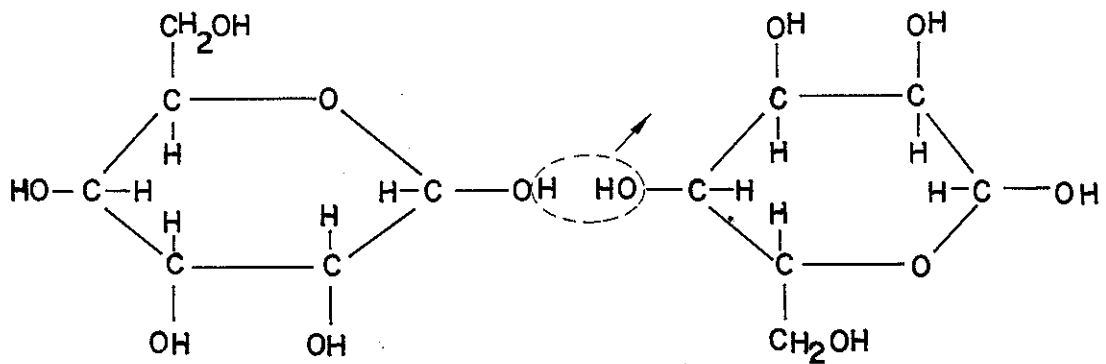
Esses monossacarídeos agrupam-se formando o polissacarídeo d - glicose:



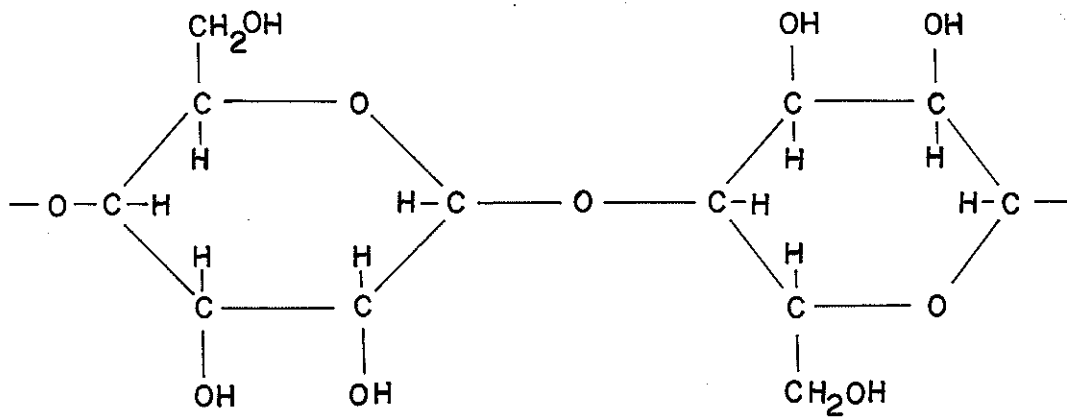
As moléculas da d - glicose arranjam-se em forma de anel formando a β - d - glicose:



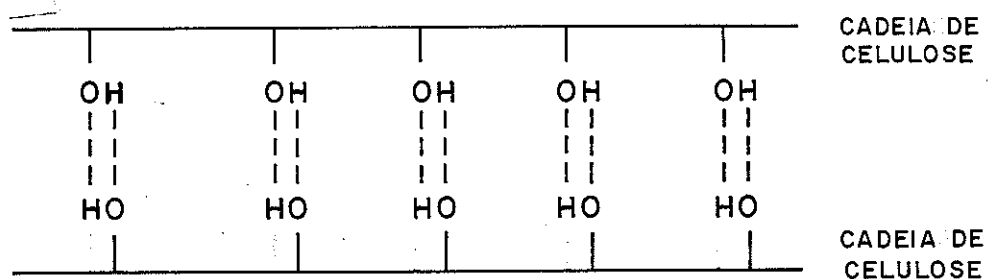
Duas a duas, as moléculas de β - d - glicose unem-se perdendo uma molécula de água e transformando-se em glicose - D - anidra:



A glicose - D - anida perde uma molécula de água ficando instável e formando um polímero com alto grau de polimerização, originando a unidade básica da celulose.



Unindo-se várias unidades básicas de celulose, obtem-se uma cadeia de celulose. Essas cadeias unem-se lateralmente através das ligações por pontes de hidrogênio.



Essa é a descrição básica da formação das cadeias de celulose, um dos compostos mais importantes que compõem a madeira.

Uma outra substância importante na madeira é a lignina que, segundo Hellmeister, "... é uma substância orgânica de difícil identificação, pois é conhecida apenas na forma de material quimicamente removido da madeira e por isso mesmo alterado. Há evidência entretanto de que a protolignina - a lignina como se encontra na madeira, não é uma única substância, mas um grupo de compostos semelhantes. A protolignina é conhecida como um polímero tridimensional, com a fenil propana como unidade principal; tem estrutura amorfa, não identificável por difração de raios X, é termoplástica e muito dura, introduzindo notável rigidez às paredes das células de que faz parte"(12).

1.3 - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO COMPORTAMENTO DA MADEIRA À TRAÇÃO

1.3.1 - Em pequenos corpos de prova

A literatura internacional relacionada com o comportamento da madeira submetida a esforços de tração, com resultados obtidos em pequenos corpos de prova, não é muito farta e, em alguns casos, é aparentemente contraditória.

Kollmann (13), Timoshenko (14) e Hellmeister (15) estão entre os autores que apresentam maior quantidade de informações sobre a tração em pequenos corpos de prova de madeira.

Entre os primeiros registros a respeito de ensaios de tração em corpos de prova de madeira figuram os realizados por Mariotte (1620 - 1654) para comparação de resultados com os obtidos no ensaio de uma viga de madeira em balanço (16).

A partir da análise dos resultados dos primeiros ensaios

ã tração em corpos de prova, já se pode confirmar a idéia que a madeira apresenta sua maior capacidade de resistência quando submetida a esforços de tração.

Com base nessas conclusões, pode-se esperar que a resistência a tração ao longo de uma só fibra de madeira seja muito alta. Segundo Kollmann, pode variar entre 2.000 e 13.000 kgf/cm² (17).

Em 1930, Meyer e Mark realizaram cálculos partindo do modelo da estrutura da celulose e, pela separação química da ligação orgânica, avaliaram a resistência de um bastão de celulose em 80.000 kgf/cm² (18).

Klauditz (1945) determinou para fibras com paredes espessas, sem vazio interno, uma resistência a tração de 4.630 kgf/cm² (19).

Jungh (1945) determinou para traqueídes de *Pinus marcusii* uma resistência de 5.780 kgf/cm² e 6.920 kgf/cm² (20).

Mark (1952) estimou que uma amostra constituída unicamente por uma cadeia de "celulose", sem interrupção, apresenta resistência de 10.000 kgf/cm² a 400.000 kgf/cm². Na prática, isso não ocorre, pois as fibras de celulose pura não são compostas de moléculas intermináveis e a região sem interrupção tem somente um comprimento de aproximadamente 500Å (21).

Jayne (1959, 1960) usando um sistema elétrico - mecânico para determinação de força e deformação, determinou o módulo de Young e a resistência a tração de dez espécies de coníferas, constatando não somente uma grande diferença entre traqueídes de espécies diferentes, mas também regularidade entre os traqueídes da madeira formada no verão e a madeira formada no inverno (22).

Hellmeister (1966) estudou o comportamento de corpos de prova de Douglas-fir quando submetidos a tração e apresentou várias sugestões, entre elas a da conveniência da utilização de um corpo de prova para ensaio, diferente dos apresentados nas normas internacionais (23).

1.3.2 - Em peças de dimensões estruturais

Com o aumento do interesse no conhecimento do desempenho de elementos estruturais de madeira submetidos a esforços de tração na década de 60 a 70, diversos pesquisadores começaram a realizar ensaios em peças de dimensões estruturais.

Nemeth (1965) apresenta dados preliminares sobre a relação existente entre a resistência última à tração e o módulo de elasticidade em ensaios de peças de seção transversal $(5,08 \times 10,16)$ cm^2 e $(5,08 \times 20,32)$ cm^2 (24).

Doyle e Markwardt (1966) realizaram ensaios em peças de madeira de seção transversal $(5,08 \times 10,16)$ cm^2 , $(5,08 \times 15,24)$ cm^2 e $(5,08 \times 20,32)$ cm^2 com a finalidade de relacionar (25):

. A resistência última à tração e o módulo de elasticidade à tração.

. A resistência última à tração e o módulo de elasticidade à flexão no plano de menor inércia da peça ensaiada.

. O módulo de elasticidade à tração e a densidade básica (Specific gravity).

. A resistência última à tração e a densidade básica.

. O módulo de elasticidade à tração e o módulo de elasticidade à flexão no plano de menor inércia da peça ensaiada.

As peças foram classificadas antes da realização dos ensaios e os resultados obtidos mostraram o efeito da classificação nas relações entre as diversas propriedades da madeira. Foram obtidas relações lineares entre os itens anteriormente citados. Houve uma exceção a da relação entre a resistência última à tração e a densidade básica.

Orosz (1969) (26), também citado por Gerhards (27), apresentou suas conclusões sobre a previsão da resistência à tração de peças de madeira através do módulo de elasticidade à flexão bem como da resistência à flexão. Realizou apenas ensaios de flexão utilizando corpos de prova de $(5,08 \times 10,16)$ cm^2 e $(5,08 \times 20,32)$ cm^2 com vão de 121,92 cm e carga nos terços de vão; e vão de 457,20 cm com cargas nos quartos de vão, determinando:

. ES = módulo de elasticidade para o vão de 121,92 cm.

. ESF = módulo de elasticidade nas proximidades de falhas (nós) para o vão de 121,92 cm.

. ESI = módulo de elasticidade nas proximidades do ponto onde existe a maior probabilidade de ocorrer uma falha (nó), para vão de 121,92 cm.

. ESM = mínimo módulo de elasticidade para vão de 121,92 cm podendo ou não ser obtido nas proximidades de falhas (nó).

. EL = módulo de elasticidade medido em relação ao plano de menor inércia, para vão de 457,20 cm.

. SR = razão de resistência estimada segundo ASTM D 245-647.

Relacionando os resultados obtidos, o autor concluiu que o melhor indicador da resistência à tração em uma peça de madeira é o ES.

Galligan, Garhards e Ethinton (1977) apresentam um resumo histórico da evolução do estudo à tração em peças estruturais de madeira (28). Relatam que, até aproximadamente 1965, as tensões admissíveis de tração para projeto eram consideradas iguais às da flexão. Com o aumento do interesse pelo conhecimento do comportamento à tração de peças de madeira, foram incrementados os estudos da tração em peças de dimensões estruturais. Sugeriram uma redução nas tensões de tração para projeto, em função das dimensões e da classificação mecânica das peças.

1.4 - FATORES QUE INFLUEM NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA MADEIRA

1.4.1 - Teor de umidade

O teor de umidade é um dos fatores que, de uma maneira geral, maior influência exerce sobre a resistência de peças de madeira. Entretanto, a influência do teor de umidade na resistência à tração de peças de madeira ainda gera controvérsias entre os pesquisadores.

Wangaard, em seu trabalho sobre as propriedades mecânicas da madeira, conclui que aparentemente a natureza da ruptura na tração não é efetuada pelo teor de umidade ou, no mínimo, não tanto quanto os outros valores de resistência (29).

Giordano (1947) (30) e Kollmann & Coté (31) dizem que o aumento do teor de umidade em uma peça de madeira conduz a um decréscimo da resistência à tração. Sugerem, para cálculos práticos, uma diminuição de 3% na tensão de ruptura para cada 1% de acréscimo do teor de umidade.

Hellmeister (1966) apresentou resultados de ensaios de corpos de prova de Douglas-fir mostrando que até o ponto de saturação das fibras ($\approx 33\%$) a resistência à tração diminui com o aumen-

to do teor de umidade e que, acima desse ponto, essa resistência não sofre alteração (32).

1.4.2 - Densidade

Outro fator de importância no estudo das propriedades da madeira está no conhecimento da relação entre a resistência e a densidade.

Giordano (1947) considera que a resistência a tração cresce com a densidade, para a maior parte das madeiras, segundo uma Lei Linear, e para outra, "segundo curva côncava do lado do eixo das densidades" (33).

Kollmann & Coté, citando Ylinen (1942), apresentam uma relação linear entre a resistência da madeira à tração e a densidade (34).

Lewis, nas conclusões de seus estudos realizados no Forest Products Laboratory, apresenta uma curva de 30 grau para representar a relação existente entre a resistência à tração e a densidade. Os ensaios foram realizados em corpos de prova de Douglas-fir e de White - Oak e as curvas obtidas estão apresentadas na figura 1.5 (35).

Hellmeister (1966) determina uma relação linear entre a resistência à tração e a densidade para ensaios realizados em corpos de prova de Douglas-fir (36).

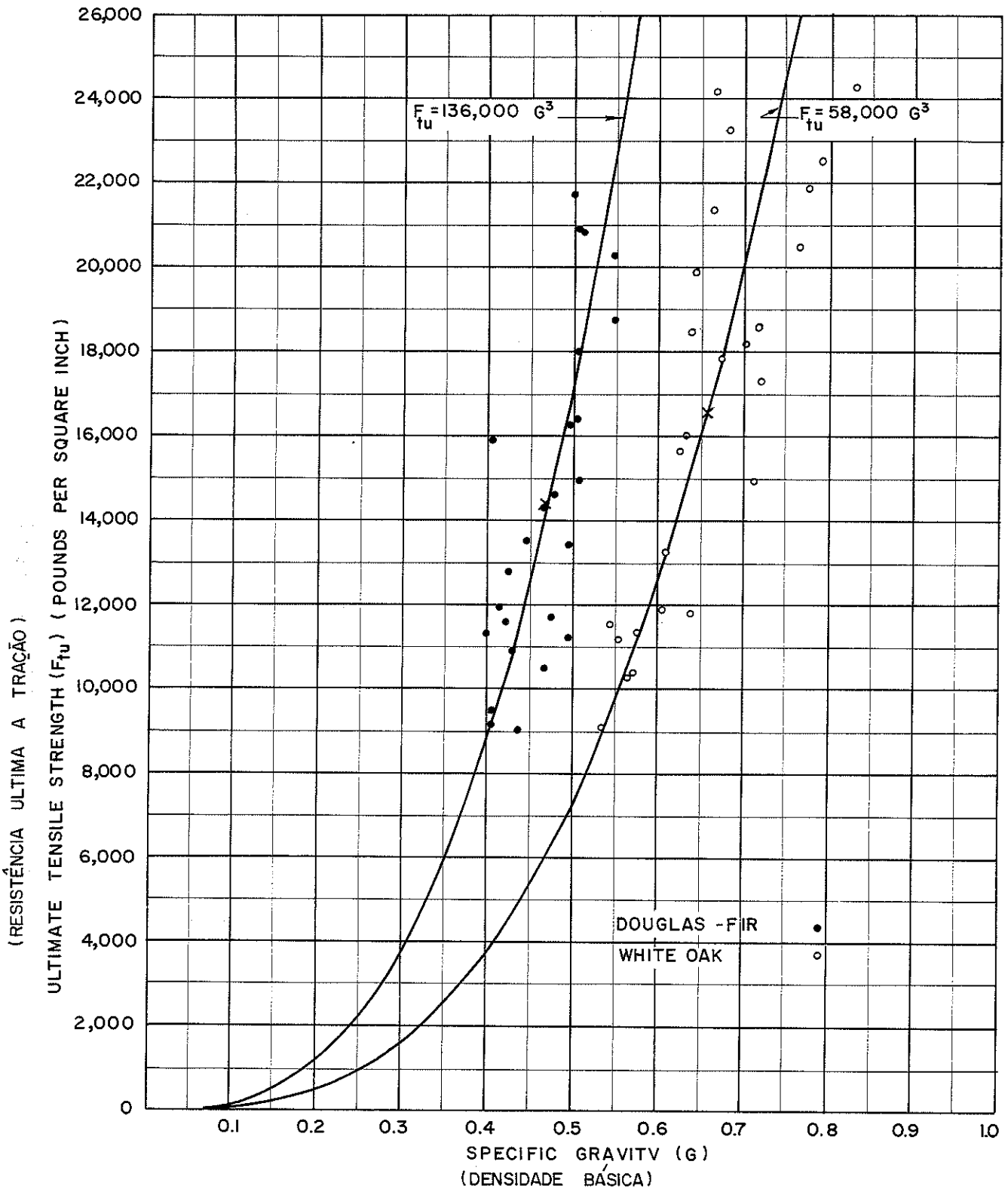


Figura 1.5 - Resistência Última à Tração x Densidade Básica

1.5 - A TRAÇÃO EM PEÇAS DE MADEIRA SEGUNDO ALGUNS MÉTODOS E NORMAS

1.5.1 - Método Brasileiro - Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras - MB-26 (1940)

O MB-26 é omissivo em relação a ensaios para determinação da resistência da madeira à tração.

1.5.2 - Norma Brasileira - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira - NB-11 (1951)

A NB-11, no item 53, recomenda que as tensões de tração em peças solicitadas por força axial não deverão ultrapassar o seguinte valor:

$$\bar{\sigma}_t = 0,15 \sigma_F$$

$\bar{\sigma}_t$ = tensão admissível à tração

σ_F = tensão média de ruptura à flexão

1.5.3 - American Society for Testing and Materials - ASTM (1981) - Norma Americana

1.5.3.1 - D-143

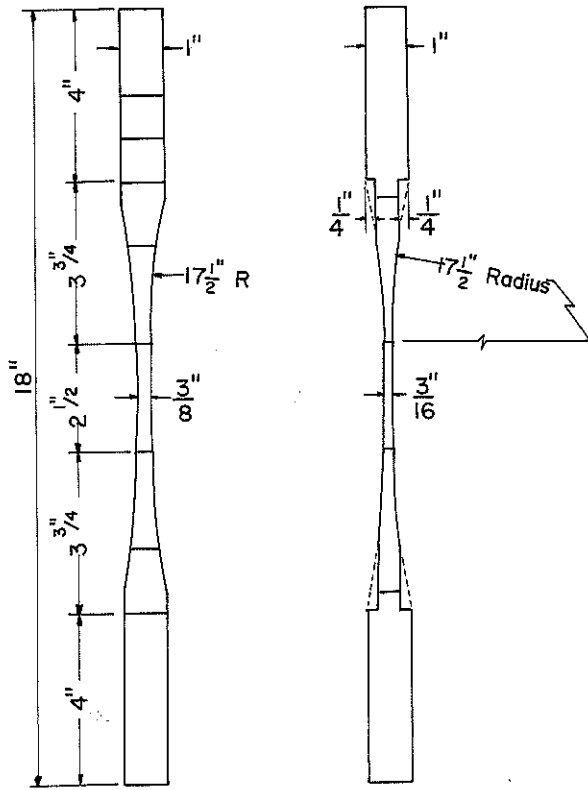
Trata dos ensaios em pequenos corpos de prova de madeira. Nos itens 98 a 102 dessa especificação são recomendados:

. Tamanho do corpo de prova; figura 1.6.

. Velocidade de deformação no ensaio = 1 mm/minuto.

. Deformações devem ser lidas até a ruptura, com precisão de 0,002 mm.

. O ensaio deve fornecer: a carga máxima, a deformação com carga máxima, a carga no Limite de Proporcionalidade e a deformação no Limite de Proporcionalidade.



in	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	1	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{3}{4}$	$17\frac{1}{2}$	18
cm	0.45	0.6	0.9	2.5	6	9.5	44	45.7

Figura 1.6 - Dimensões de Corpos de Prova - ASTM D-143

1.5.3.2 - D-198

Trata de ensaios em peças de madeira de dimensões estruturais.

Nos itens 28 a 36 dessa especificação são feitas, entre outras, as seguintes recomendações:

- . A peça deve ter espessura maior que 2,54 cm.
- . As garras devem ser cuidadas a fim de se evitar o escorregamento e o esmagamento da madeira.
- . Deve se determinar o módulo de elasticidade com extensômetros colocados em pontos pré-determinados.
- . O material deve ser sólido ou laminado.
- . Carga máxima deve ser atingida em torno dos 10 minutos, mas nunca antes de 5 minutos ou após 20 minutos de ensaio.
- . Determina-se: tensão no limite de proporcionalidade, tensão na ruptura e módulo de elasticidade.

1.5.4 - British Standard Methods (BS-5820 (1979)) - Norma Inglesa

Essa norma trata da determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira em peças de tamanhos estruturais.

Os itens 15 e 16 contêm as recomendações para a determinação do módulo de elasticidade à tração e da resistência à tração. Essas recomendações são basicamente as seguintes:

- . A peça deve ter uma secção transversal maciça e um comprimento de, no mínimo, nove vezes a maior dimensão da secção.
- . O equipamento de aplicação de carga deve ser capaz de medir as cargas com precisão de 1% ou melhor.
- . Dois extensômetros devem ser utilizados para medir deformações.
- . A carga deve ser aplicada de maneira contínua e a carga máxima deve ser atingida no tempo de 300 ± 120 s.
- . O módulo de elasticidade à tração deve ser calculado por:

$$E_t = \frac{\Delta_F \ell_1}{A \Delta w}$$

onde:

E_t = módulo de elasticidade à tração em N/mm^2 .

Δ_F = acréscimo de carga em N

ℓ_1 = comprimento do extensômetro em mm.

A = área da secção transversal em mm^2 .

Δw = deformação correspondente ao acréscimo de carga, Δ_F , em mm.

. A resistência à tração é calculada por:

$$f_t = \frac{F_{\max}}{A}$$

onde:

f_t = resistência à tração em N/mm^2

F_{\max} = carga máxima em N

1.5.5 - Deustsche Normen (Norma Alemã)

A norma alemã DIN 52188 (1979) trata dos ensaios de corpos de prova de madeira e, basicamente, faz as seguintes recomendações:

. Tipo de corpo de prova; figura 1.7.

. Velocidade de deformação no ensaio = 0,1 mm por minuto.

. Resistência à tração é determinada por:

$$\beta_z = \frac{F_{\max}}{a \cdot b}$$

onde:

β_z = resistência à tração em N/mm^2 .

F_{\max} = carga máxima em N

a, b = dimensões da secção transversal em mm

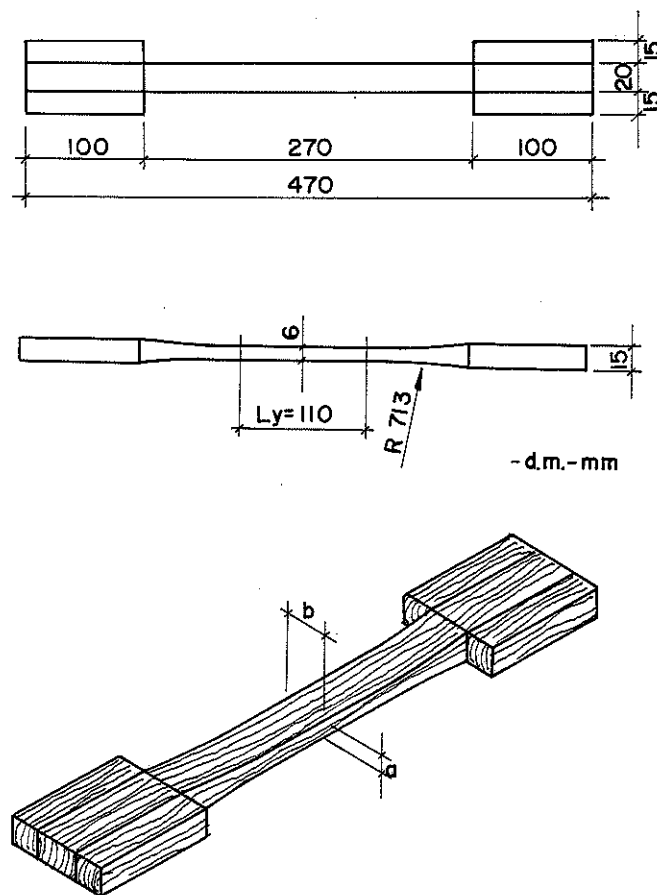


Figura 1.7 - Dimensões de Corpo de Prova
DIN - 52188

1.5.6 - L'Association Française de Normalisation (AFNOR-1942) - Normas Francesas

A AFNOR é omissa em relação aos ensaios de tração, somente apresentando recomendações em relação a ensaios de tração perpendicular às fibras.

2 - EXPERIMENTAÇÃO PRELIMINAR

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O trabalho experimental descrito a partir do capítulo 3 desta Dissertação foi realizado na Máquina Universal de Ensaio AMSLER de 25 toneladas/força de capacidade de carga, do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A referida máquina é apresentada na figura 2.1, mostrada a seguir:

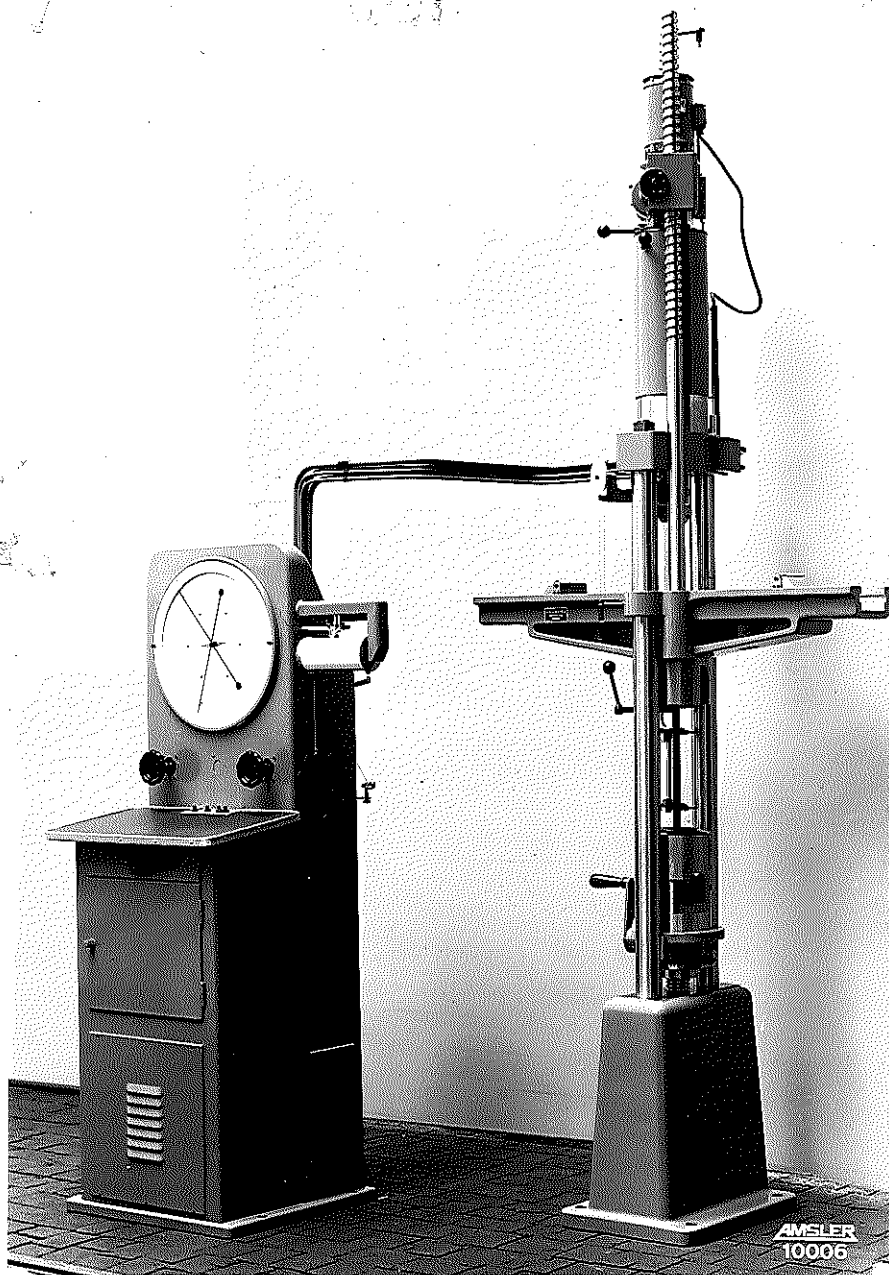


Figura 2.1 - Máquina de Ensaio AMSLER

Esta máquina consta "de um dinamômetro destinado a medir os esforços impostos nos experimentos, uma bomba para injetar óleo na máquina acionando a pressão e a máquina propriamente dita, com suas colunas, sua base e seu equipamento móvel" (37).

Um dos aspectos favoráveis relacionados com a utilização deste equipamento é que o mesmo é muito comum nos laboratórios brasileiros de ensaios de materiais. Isto certamente facilitará a realização de ensaios para a determinação de propriedades de resistência e elasticidade à tração de madeiras em todo o país.

2.2 - SISTEMA DE ANCORAGEM

O sistema de ancoragem (ou fixação) dos corpos de prova de tração na Máquina Universal de Ensaios pode ser de dois tipos:

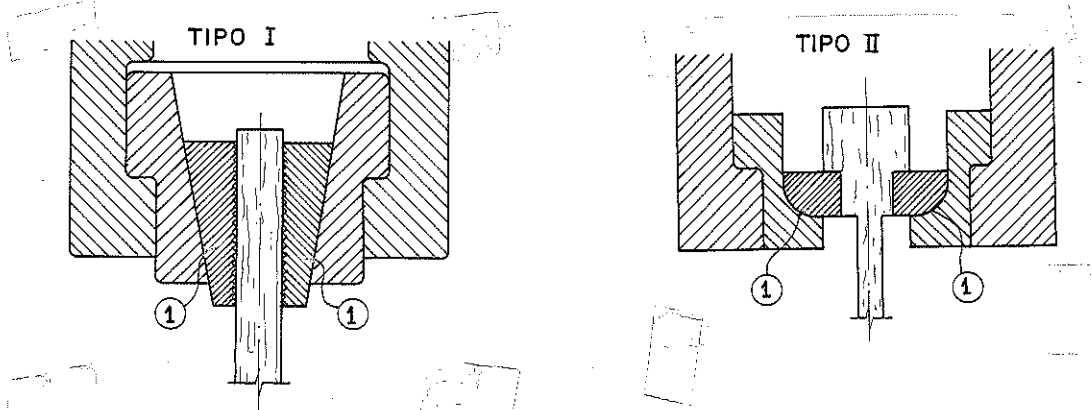


Figura 2.2 - Sistemas de Ancoragem (ou Fixação)

O sistema do tipo I é utilizado para o ensaio de corpos de prova prismáticos e o sistema do tipo II para o ensaio de corpos de prova cilíndricos.

Analisando os sistemas apresentados, observa-se que um atrito elevado nas superfícies de contato denotadas por (1), impedirá a ancoragem adequada dos corpos de prova, podendo ocasionar alguns problemas como: excentricidade na aplicação da carga e escorregamento do corpo de prova.

Para avaliar o desempenho do conjunto corpo de prova-sistema de fixação, foi realizada uma série de ensaios. Com o intuito de reduzir o atrito nas superfícies de contato (1), foram tomadas algumas providências:

- . lixar as superfícies utilizando-se lixas finas

. lixar as superfícies e lubrificá-las com fluido concentrado Molikote A-2.

Os corpos de prova foram retirados de barras de *Pinus oocarpa* e de *Pinus elliottii*. A escolha se justifica pois estas espécies de madeira apresentam baixa resistência às solicitações mecânicas. Este fato poderia, nos ensaios, acentuar a possibilidade da ocorrência do esmagamento na região de fixação. Espécies mais resistentes não permitiriam, tão acentuadamente, a verificação deste aspecto.

2.3 - O ENSAIO

Para esta série de ensaios foi adotado o corpo de prova mostrado na figura 2.3, ensaio com porcentagem de umidade em torno de 15% (madeira seca ao ar). Os ensaios foram realizados com aplicação contínua de carga, até a ruptura, observando-se o comportamento do conjunto e o tipo de ruptura ocorrido.

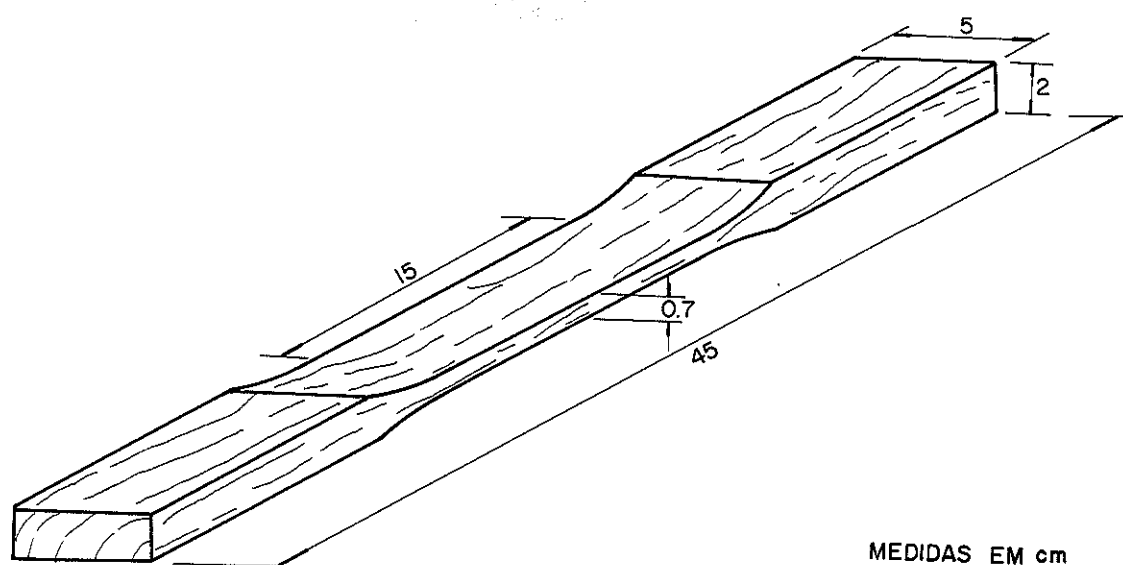


Figura 2.3 - Esquema do Corpo de Prova

De acordo com Coutinho, para o caso em questão, foi adotado o seguinte conceito de ruptura: "carga máxima suportada por uma peça solicitada de maneira geometricamente fixa" (38).

2.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios realizados são apresentados nas tabelas 2.1 e 2.2.

		S E Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA DE RUPTURA (N)	RESISTÊN- CIA (MPa)
		e(mm)	b(mm)			
Pinus oocarpa	1	7,26	49,10	356	22550	63,3
	2	7,72	48,42	374	23400	62,6
	3	5,92	49,22	292	25000	85,6
Pinus elliotti	1	5,60	49,90	280	13250	47,3
	2	6,92	29,92	345	15100	43,8
	3	6,24	49,64	310	14400	46,5

Tabela 2.1 - Superfícies (1) Lixadas

Nestas condições, os corpos de prova apresentaram ruptura na menor seção transversal, com um pequeno escorregamento no sistema de ancoragem.

		S E Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA DE RUPTURA (N)	RESISTÊN- CIA (MPa)
		e(mm)	b(mm)			
Pinus oocarpa	1	5,42	49,12	266	21900	82,3
	2	6,28	48,14	302	23700	78,5
	3	4,42	49,84	220	13900	63,2
Pinus elliotti	1	7,26	48,26	349	14500	41,5
	2	7,24	49,48	358	22600	63,1
	3	6,64	48,84	324	20500	63,3

Tabela 2.2: - Superfícies (1) Lixadas e Lubrificadas com Fluido Concentrado Molykote A-2.

Nestas condições os corpos de prova apresentaram ruptura na menor secção transversal, sem escorregamento aparente no sistema de fixação.

Na continuação, à vista das constatações mencionadas, optou-se pela realização da experimentação com as superfícies (1) do sistema de ancoragem lixadas e lubrificadas com o fluido concentrado Molykote A-2, qualquer que seja o modelo de corpo de prova utilizado.

3 - DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E DAS DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA

3.1 - INTRODUÇÃO

Ao se pensar na realização dos ensaios em corpos de prova de tração, de imediato as atenções se voltaram para o estudo dos tipos de corpos de prova citados nos Métodos de Ensaio e na bibliografia disponível.

O MB-26 da ABNT não se refere a ensaios de tração, levando a NB-11 a adotar que ... "as tensões de tração paralela às fibras em peças solicitadas por força axial, não deverão ultrapassar o seguinte valor:

$$\bar{\sigma}_t = 0,15 \sigma_F''$$

A consulta à literatura disponível conduziu a não muitas referências a respeito dos tipos de corpos de prova para tração, evidentemente compatíveis com o equipamento de ensaio disponível, descrito no capítulo 2. Além desta compatibilidade, os corpos de prova deveriam apresentar algumas características:

- . facilidade de confecção;
- . maior área de seção transversal a ser rompida;
- . não influência, no ensaio, de solicitações diferentes da tração;
- . melhores condições para possibilitar a instalação de dispositivos de medida de deformação, permitindo a determinação do módulo de elasticidade.

Diante das sugestões estudadas, foram escolhidos três tipos de corpos de prova para, depois de uma análise de seu comportamento no ensaio, a definição do mais adequado à vista dos objetivos principais do trabalho desenvolvido.

O corpo de prova denominado CP I foi proposto por Hellmeister e é apresentado com detalhes na figura 3.1 (39).

O corpo de prova denominado CP II, discutido por Kollmann e, até pelo menos 1952, se constituía no corpo de prova recomendado pelos Métodos de Ensaio Alemães, através da DIN 52188 (40). É mos

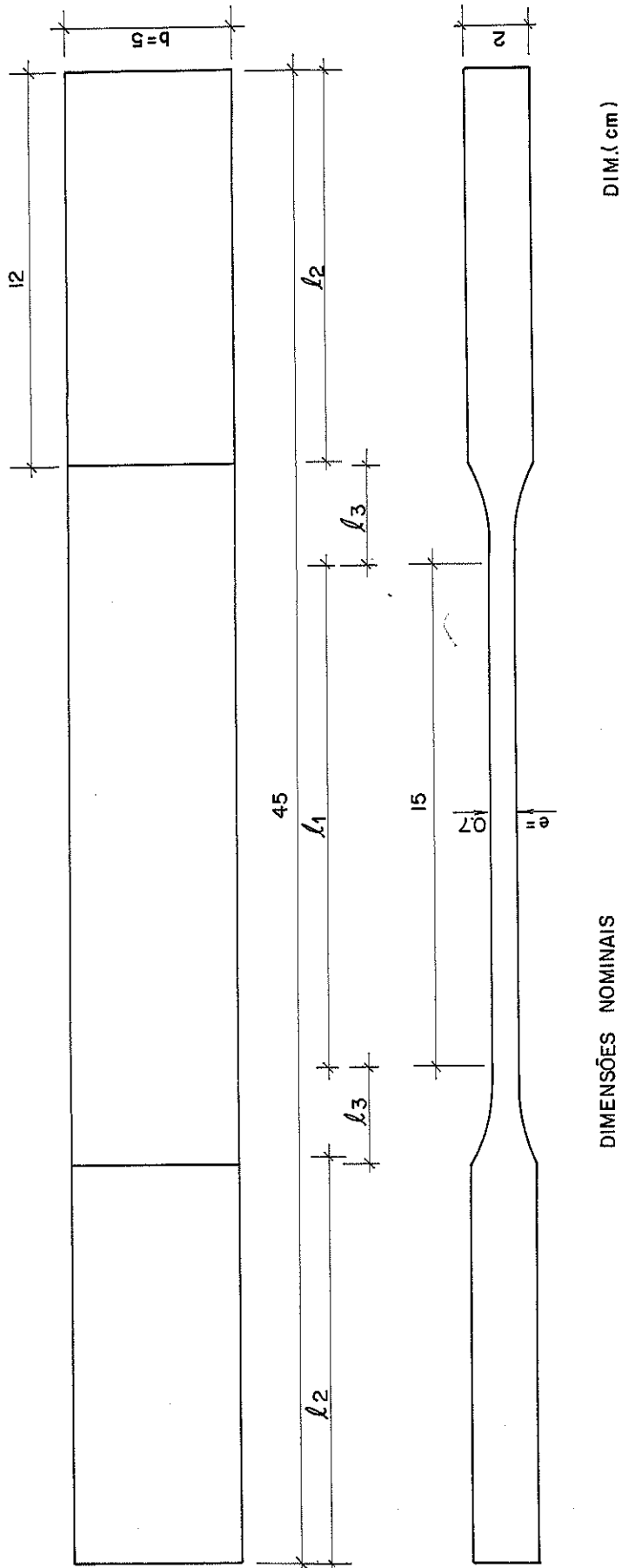


Figura 3.1 - Dimensões do CP I

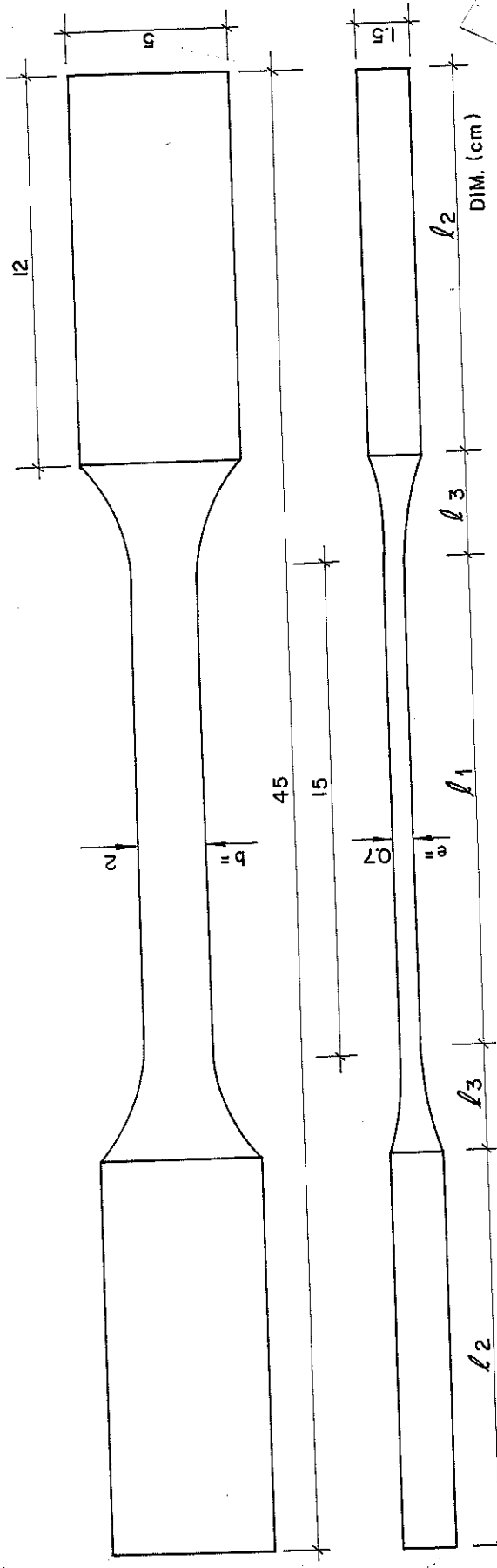


Figura 3.2 - Dimensões do CP II

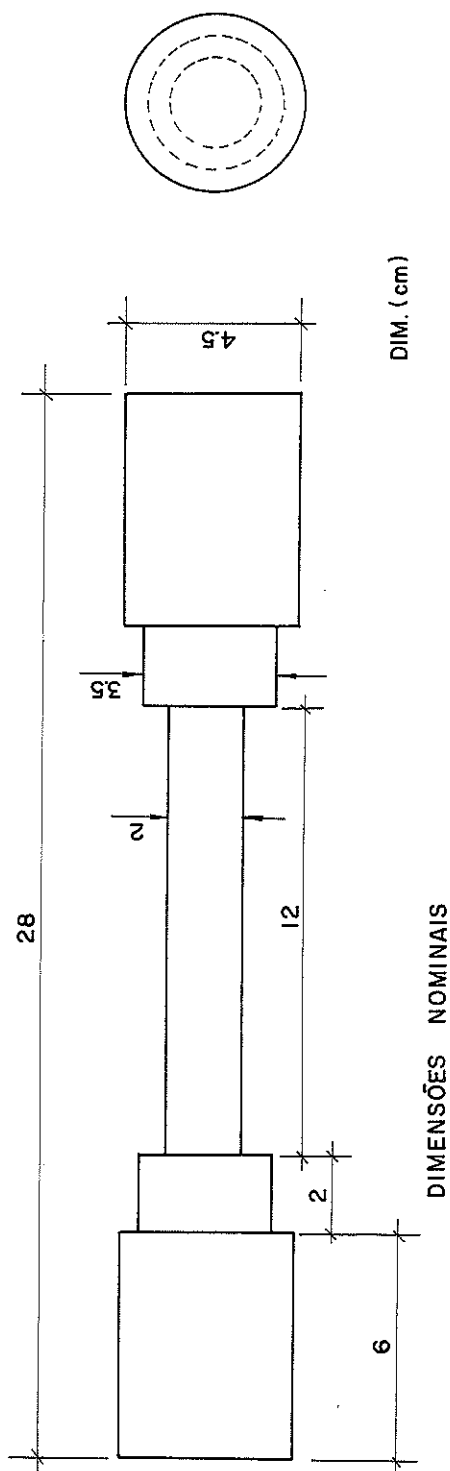


Figura 3.3 - Dimensões do CP III

trado, com detalhes, na figura 3.2. Presentemente a DIN recomenda um corpo de prova aparentemente de confecção mais elaborada e de maiores dificuldades de ensaio, motivos suficientes para não ser aqui escolhido para estudo.

O corpo de prova denominado CP III foi idealizado a partir de diversas discussões e sugestões do autor e dos professores do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira. É apresentado com detalhes na fig. 3.3.

3.2 - OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.2.1 - Obtenção do CP I

Para a obtenção dos corpos de prova deste tipo, inicialmente as peças de madeira foram aparelhadas nas dimensões de $(2 \times 5 \times 45)$ cm³. Com estas dimensões, a peça é colocada no gabarito, cujo esquema é mostrado na figura 3.4, para haver uma redução nas seções transversais, na faixa indicada por l_1 , através de duas operações utilizando a tupia. A fixação dos corpos de prova para o ensaio é feita na faixa indicada por l_2 , que não sofreu alteração de seção. Para reduzir a concentração de tensões, a faixa indicada por l_3 se constitui na zona de transição entre as faixas l_1 e l_2 (figura 3.1).

3.2.2 - Obtenção do CP II

Para a obtenção dos corpos de prova deste tipo, inicialmente as peças de madeira foram aparelhadas nas dimensões de $(1,5 \times 5 \times 45)$ cm³. Com estas dimensões, a peça é colocada no mesmo gabarito, cujo esquema é mostrado na figura 3.4, para haver redução nas seções transversais na faixa indicada por l_1 , através de quatro operações na tupia. A fixação dos corpos de prova para o ensaio é feita na faixa indicada por l_2 , que não sofreu alterações de seção. Para reduzir a concentração de tensões, a faixa indicada por l_3 se constitui na zona de transição entre as faixas l_1 e l_2 (figura 3.2).

3.2.3 - Obtenção do CP III

Para a obtenção dos corpos de prova deste tipo, inicialmente as peças de madeira foram aparelhadas nas dimensões de (5 x 5 x 35) cm³. Com estas dimensões, a peça é torneada até atingir as dimensões nominais indicadas na figura 3.3.

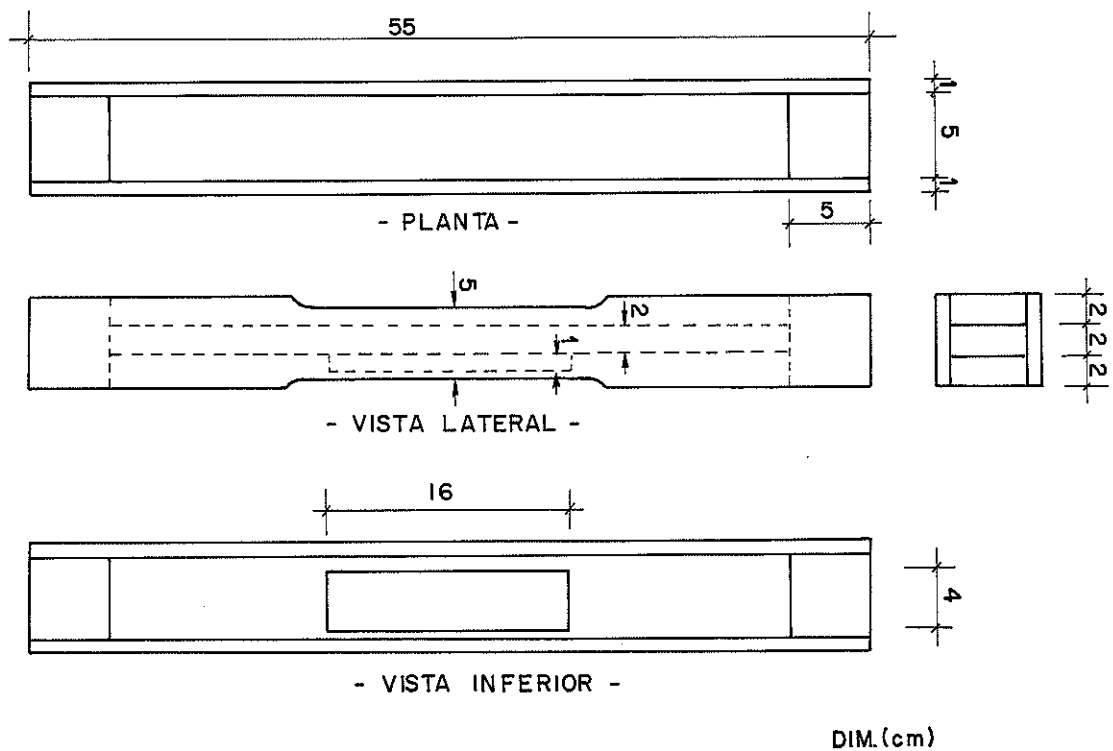


Figura 3.4 - Esquema do Gabarito

3.2.4 - Comentários

Com relação à facilidade de obtenção dos corpos de prova, o CP III pareceu o mais favorável pois:

. permite um controle mais eficiente das dimensões, desde a obtenção da peça básica até as operações no torno.

. o equipamento utilizado para sua obtenção oferece me nos riscos para o operador.

O CP I é de obtenção mais fácil em relação ao CP II, pois necessita duas operações a menos, o que conduz a menores diferen ças entre as dimensões nominais e as dimensões finais dos corpos de prova, figura 3.5.

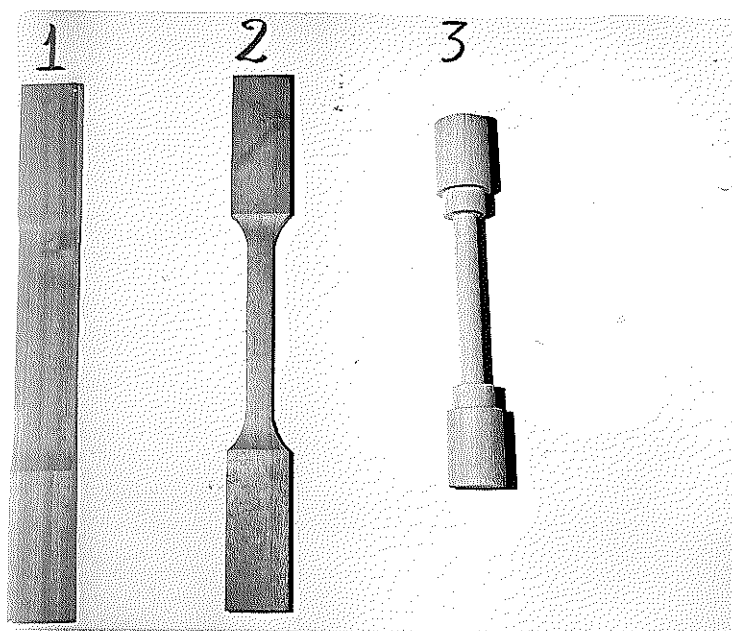


Figura 3.5 - Corpos de Prova nas Dimensões Finais

3.3 - ENSAIOS À TRAÇÃO - 1º CONJUNTO

3.3.1 - Objetivos dos ensaios

Este conjunto de ensaios objetivou a obtenção de parâmetros que pudessem levar à definição do tipo de corpo de prova mais conveniente, entre os três já mencionados, para o ensaio de madeira à tração, considerando o emprego da máquina AMSLER e seu sistema de ancoragem lubrificado com fluido especial Molykote (figura 3.6).

Com o intuito de se observarem possíveis interferências da umidade do corpo de prova no respectivo sistema de ancoragem na máquina, foram conduzidas duas séries de ensaios: uma com madeira seca ao ar (\approx 15% de umidade); outra com madeira em torno do ponto de saturação das fibras (\approx 33% de umidade). Para tal, durante os ensaios, foi mantida rigorosa observação no conjunto máquina - corpo de prova.

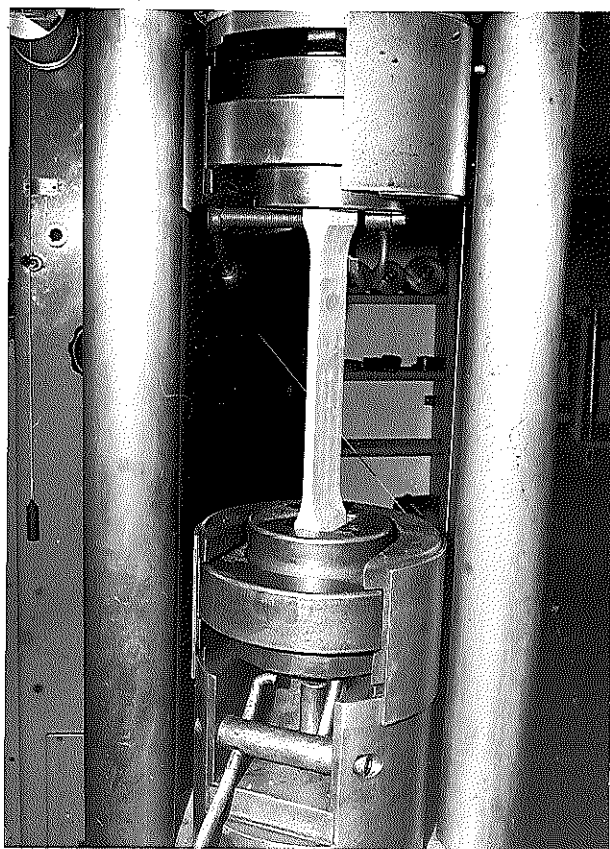


Figura 3.6 - CP I na Máquina de Ensaio

3.3.2 - Escolha da Espécie de Madeira

Nesta fase da experimentação, foi escolhida a espécie *Hymenaea stilbocarpa* (Jatobá), por apresentar alta resistência, bom desempenho na aplicação estrutural e suficiente homogeneidade ao longo do comprimento, em peças serradas.

3.3.3 - Retirada dos corpos de prova

A aquisição das peças serradas (caibros e vigotas) de Jatobá se deu nas serrarias de São Carlos, tendo sido preferidas peças com a seguinte configuração de fibras:

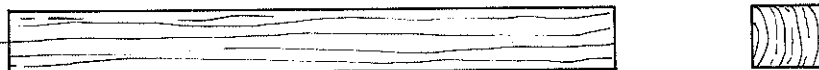


Figura 3.7 - Posição das Fibras

Do lote de vigas e caibros adquiridos, foram retirados sete, aleatoriamente. A partir destes, foram confeccionados dois corpos de prova de cada um dos tipos a ensaiar. A posição de retirada foi a seguinte:

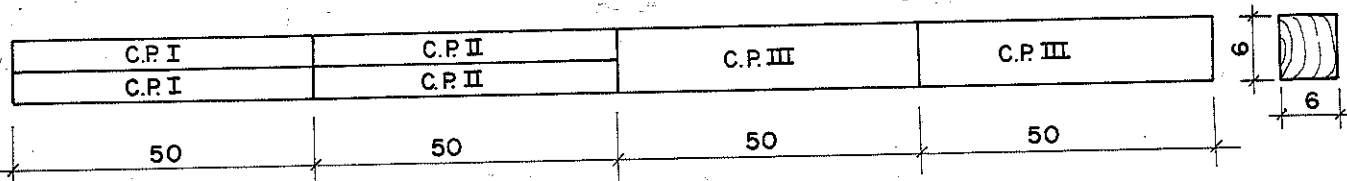


Figura 3.8 - Posição de Retirada dos Corpos de Prova

3.3.4 - Resultados obtidos

As tabelas a seguir apresentam para cada tipo de corpo de prova: as dimensões da seção central dos corpos de prova, medidas com um paquímetro, a carga de ruptura e o tipo de ruptura ocorrido, cuja designação pode ser:

- 1- ruptura do corpo de prova por tração;
- 2- ruptura do corpo de prova por torção com tração;
- 3- ruptura por cisalhamento na direção de fibras inclinadas (não paralelas à direção da solicitação);
- 4- ruptura por cisalhamento na cabeça do corpo de prova;
- 5- ruptura por tração e cisalhamento;
- 6- ruptura por esmagamento na cabeça do corpo de prova;
- 7- ruptura do corpo de prova nas regiões onde ocorreram defeitos: nós, rachaduras ou diminuição excessiva da seção na confecção dos corpos de prova.
- 8- ruptura por tração na flexão.

VIGA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	7,70	49,95	384,6	48200	125,3	1
2	7,10	50,65	359,6	55300	153,8	1
3	7,10	50,10	355,7	25500	71,7	7
4	6,85	49,95	342,2	42900	125,4	1
5	6,80	50,20	341,4	55100	161,4	1
6	6,95	50,10	354,5	48000	135,4	1
7	7,00	50,15	351,1	39000	111,1	3

Tabela 3.1 - Resultados Obtidos nos Ensaios do CP I com 15% de Umidade

VIGA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	7,80	50,45	393,5	58200	147,9	1
2	7,15	51,25	366,4	44000	120,1	1
3	7,85	51,00	400,4	50800	126,9	2
4	7,18	50,54	362,9	38600	106,4	2
5	7,66	50,58	387,4	57000	147,1	1
6	7,15	50,50	361,1	60600	167,8	1
7	6,85	50,35	344,9	32400	93,9	3

Tabela 3.2 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP I com 33% de Umidade

VIGA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	7,40	20,80	153,9	28100	182,6	1
2	8,10	20,95	169,7	30300	178,6	1
3	6,85	20,80	142,5	22500	157,9	5
4	4,50	21,25	95,6	12600	131,8	8
5	7,05	20,60	145,2	23500	161,8	2
6	7,70	20,65	159,0	30000	188,7	5
7	7,50	20,45	153,4	19500	127,1	3

Tabela 3.3 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP II com 15% de Umidade

VIGA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	7,40	20,75	153,6	20200	131,5	2
2	8,05	21,35	171,9	23500	136,7	2
3	7,80	21,75	169,7	13700	80,7	2
4	7,50	21,50	161,3	17200	106,6	5
5	7,30	20,65	150,7	19600	130,1	5
6	7,20	20,60	148,3	18400	124,1	2
7	8,30	20,00	166,0	7000	42,2	7

Tabela 3.4 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP II com 33% de Umidade

VIGA	DIÂMETRO (mm)	ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
1	*	*	*	*	*
2	20,40	326,9	48000	146,8	4
3	19,85	309,5	51000	164,8	6
4	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*
6	20,20	320,5	44500	138,9	4
7	20,25	322,1	32000	99,3	4

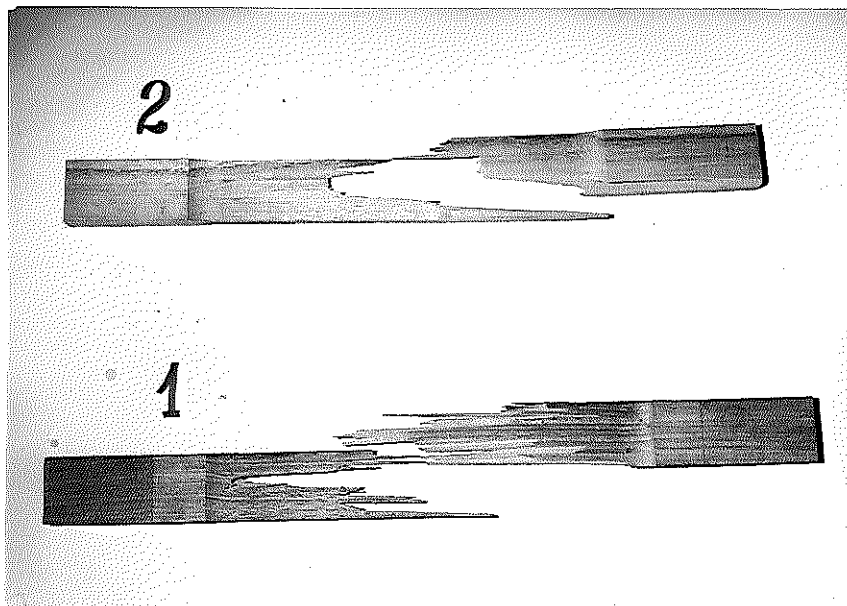
* Os corpos de prova apresentaram defeitos durante sua confecção.

Tabela 3.5 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP III com 15% de Umidade

VIGA	DIÂMETRO (mm)	ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
1	17,75	247,4	19400	78,4	4 e 6
2	20,75	338,2	30000	88,7	2
3	20,10	317,3	33000	104,0	4 e 6
4	21,55	364,7	29200	80,1	2
5	20,70	336,5	31200	92,7	4 e 6
6	20,55	331,7	31200	94,1	5
7	20,55	331,7	37600	113,4	4

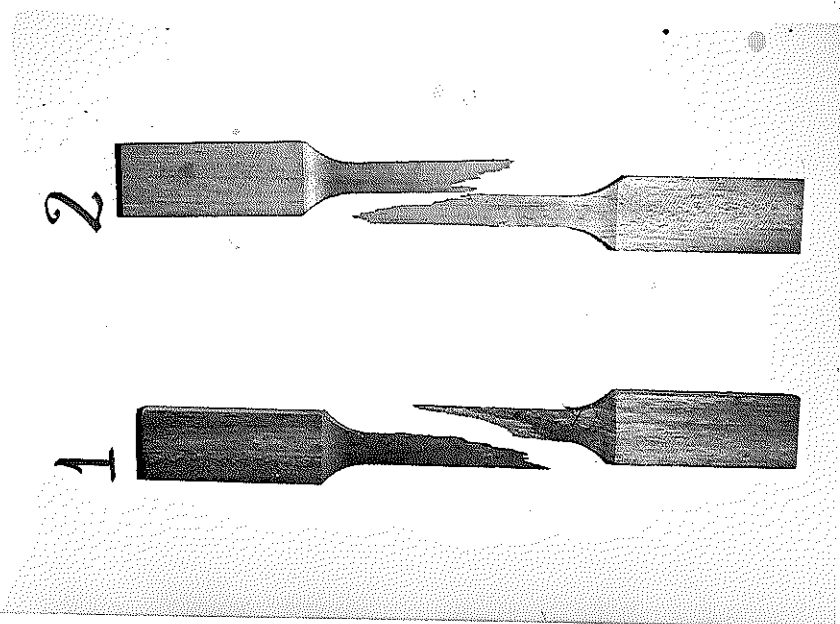
Tabela 3.6 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP III com 33% de Umidade

A seguir estão apresentados alguns tipos de ruptura ocorridas:



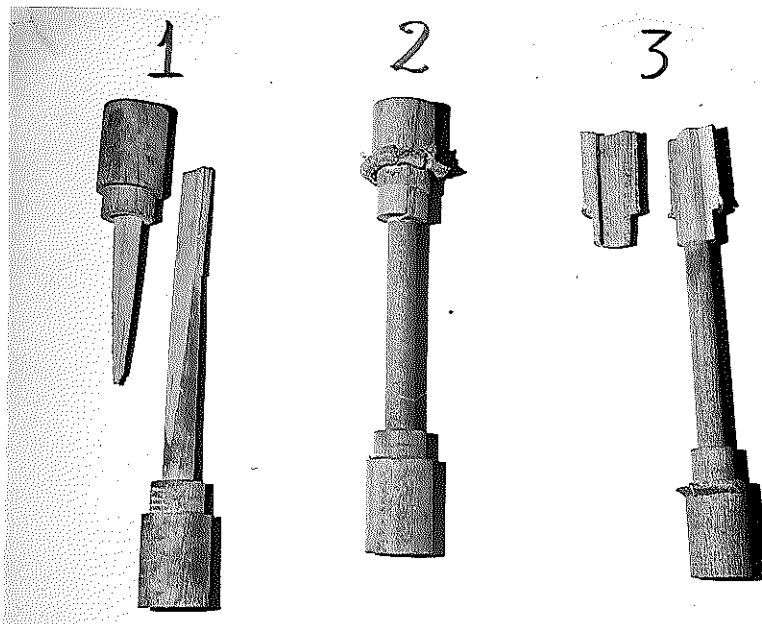
- 1 ruptura por tração
- 2

Figura 3.9 - Ruptura nos CP I



- 1
- 2 ruptura por tração e torção

Figura 3.10 - Ruptura nos CP II



- 1- ruptura por cisalhamento
- 2- ruptura por esmagamento
- 3- ruptura por cisalhamento e esmagamento

Figura 3.11 - Ruptura nos CP III

3.3.5 - Análise dos resultados e conclusões preliminares

Os fundamentos estatísticos utilizados neste trabalho estão apresentados no anexo I. Para este conjunto de ensaios, tendo-se em vista uma análise não só dos resultados numéricos, mas também dos tipos de ruptura ocorridas, não se desprezou nenhum dos dados obtidos.

A seguir, na tabela 3.7, para cada tipo de corpo de prova e cada porcentagem de umidade, estão apresentados os valores da média (\bar{x}) e do desvio padrão (s), das resistências de ruptura à tração.

	CP I		CP II		CP III	
	15%	33%	15%	33%	15%	33%
\bar{x} (MPa)	126,3	130,0	161,3	107,4	136,2	93,1
s (MPa)	29,7	25,9	24,4	34,6	27,7	12,5

TABELA 3.7 - Média e Desvio Padrão de cada Tipo de Corpo de Prova

Nos ensaios realizados, os resultados obtidos com o CP I a 33% apresentaram média praticamente igual em relação aos resultados obtidos com o CP I a 15% e desvio padrão menor, enquanto o tipo de ruptura predominante foi por tração, nos dois níveis de umidade.

Os resultados obtidos com o CP II a 33% apresentaram média menor que a dos resultados obtidos com o CP II a 15% e desvio padrão maior. Houve predominância da ruptura por tração pura e da ruptura por tração com torção.

Os resultados obtidos com o CP III não mereceram melhor análise, pois nas rupturas ocorridas houve outras influências além da tração.

Observando-se o desenrolar de cada ensaio e os tipos de ruptura ocorridos, conclui-se que a umidade do corpo de prova não interfere no sistema de ancoragem (fixação) utilizado.

Com base nessa análise, concluiu-se que, para continuação dos ensaios utilizando o CP III, deveriam ser aumentadas as dimensões da "cabeça" do corpo de prova ou diminuído o diâmetro da parte central. Nestas condições seria mais provável a ruptura por tração e não por esmagamento ou cisalhamento na "cabeça". Ocorrem dificuldades: aumentando-se as dimensões da cabeça do corpo de prova, o mesmo não seria adaptável no dispositivo da máquina de ensaios. Por outro lado, a diminuição do diâmetro da parte central conduziria a uma seção de madeira muito pequena, além de possibilitar um aumento significativo de excentricidades durante a confecção do corpo de prova, o que geraria solicitações adicionais no ensaio.

Por estas razões deixou-se de lado o CP III e um novo conjunto de ensaios foi programado, envolvendo o CP I e o CO II.

3.4 - ENSAIOS À TRAÇÃO - 2º CONJUNTO

3.4.1 - Objetivos do ensaio

Eliminado o CP III, programou-se este 2º conjunto de ensaios com o objetivo de prosseguir a comparação do comportamento dos outros dois tipos de corpo de prova na máquina de ensaios.

Os ensaios foram realizados apenas com porcentagem de umidade próxima ao ponto de saturação das fibras (33% de umidade) pois já havia sido observada a não influência da umidade do corpo de prova na sua fixação.

3.4.2 - Escolha da espécie de madeira

Ver item 3.3.2.

3.4.3 - Retirada dos corpos de prova

Do lote mencionado em 3.3.3, foram retirados três caibros, aleatoriamente. A partir destes, foram confeccionados sete corpos de prova, por caibro, de cada um dos tipos: CPI e CP II, conforme indicação da figura 3.12.

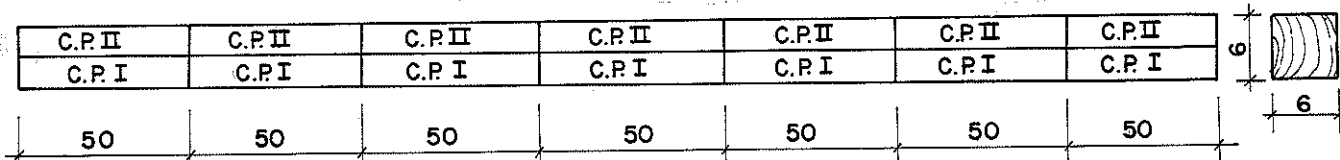


Figura 3.12 - Posição de Retirada dos Corpos de Prova

3.4.4 - Resultados obtidos

As tabelas a seguir apresentam, para cada tipo de corpo de prova: as dimensões da seção central dos corpos de prova e o tipo de ruptura ocorrido, de conformidade com as designações do item 3.3.4.

CORPO DE PROVA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e (mm)	b (mm)				
1	8,00	51,18	409,0	51500	125,9	1
2	7,68	51,12	392,6	49000	124,8	1
3	8,00	51,18	409,0	50000	122,2	1
4	7,82	51,00	398,8	46500	116,6	2
5	7,32	51,00	373,3	55500	148,7	1
6	7,00	51,18	358,3	71200	198,1	1
7	*	*	*	*	*	*

*O corpo de prova apresentou defeitos durante a sua confecção.

Tabela 3.8 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP I Retirados da Viga 1.

CORPO DE PROVA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e (mm)	b (mm)				
1	7,07	50,96	360,3	42600	118,2	1
2	7,28	50,88	370,4	47200	127,4	1
3	7,54	50,84	383,3	42100	109,8	2
4	7,31	50,86	371,8	45500	122,4	1
5	7,70	50,88	391,8	52500	134,0	1
6	7,60	50,98	387,4	55200	142,5	1
7	7,38	51,18	377,7	36700	97,2	1

Tabela 3.9 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP I Retirados da Viga 2.

CORPO DE PROVA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	7,54	50,96	384,2	46500	121,0	1
2	7,07	50,96	360,3	55700	154,6	1
3	7,42	50,82	377,1	55000	145,8	1
4	7,34	50,94	374,9	59100	157,6	1
5	6,53	50,96	332,8	51000	153,2	2
6	7,22	50,94	367,8	53100	144,4	1
7	7,62	50,94	388,2	48500	124,9	1

Tabela 3.10 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP I Retirados da Viga 3.

CORPO DE PROVA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	4,15	23,60	97,9	15200	155,3	1
2	6,85	23,45	138,7	19300	139,1	2
3	4,20	23,80	100,0	14200	142,0	1
4	7,50	23,30	174,7	17700	101,3	2
5	7,20	23,55	169,6	18800	110,8	1
6	7,05	23,85	168,1	23500	139,8	2
7	*	*	*	*	*	*

* Corpo de prova apresentou defeito durante sua confecção

Tabela 3.11 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP II Retirados da Viga 1.

CORPO DE PROVA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	7,68	23,28	178,8	23500	131,4	2
2	7,00	23,82	166,7	21600	129,6	2
3	7,08	23,60	167,1	22900	137,0	1
4	6,52	22,00	143,4	20500	143,0	2
5	*	*	*	*	*	*
6	5,55	24,20	134,3	16700	124,3	1
7	7,18	23,14	166,1	21900	131,8	1

*Corpo de prova apresentou defeitos durante sua confecção

Tabela 3.12 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP II Retirados da Viga 2.

CORPO DE PROVA	S E C Ç Ã O		ÁREA (mm ²)	CARGA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	TIPO DE RUPTURA
	e(mm)	b(mm)				
1	6,18	24,00	148,3	19200	129,5	2
2	6,12	23,08	141,2	27400	194,0	1
3	7,34	22,68	166,5	23500	141,1	2
4	7,28	23,12	168,3	26700	158,6	1
5	6,92	23,46	162,3	26000	160,2	2
6	7,48	23,64	176,8	22000	124,4	2
7	6,94	23,26	161,4	24700	153,0	2

Tabela 3.13 - Resultados Obtidos nos Ensaios dos CP II Retirados da Viga 3.

3.4.5 - Análise dos Resultados e Conclusões

Seguindo-se a rotina mencionada no item 3.3.5, os valores da média aritmética (\bar{x}) e do desvio padrão (s) das resistências à tração para os ensaios dos CP I e CP II, com umidade de 33% estão apresentados a seguir na tabela 3.14.

	CP I	CP II
\bar{x} (MPa)	134,5	133,7
s (MPa)	22,0	20,1

TABELA 3.14 - Média e Desvio Padrão de cada Tipo de Corpo de Prova.

A média e o desvio padrão foram calculados levando-se em consideração todos os valores experimentais, sem a preocupação de diferenciar-se as vigas de onde foram retirados.

Pelos resultados, observa-se que as médias e os desvios se equivalem. Em contrapartida, analisando-se os tipos de ruptura ocorridas, os CP I sofrem bem menos influências de outras solicitações quando comparados com os CP II, cujas rupturas são influenciadas pela torção.

Além disto, a área da seção transversal onde é maior a probabilidade de ruptura, no caso do CP I, é cerca de tres vezes maior em relação ao CP II.

Diante destas constatações, pode-se concluir:

. o CP I apresenta ruptura à tração melhor configurada que o CP II.

. o ensaio do CP I leva à ruptura uma área maior de madeira.

Também se salienta a maior facilidade de confecção do CP I com duas operações a menos, na tupia, que o CP II.

Considerando os objetivos do presente trabalho e o comportamento dos corpos de prova CP I, o mesmo será adotado para o desenvolvimento de toda a parte experimental e deverá compor a proposta de metodologia de ensaios de peças de madeira à tração, a ser submetida à apreciação da ABNT.

4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA MADEIRA

4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é desenvolvido o estudo para a determinação da distribuição de frequência da resistência à tração da madeira. A partir de um conjunto de dados obtidos na experimentação realizada e de um conjunto de dados apresentados na literatura, foi conduzida a análise estatística de modo a se definir a função densidade de probabilidade mais representativa dos referidos dados. Este é o passo inicial para se atingir os valores referentes à resistência característica da madeira (no caso a tração).

4.2 - ENSAIOS REALIZADOS

4.2.1 - Objetivos

O conjunto de ensaios de corpos de prova à tração foi executado para a obtenção dos dados da resistência à tração da madeira, com vistas à determinação da respectiva densidade de probabilidade.

4.2.2 - Escolha da espécie

A espécie de madeira escolhida para esta fase da experimentação foi o Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*) pelas mesmas razões apresentadas no item 3.3.2.

4.2.3 - Retirada dos corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova do tipo CP I utilizados na experimentação, a retirada das peças de madeira foi feita a partir de diversos lotes de Jatobá (caibros, vigotas, tábua) adquiridos nas serrarias da cidade de São Carlos, desde meados do ano de 1983 até início de 1985.

Dos caibros, vigotas e tábua componentes dos diversos lotes, foram retiradas, aleatoriamente, peças para a confecção dos

corpos de prova. Entre os cuidados tomados, um se referiu à direção das fibras da madeira em relação à direção de aplicação de carga, nos ensaios. Corpos de prova com quaisquer indícios de retorsão das fibras foram abandonados e os cento e oito corpos de prova considerados apresentaram, nitidamente, homogeneidade das fibras ao longo do comprimento.

Por razões a serem mais discutidas nos capítulos subsequentes, os corpos de prova deste conjunto foram ensaiados com umidade entre 30 e 33%.

4.2.4 - Resultados obtidos

Os resultados dos ensaios realizados nos cento e oito corpos de prova de Jatobá estão apresentados a seguir, na tabela 4.1. Os corpos de prova foram numerados em ordem crescente das resistências.

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)	CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)	CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)
1	58,8	16	85,6	31	103,3
2	60,1	17	86,2	32	104,8
3	65,2	18	90,3	33	106,4
4	68,9	19	90,3	34	108,4
5	69,4	20	92,9	35	109,7
6	70,5	21	93,8	36	109,8
7	73,8	22	93,9	37	110,3
8	74,4	23	96,1	38	111,3
9	74,7	24	97,2	39	111,5
10	75,6	25	97,3	40	114,9
11	76,9	26	99,4	41	115,3
12	80,3	27	100,0	42	116,6
13	80,4	28	100,8	43	117,2
14	82,7	29	100,9	44	117,7
15	84,5	30	101,1	45	118,2

TABELA 4.1 - Resistências para Corpos de Prova Saturados

continua

continuação

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)	CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)	CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)
46	118,8	67	131,0	88	147,1
47	120,1	68	131,3	89	147,9
48	120,5	69	131,5	90	148,1
49	120,7	70	131,8	91	148,7
50	120,9	71	132,0	92	149,4
51	121,0	72	132,2	93	149,5
52	121,1	73	134,0	94	149,5
53	122,2	74	135,6	95	154,6
54	122,4	75	135,6	96	157,6
55	123,7	76	136,2	97	162,6
56	124,8	77	136,8	98	165,5
57	124,9	78	136,9	99	165,9
58	125,6	79	137,8	100	166,5
59	125,9	80	138,0	101	167,8
60	126,4	81	138,5	102	169,3
61	126,9	82	141,3	103	175,9
62	127,4	83	142,5	104	177,5
63	127,8	84	143,6	105	188,4
64	128,5	85	144,4	106	192,9
65	129,5	86	144,6	107	197,7
66	130,8	87	145,8	108	198,1

TABELA 4.1 - Resistências para Corpos de Prova Saturados

Esses dados apresentaram média aritmética (\bar{x}) igual a 121,9 MPa, desvio padrão (s) igual a 30,9 MPa e coeficiente de variação (c.v.) igual a 0,25.

4.2.5 - Análise dos resultados

4.2.5.1 - Introdução

A análise dos resultados se baseou nos conceitos estatísticos apresentados em anexo. Alguns testes foram realizados com

vistas a definir a distribuição de frequência das resistências à tração da madeira.

4.2.5.2 - Histograma dos resultados

Para o traçado de um histograma, os dados devem ser agrupados em intervalos de classe. O número de intervalos (k) pode ser obtido, segundo sugestão de Fusco, utilizando uma regra empírica auxiliar citada por Benjamin e Cornell.

$$k = 1 + 3,3 \log n$$

onde n é o número total de dados. No caso em estudo, $n = 108$ e $k \cong 7,7$. Para efeito de confrontação de resultados, os dados experimentais foram divididos inicialmente em sete intervalos de classe e, em seguida, em oito.

4.2.5.2.1 - Histograma dos resultados com sete intervalos de classe

Na tabela 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios divididos em sete intervalos de classe e, na figura 4.1, o respectivo histograma.

INTERVALO DE CLASSE	FREQUÊNCIA
$x < 68,0$	3
$68,0 \leq x \leq 90,0$	14
$90,0 < x \leq 112,0$	22
$112,0 < x \leq 134,0$	34
$134,0 < x \leq 156,0$	22
$156,0 < x \leq 178,0$	9
$x > 178,0$	4

TABELA 4.2 - Dados Experimentais Divididos em 8 Intervalos de classe.

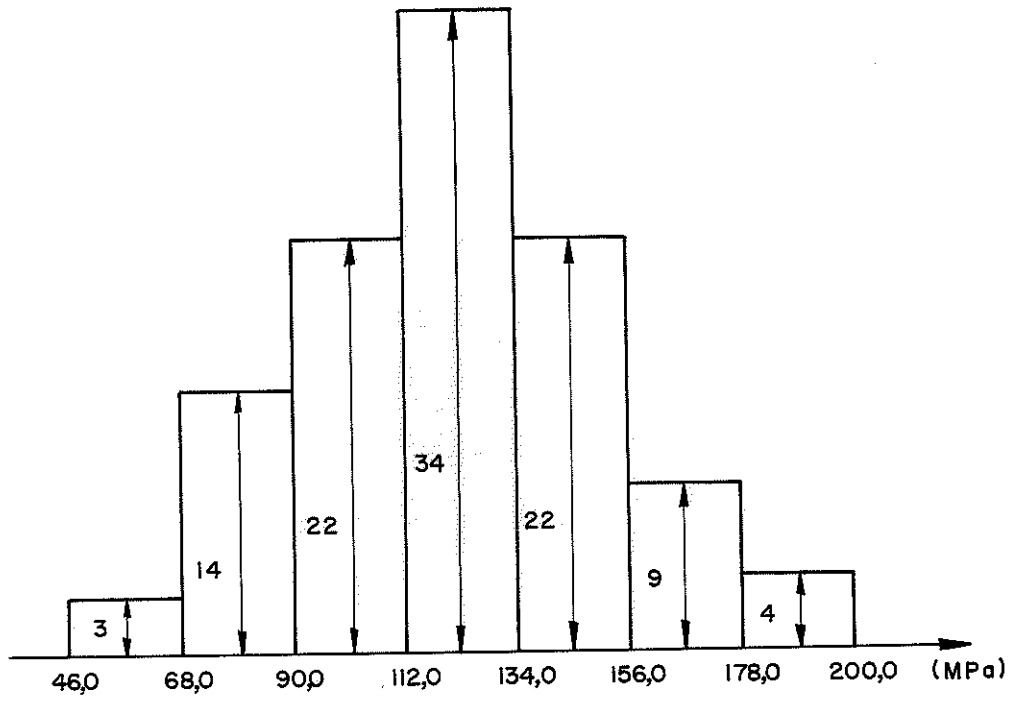


Figura 4.1 - Histograma das Resistências (Jatobá)
7 Intervalos de Classe

4.2.5.2.2 - Histograma dos resultados com oito inter-valor de classe

Na tabela 4.3 são apresentados os resultados dos ensaios divididos em oito intervalos de classe, e na figura 4.2, o respectivo histograma.

INTERVALO DE CLASSE	FREQUÊNCIA
$x < 74,3$	7
$74,3 \leq x \leq 89,9$	10
$89,9 < x \leq 105,5$	15
$105,5 < x \leq 121,1$	20
$121,1 < x \leq 136,7$	24
$136,7 < x \leq 152,3$	18
$152,3 < x \leq 167,9$	7
$x > 167,9$	7

TABELA 4.3 - Dados Experimentais Divididos em 8 Intervalos de Classe

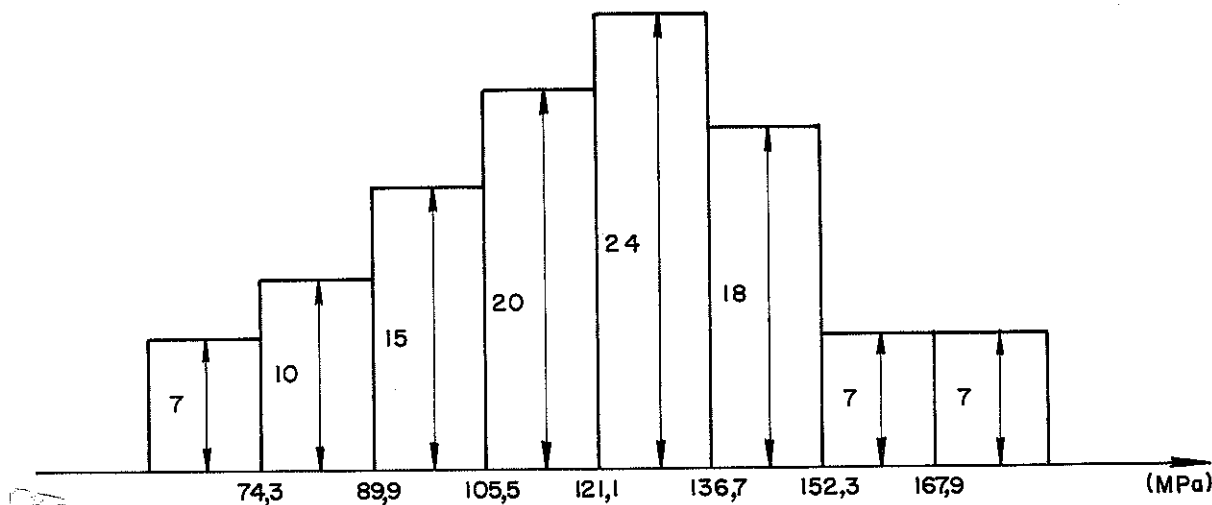


Figura 4.2 - Histograma das Resistências (Jatobá) 8 Intervalos de Classe

4.2.5.3 - Testes de Aderência

Uma observação preliminar dos dois histogramas traçados permite admitir a hipótese de os dados apresentarem tendência à distribuição normal das resistências da madeira à tração. Os cento e oito dados experimentais representam u'a amostra do universo e admite-se \bar{x} e s , respectivamente média e desvio padrão da amostra, como os melhores estimadores para μ e σ , respectivamente média e desvio padrão do universo. Para se verificar se a distribuição normal é adequada para representar os dados, foram feitos testes de aderência.

4.2.5.3.1 - Teste de aderência de Pearson

Em linhas gerais, este teste consiste em calcular-se a estatística D^2 , sendo:

$$D^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}$$

onde:

k = número de intervalos

n = número de dados da amostra

n_i = frequência do intervalo A_i

p_i = probabilidade de a variável estar contida no intervalo A_i

x = variável em estudo

Por hipótese, quando n é grande, D^2 segue uma distribuição qui-quadrado (anexo). D^2 deve ser comparado com um valor C , obtido da tabela do qui-quadrado com $r = k - 1 - p$ graus de liberdade (p é o número de parâmetros estimados; no caso, $p = 2$, pois foram estimados a média e o desvio padrão) e o nível de segurança desejado. Se $D^2 > C$ deve ser rejeitada a hipótese de a distribuição ser normal. Se $D^2 \leq C$ deve ser aceita tal hipótese.

4.2.5.3.1.1 - Teste de Pearson: dados divididos em sete intervalos

A seguir, é apresentado o teste de aderência de Pearson,

com os dados divididos em sete intervalos (A_i) de classe, cada um com n_i elementos:

A_1	:	$x < 68,0$	\rightarrow	$n_1 = 3$
A_2	:	$68,0 \leq x \leq 90,0$	\rightarrow	$n_2 = 14$
A_3	:	$90,0 < x \leq 112,0$	\rightarrow	$n_3 = 22$
A_4	:	$112,0 < x \leq 134,0$	\rightarrow	$n_4 = 34$
A_5	:	$134,0 < x \leq 156,0$	\rightarrow	$n_5 = 22$
A_6	:	$156,0 < x \leq 178,0$	\rightarrow	$n_6 = 9$
A_7	:	$x > 178,0$	\rightarrow	$n_7 = 4$

Com a média dos resultados $\bar{x} = 121,9$ MPa, o desvio padrão $s = 30,9$ MPa, e a tabela distribuição normal, calculam-se as probabilidades:

$$\begin{aligned} p_1 &= P(x < 68,0) = 0,041 \\ p_2 &= P(68,0 \leq x \leq 90,0) = 0,111 \\ p_3 &= P(90,0 < x \leq 112,0) = 0,223 \\ p_4 &= P(112,0 < x \leq 134,0) = 0,277 \\ p_5 &= P(134,0 < x \leq 156,0) = 0,212 \\ p_6 &= P(156,0 < x \leq 178,0) = 0,102 \\ p_7 &= P(x > 178,0) = 0,034 \end{aligned}$$

Utilizando-se essas probabilidades, calcula-se o valor de D^2 .

$$D^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(n_i - 108 p_i)^2}{108 p_i} = 1,98$$

Através dos resultados obtidos, foram estimados dois parâmetros (\bar{x} e s) da população e, por isso, tem-se:

$$r = 7 - 1 - 2 = 4 \text{ graus de liberdade.}$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, em uma tabela de qui-quadrado obtem-se, com $r = 4$ e $1 - \alpha = 0,95$, a constante $C = 9,488$.

Como $D^2 < C$, pode-se aceitar a hipótese de os dados apresentarem uma distribuição normal.

4.2.5.3.1.2 - Teste de Pearson: dados divididos em oito intervalos.

A seguir, é apresentado o teste de aderência de Pearson com os dados divididos em oito intervalos (A_i) de classe, cada um com n_i elementos:

$$A_1 : x < 74,3 \rightarrow 7$$

$$A_2 : 74,3 \leq x \leq 89,9 \rightarrow 10$$

$$A_3 : 89,9 < x \leq 105,5 \rightarrow 15$$

$$A_4 : 105,5 < x \leq 121,1 \rightarrow 20$$

$$A_5 : 121,1 < x \leq 136,7 \rightarrow 24$$

$$A_6 : 136,7 < x \leq 152,3 \rightarrow 18$$

$$A_7 : 152,3 < x \leq 167,9 \rightarrow 7$$

$$A_8 : x > 167,9 \rightarrow 7$$

Com o procedimento já mencionado no item 4.2.5.3.1.1, calculam-se:

$$p_1 = P(x < 74,3) = 0,062$$

$$p_2 = P(74,3 \leq x \leq 89,9) = 0,087$$

$$p_3 = P(89,9 < x \leq 105,5) = 0,149$$

$$p_4 = P(105,5 < x \leq 121,1) = 0,194$$

$$p_5 = P(121,1 < x \leq 136,7) = 0,192$$

$$p_6 = P(136,7 < x \leq 152,3) = 0,153$$

$$p_7 = P(152,3 < x \leq 167,9) = 0,095$$

$$p_8 = P(x > 167,9) = 0,068$$

$$D^2 = \sum_{i=1}^8 \frac{(n_i - 108 p_i)^2}{108 p_i} = 1,876$$

$$\left. \begin{array}{l} r = 8 - 1 - 2 = 5 \\ \alpha = 5\% \end{array} \right\} \rightarrow C = 11,071$$

Como $D^2 < C$, aceita-se a hipótese de os dados apresentarem uma distribuição normal.

4.2.5.3.2 - Teste de Kolmogorov - Smirnov

O teste de Kolmogorov - Smirnov consiste em se determinar a maior diferença entre a função de distribuição acumulada do modelo e a da amostra (ver anexo I). Essa diferença é obtida através da diferença de duas funções $d = |F(x) - G(x)|$ onde $F(x) = P(X < Z)$ e $G(x)$ é a função de distribuição acumulada da amostra.

Calculada a maior diferença entre $F(x)$ e $G(x)$, ela é comparada com um valor crítico tabelado em função do número de elementos da amostra e do nível de significância α .

Através de um programa processado na calculadora HP, do LaMEM, obteve-se: $d = 0,0507$, sendo o valor crítico igual a $0,13087$.

Como $d < 0,13087$, aceita-se a hipótese de os dados apresentarem uma distribuição normal.

4.2.5.3.3 - Função NSCORES - Testes de normalidade

A função NSCORES consta do conjunto de programas estatísticos MINITAB, implementados no IBM-370 do Centro de Processamento de Dados (CPD) da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, e reproduzidos para uso na calculadora HP 9825-B do LaMEM. Esta função tem sido utilizada para testar a normalidade de um conjunto de dados.

O teste consiste na análise de um gráfico onde são plotados os dados em estudo contra os valores da função NSCORES, aplicada aos referidos dados.

Os dados apresentarão uma distribuição normal quando os pontos plotados mais se aproximarem de uma linha reta, isto é, quando o coeficiente de correlação linear (r^2) se aproximar de 100%.

Aplicando-se essa função estatística aos dados das resistências à tração, obtêm-se o seguinte gráfico:

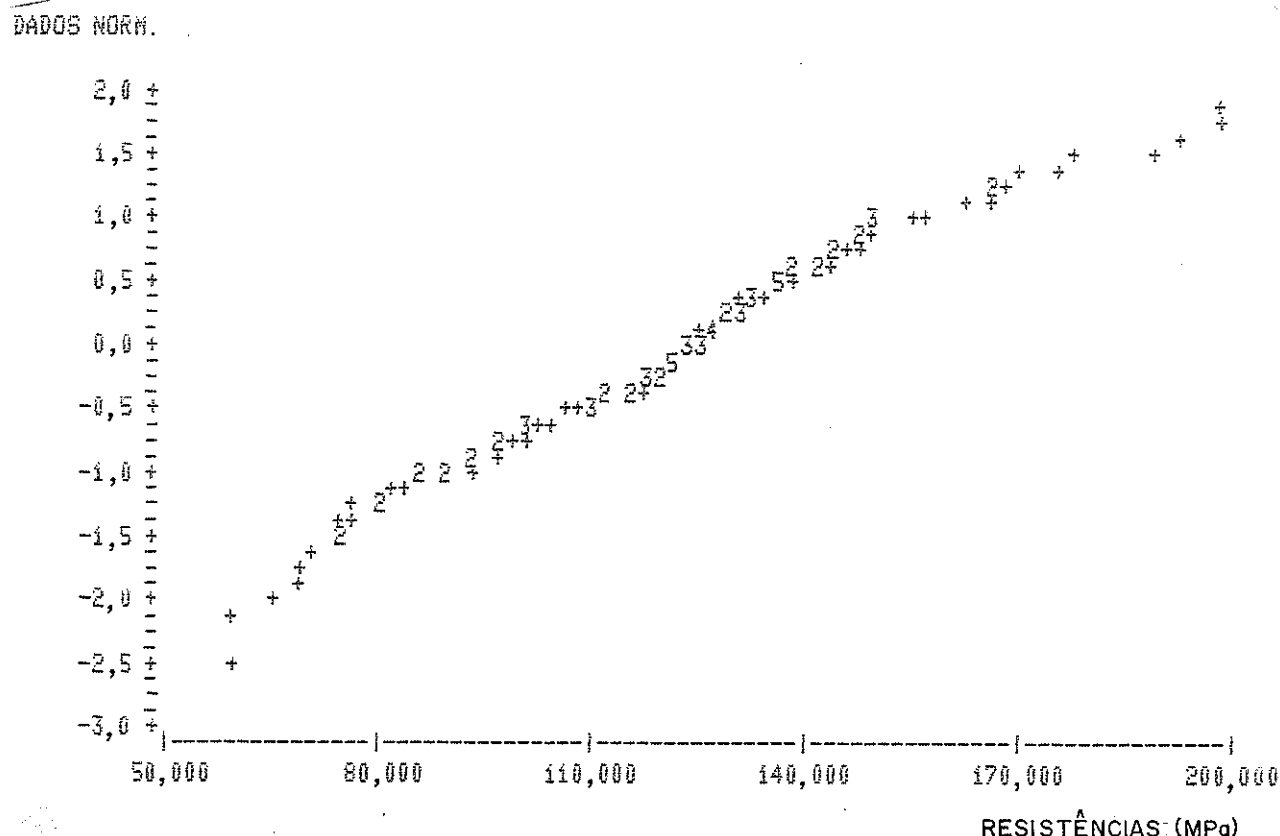


Figura 4.3 - Gráfico Estatístico de Normalidade

Analisando-se o gráfico acima, observa-se a tendência dos pontos a uma reta com $r^2 = 97,89\%$. Assim, pode-se admitir que os dados apresentam uma distribuição normal.

4.2.6 - Conclusões

Analisando-se os histogramas e os resultados dos testes de aderência apresentados nos itens 4.2.5.3.1, 4.2.5.3.2 e 4.2.5.3.3, conclui-se pela aceitação da hipótese de os dados da Tabela 4.1 (resistências para corpos de prova de tração, madeira com umidade em torno do ponto de saturação das fibras) apresentarem uma distribuição normal.

4.3 - OUTROS DADOS

4.3.1 - Considerações iniciais

Com o intuito de ampliar o número de espécies analisadas com vistas à determinação da função densidade de probabilidade das resistências à tração da madeira, foram considerados, neste item, os resultados da experimentação realizada por Hellmeister.

4.3.2 - Espécie ensaiada

Hellmeister estudou a espécie Douglas - fir (*Pseudotsuga menziesii*), conífera muito utilizada na construção civil nos Estados Unidos.

4.3.3 - Resultados apresentados por Hellmeister

Os resultados dos ensaios realizados por Hellmeister, trinta e três corpos de prova, madeira verde, estão apresentados a seguir, na Tabela 4.4.

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)	CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA (MPa)
1	49,7	18	69,0
2	53,4	19	69,6
3	54,5	20	70,1
4	63,0	21	70,1
5	63,5	22	70,4
6	63,6	23	70,5
7	64,9	24	70,9
8	65,1	25	71,7
9	66,5	26	72,8
10	66,6	27	75,1
11	66,6	28	76,1
12	67,5	29	77,6
13	67,5	30	77,6
14	68,0	31	79,7
15	68,3	32	81,0
16	68,4	33	81,6
17	68,5		

Tabela 4.4. - Resistências para Corpos de Prova Saturados

Esses dados apresentam média aritmética (\bar{x}) igual a 68,8 MPa, desvio padrão (s) igual a 7,2 MPa e coeficiente de variação (cv) igual a 0,10.

4.3.4 - Análise dos Resultados

A análise dos resultados apresentados por Hellmeister seguiu a mesma sequência do item 4.2.5.

4.3.4.1 - Histograma de resultados

Utilizando os conceitos apresentados em 4.2.5.2, os dados foram agrupados em cinco intervalos de classe, tabela 4.5, cujo histograma é apresentado na figura 4.4.

INTERVALO DE CLASSE	FREQUÊNCIA
$x < 59,1$	3
$59,1 \leq x \leq 65,4$	5
$65,4 < x \leq 71,8$	17
$71,8 < x \leq 78,1$	5
$x > 78,1$	3

Tabela 4.5 - Dados Divididos em 5 Intervalos de Classe

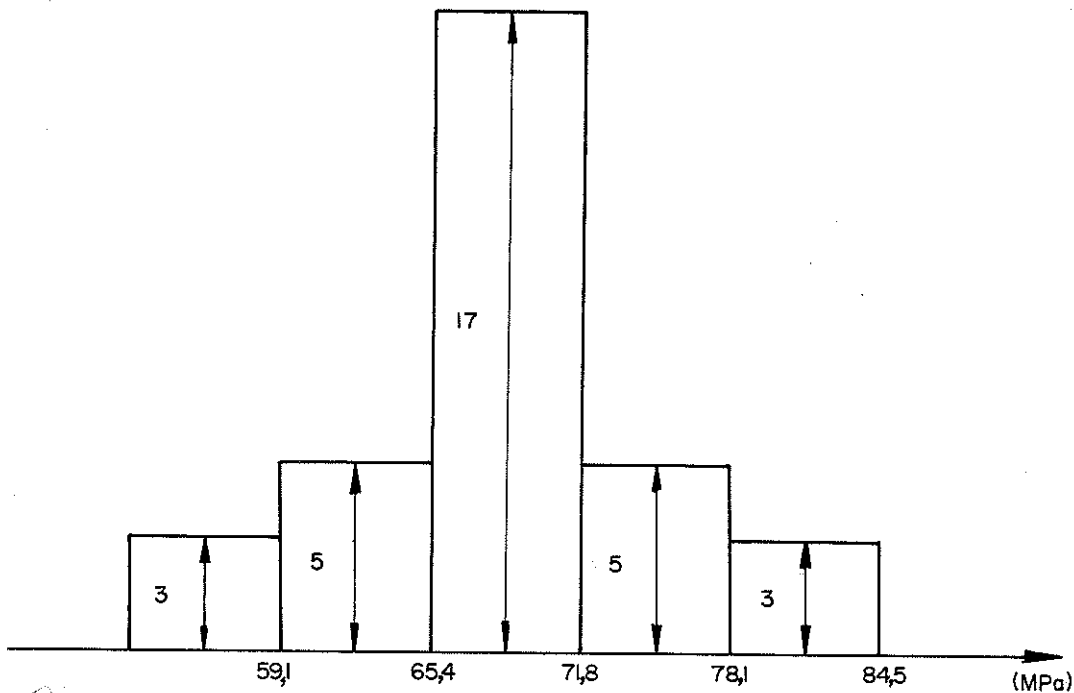


Figura 4.4 - Histograma das Resistências - 5 Intervalos de Classe

4.3.4.2 - Testes de aderência

Uma observação preliminar do histograma da figura 4.4 permite admitir a hipótese de os dados apresentarem tendência a distribuição normal. Para verificar a mencionada hipótese, foram feitos testes de aderência.

4.3.4.2.1 - Teste de Aderência de Pearson

Com a idéia geral do teste mostrada no item 4.2.5.3.1 e no anexo I, o teste de Pearson foi aplicado para os dados divididos em cinco intervalos de classe.

$$A_1 : x < 59,1 \rightarrow 3$$

$$A_2 : 59,1 \leq x \leq 65,4 \rightarrow 5$$

$$A_3 : 65,4 < x \leq 71,8 \rightarrow 17$$

$$A_4 : 71,8 < x \leq 78,1 \rightarrow 5$$

$$A_5 : x > 78,1 \rightarrow 3$$

Com a média dos resultados $\bar{x} = 68,8$ MPa, o desvio padrão $s = 7,2$ MPa e a tabela de distribuição normal, calculam-se as probabilidades:

$$p_1 = P(x < 59,1) = 0,098$$

$$p_2 = P(59,1 \leq x \leq 65,4) = 0,224$$

$$p_3 = P(65,4 < x \leq 71,8) = 0,340$$

$$p_4 = P(71,8 < x \leq 78,1) = 0,239$$

$$p_5 = P(x > 78,1) = 0,099$$

Utilizando-se estas probabilidades, calcula-se o valor de D^2 :

$$D^2 = \sum_{i=1}^5 \frac{(n_i - 33 p_i)^2}{33 p_i} = 3,457$$

Através do conjunto de resultados, foram estimados dois parâmetros (\bar{x} e s) da população e, por isso, tem-se $r = 5 - 1 - 2 = 2$ graus de liberdade.

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, em uma tabela de qui-quadrado, obtem-se, com $r = 2$ e $1 - \alpha = 0,95$, a constante $C = 5,991$.

Como $D^2 < C$, pode-se aceitar a hipótese de os dados apresentarem distribuição normal.

4.3.4.2.2 - Teste de aderência de Kolmogorov - Smirnov

Com a idéia geral do teste mostrada no item 4.2.5.3.2 e no anexo I, foi aplicado o teste do Kolmogorov-Smirnov sobre os dados da tabela 4.4. Neste caso:

$$d = 0,132$$

$$\text{valor crítico} = 0,231$$

Como $d < 0,231$, aceita-se a hipótese de os dados apresentarem distribuição normal.

4.3.4.2.3 - Função NSCORES - Teste de normalidade

Com a idéia geral da função NSCORES mostrada no Item 4.2.5.3.3, o teste de normalidade apresentou o seguinte coeficiente de correlação linear:

$$r^2 = 94,50\%$$

Com este valor, é possível admitir que os dados apresentam distribuição normal.

DADOS NORM.

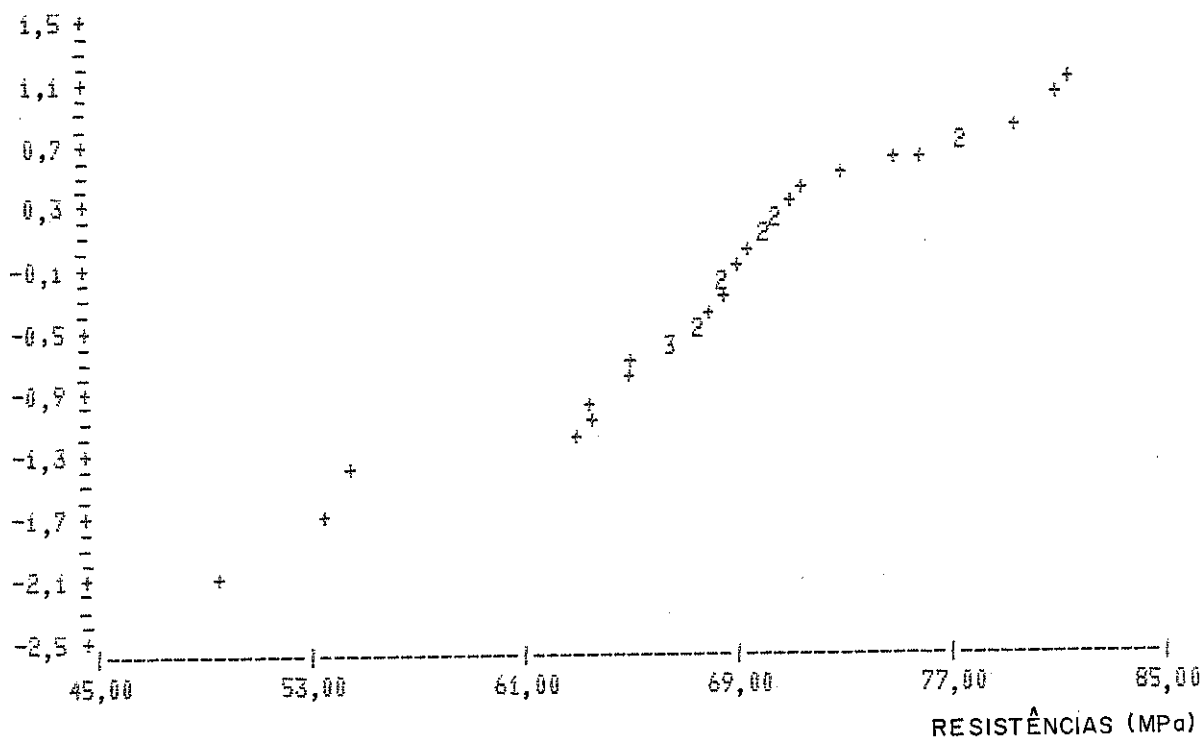


Figura 4.5 - Gráfico Estatístico de Normalidade

4.3.5 - Conclusões

Analisando-se o histograma e os resultados dos testes de aderência apresentados nos itens 4.3.4.2.1, 4.3.4.2.2 e 4.3.4.2.3, concluiu-se pela aceitação da hipótese de os dados da Tabela 4.4 apresentarem distribuição normal.

5. DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO DA MADEIRA

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é desenvolvido o estudo para a determinação da distribuição de frequência do módulo de elasticidade à tração da madeira. A partir de um conjunto de dados obtidos na experimentação realizada e de um conjunto de dados apresentados na literatura, foi conduzida a análise estatística de modo a se definir a função densidade de probabilidade mais representativa dos referidos dados. Este é o passo inicial para se introduzir a discussão a respeito dos valores referentes ao módulo de elasticidade característico da madeira à tração.

5.2 - ENSAIOS REALIZADOS

5.2.1 - Objetivo

O conjunto de ensaios de corpos de prova à tração foi executado para a obtenção de dados que permitissem o cálculo do módulo de elasticidade de cada corpo de prova, com vistas à determinação da respectiva função densidade de probabilidade.

5.2.2 - Escolha da espécie

A espécie de madeira escolhida para esta fase da experimentação foi o Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), pelas mesmas razões apresentadas no item 3.3.2.

5.2.3 - Retirada dos corpos de prova

A confecção dos corpos de prova foi realizada conforme exposto no item 4.2.3.

5.2.4 - Realização dos ensaios

Os ensaios realizados neste conjunto de corpos de prova diferiram dos outros pela instalação de dois relógios comparadores,

um em cada face do corpo de prova, conforme figura 5.1, com a intenção de serem medidas as deformações dos corpos de prova durante o transcorrer do ensaio.

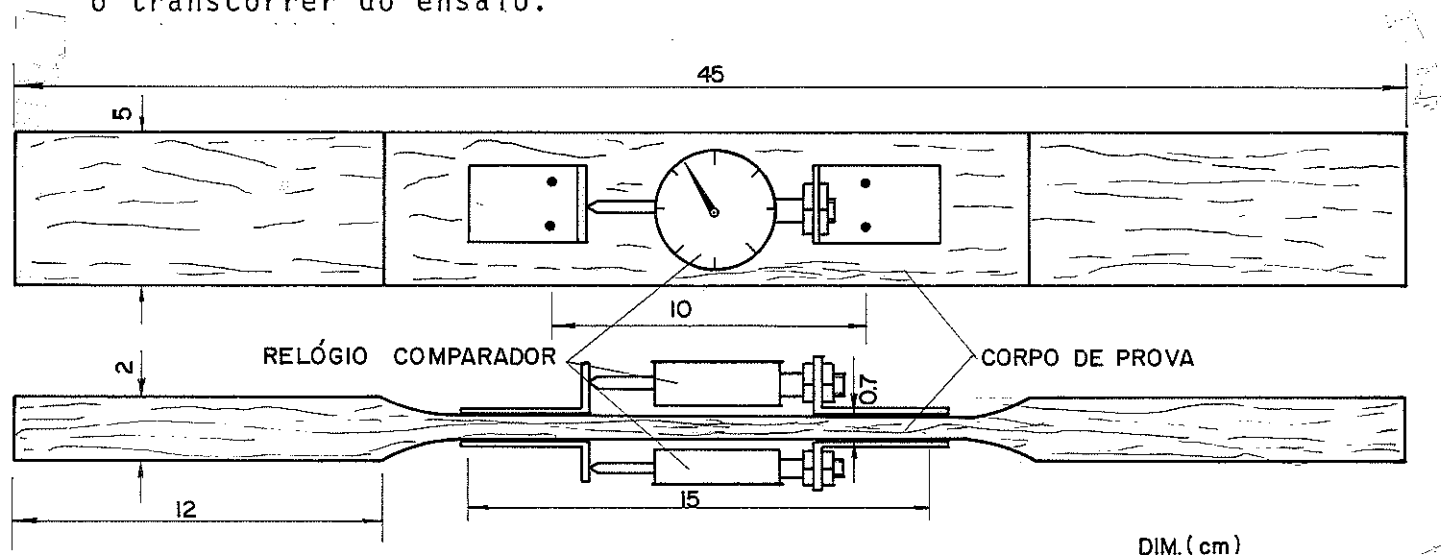


Figura 5.1 - Esquema de Colocação dos Relógios Comparadores

A distância entre os pontos de fixação dos relógios comparadores no corpo de prova é de 10 cm (distância nominal base para o cálculo das deformações específicas). Foram utilizados relógios comparadores com precisão de milésimo de milímetro.

Durante o transcorrer dos ensaios, para acréscimo de carga de 1000 N, anotaram-se os valores dos alongamentos registrados pelos dois relógios comparadores. Esse procedimento foi utilizado no intervalo de carregamento compreendido entre 0 e aproximadamente 15.000 N, sempre abaixo do limite de proporcionalidade. Quando o carregamento atingia 15.000 N, os relógios comparadores eram retirados e o corpo de prova levado até a ruptura.

5.2.5 - Resultados obtidos

Com os valores "lidos" nos relógios comparadores, obtém-se a deformação específica (ϵ) média para cada acréscimo de carga em cada corpo de prova.

Plotando-se os valores de ϵ e das tensões correspondentes a cada acréscimo de carga, obtém-se, para a maioria dos corpos de prova à tração, um gráfico com a seguinte configuração:

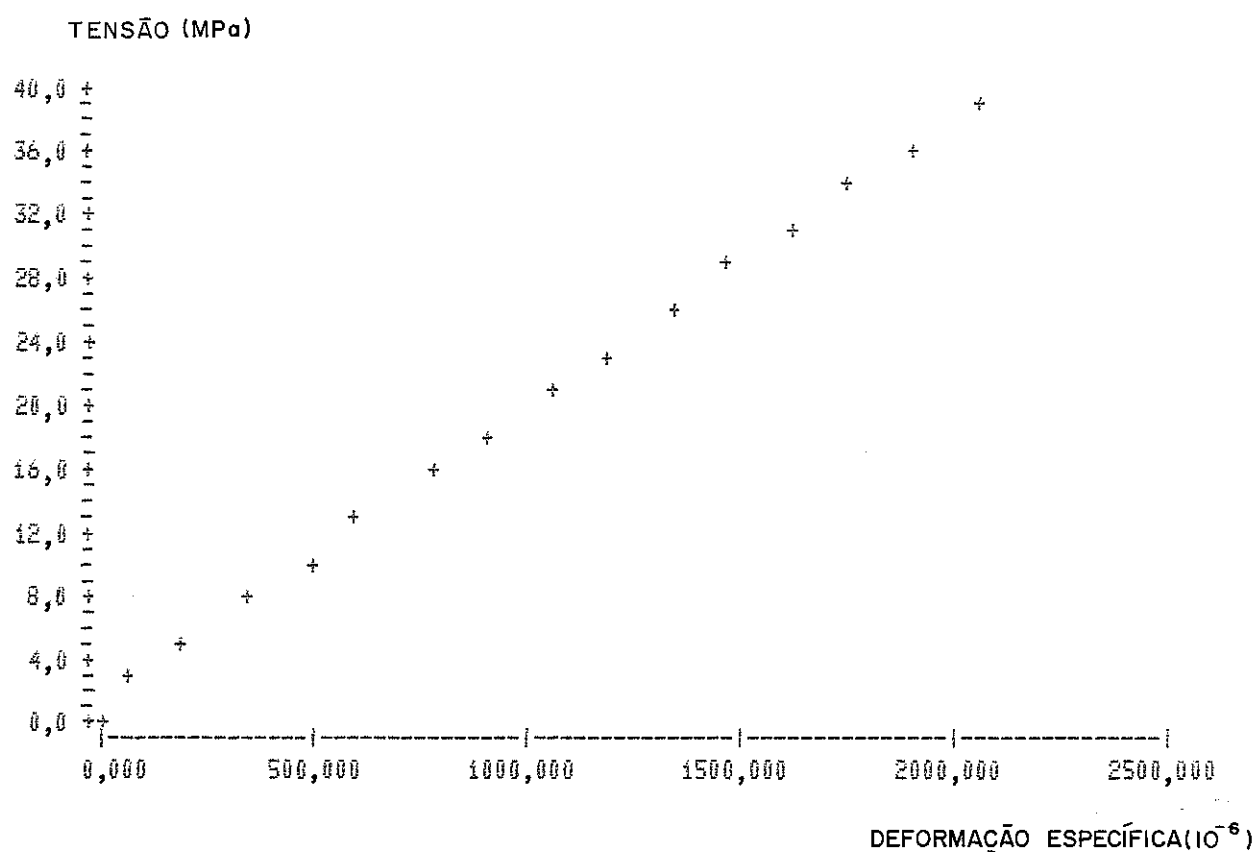


Figura 5.2 - Exemplo de Gráfico Tensão x Deformação

Relacionando-se os valores da tensão e da deformação específica através de uma regressão linear, obtém-se o módulo de elasticidade do corpo de prova ensaiado.

Os valores do módulo de elasticidade para os cinquenta e um corpos de prova ensaiados, obtidos através de uma regressão linear, são mostrados na tabela 5.1, numerados em ordem crescente dos módulos de elasticidade.

CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
1	10068	18	17133	35	19936
2	10874	19	17262	36	19936
3	11488	20	17328	37	20222
4	13201	21	17575	38	20231
5	14157	22	17614	39	20254
6	14791	23	17714	40	21024
7	14968	24	17899	41	21142
8	15026	25	18172	42	21360
9	15529	26	18304	43	21477
10	15538	27	18335	44	21750
11	15907	28	18677	45	21757
12	15913	29	18772	46	21831
13	16145	30	18929	47	21860
14	16433	31	19042	48	22840
15	16455	32	19100	49	23382
16	16700	33	19339	50	23391
17	16766	34	19498	51	24123

TABELA 5.1 - Módulo de Elasticidade para Corpos de Prova Saturados

Esses dados apresentam média aritmética (\bar{x}) igual a 18180 MPa, desvio padrão (s) igual a 3179 MPa e coeficiente de variação (c.v.) igual a 0,18.

5.2.6 - Análise dos resultados

5.2.6.1 - Introdução

Como já mencionado no item 4.2.5.1, a análise dos resultados foi baseada nos conceitos estatísticos apresentados no anexo I.

5.2.6.2 - Histograma dos resultados

Procedendo-se conforme exposto em 4.2.5.2, chegou-se a um número de intervalos (k) aproximadamente igual a 6,64 para $n = 51$ dados. Para efeito de confrontação de resultados, os dados expe

rimentais foram divididos, inicialmente, em seis intervalos de classe e, em seguida, em sete.

5.2.6.2.1 - Histograma dos resultados com seis intervalos de classe.

Na tabela 5.2 são apresentados os dados experimentais divididos em seis intervalos de classe e, na figura 5.3, o respectivo histograma.

INTERVALO DE CLASSE	FREQUÊNCIA
$x < 13780$	4
$13780 \leq x \leq 15980$	8
$15980 < x \leq 18180$	13
$18180 < x \leq 20380$	14
$20380 < x \leq 22580$	8
$x > 22580$	4

TABELA 5.2 - Dados Experimentais Divididos em 6 Intervalos de Classe

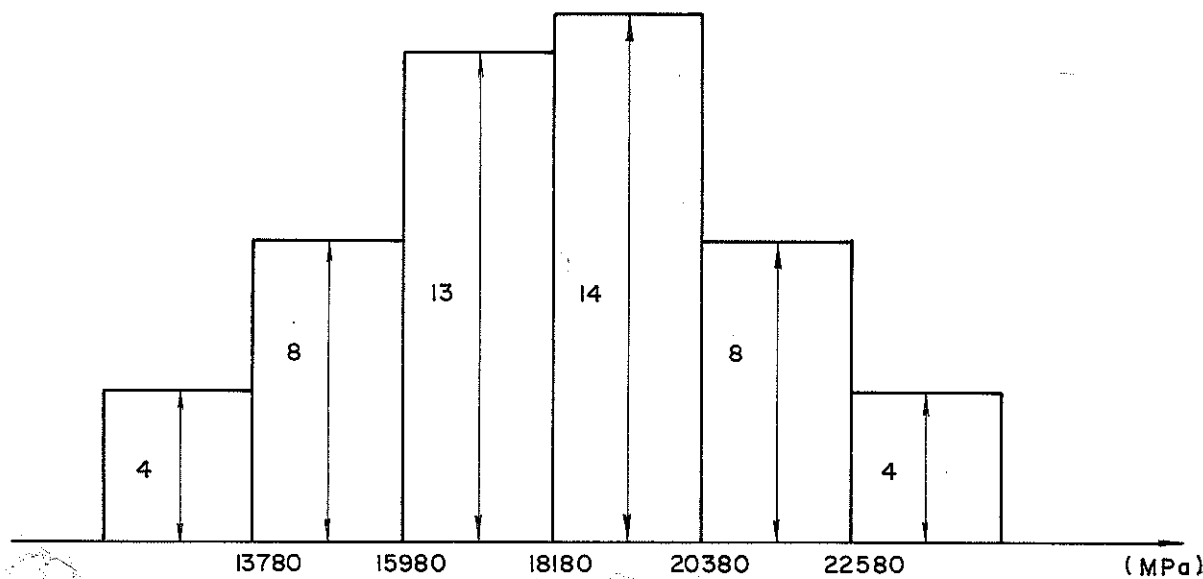


Figura 5.3 - Histograma do Módulo de Elasticidade (Jatobá) 6 Intervalos de Classe

5.2.6.2.2. - Histograma dos resultados com sete intervalos de classe

Na tabela 5.3. são apresentados os dados experimentais divididos em sete intervalos de classe, e na figura 5.4, o respectivo histograma.

INTERVALO DE CLASSE	FREQUÊNCIA
$x < 13800$	4
$13800 \leq x \leq 15540$	6
$15540 < x \leq 17280$	9
$17280 < x \leq 19020$	11
$19020 < x \leq 20760$	9
$20760 < x \leq 22500$	8
$x > 22500$	4

TABELA 5.3 - Dados Experimentais Divididos em 7 Intervalos de Classe

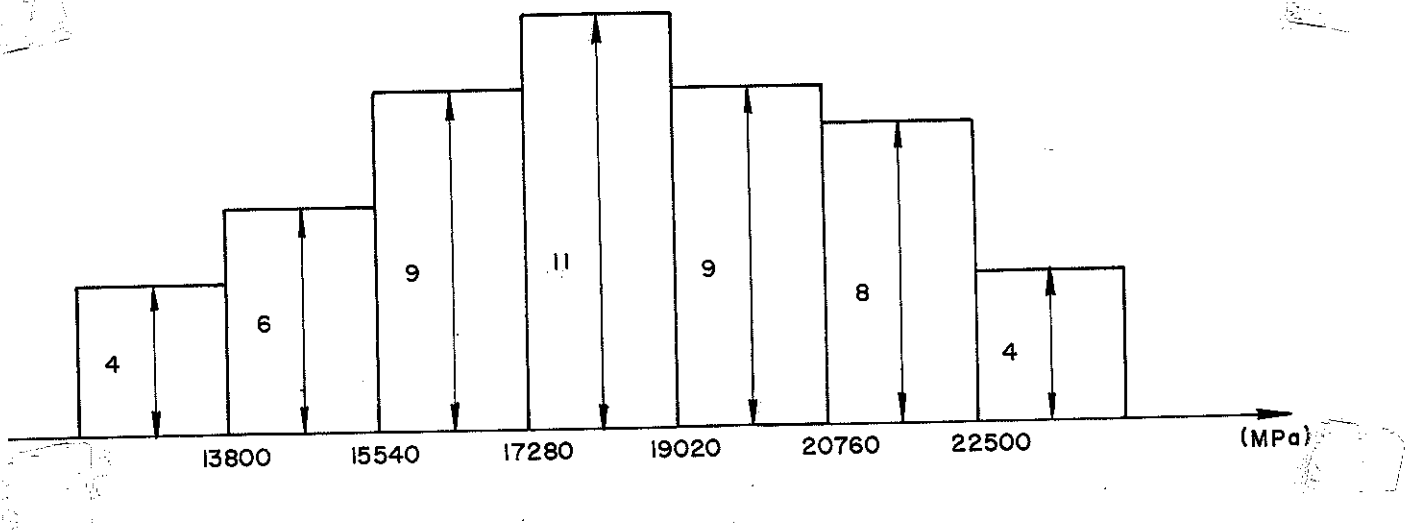


Figura 5.4 - Histograma do Módulo de Elasticidade (Jatobá)
7 Intervalos de Classe

5.2.6.3 - Testes de aderência

Como constatado em 4.2.5.3, para a resistência, uma observação preliminar dos dois histogramas traçados (Fig. 5.3 e 5.4) permite admitir a hipótese de os dados apresentarem tendência a distribuição normal. Os cinquenta e um dados experimentais representam uma amostra do universo e são admitidos \bar{x} e s , respectivamente média e desvio padrão da amostra, como os melhores estimadores para μ e σ , respectivamente média e desvio padrão do universo. Para se verificar se a distribuição normal é adequada para representar os dados, foram feitos testes de aderência.

5.2.6.3.1 - Teste de aderência de Pearson

O teste de aderência de Pearson está descrito no item 4.2.5.3.1 e no anexo I.

5.2.6.3.1.1 - Teste de Pearson: dados divididos em seis intervalos

A seguir é apresentado o teste de aderência de Pearson com os dados divididos em seis intervalos (A_i) de classe, cada um com n_i elementos:

$$\begin{aligned} A_1 : & \quad x < 13780 \rightarrow n_1 = 4 \\ A_2 : & \quad 13780 \leq x \leq 15980 \rightarrow n_2 = 8 \\ A_3 : & \quad 15980 < x \leq 18180 \rightarrow n_3 = 13 \\ A_4 : & \quad 18180 < x \leq 20380 \rightarrow n_4 = 14 \\ A_5 : & \quad 20380 < x \leq 22580 \rightarrow n_5 = 8 \\ A_6 : & \quad x > 22580 \rightarrow n_6 = 4 \end{aligned}$$

Com a média dos resultados $\bar{x} = 18180$ MPa, o desvio padrão $s = 31179$ MPa e a tabela de distribuição normal, calculam-se as probabilidades:

$$\begin{aligned} p_1 &= P(x < 13780) = 0,084 \\ p_2 &= P(13780 \leq x \leq 15980) = 0,161 \\ p_3 &= P(15980 < x \leq 18180) = 0,255 \end{aligned}$$

$$p_4 = P(18180 < x \leq 20380) = 0,255$$

$$p_5 = P(20380 < x \leq 22580) = 0,163$$

$$p_6 = P(x > 22580) = 0,082$$

Utilizando-se essas probabilidades, calcula-se o valor de D^2 :

$$D^2 = \sum_{i=1}^6 \frac{(\eta_i - 51 p_i)^2}{51 p_i} = 0,120$$

Através dos resultados apresentados, foram estimados dois parâmetros (\bar{x} e s) da população e, por isso, os graus de liberdade são $r = 6 - 1 - 2 = 3$.

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, em uma tabela de qui-quadrado obtém-se, com $r = 3$ e $1 - \alpha = 0,95$, a constante $C = 7,815$.

Como $D^2 < C$, pode-se aceitar a hipótese de os dados apresentarem uma distribuição normal.

5.2.6.3.1.2 - Teste de Pearson: dados divididos em sete intervalos

A seguir é apresentado o teste de aderência de Pearson, com os dados divididos em sete intervalos (A_i) de classe, cada um com η_i elementos:

$$A_1 : \quad x < 13800 \rightarrow \eta_1 = 4$$

$$A_2 : 13800 \leq x \leq 15540 \rightarrow \eta_2 = 6$$

$$A_3 : 15540 < x \leq 17280 \rightarrow \eta_3 = 9$$

$$A_4 : 17280 < x \leq 19020 \rightarrow \eta_4 = 11$$

$$A_5 : 19020 < x \leq 20760 \rightarrow \eta_5 = 9$$

$$A_6 : 20760 < x \leq 22500 \rightarrow \eta_6 = 8$$

$$A_7 : \quad x > 22500 \rightarrow \eta_7 = 4$$

Com a média dos resultados, o desvio padrão e a tabela de distribuição normal, calculam-se as probabilidades:

$$p_1 = P (x < 13800) = 0,084$$

$$p_2 = P (13800 \leq x \leq 15540) = 0,119$$

$$p_3 = P (15540 < x \leq 17280) = 0,186$$

$$p_4 = P (17280 < x \leq 19020) = 0,213$$

$$p_5 = P (19020 < x \leq 20760) = 0,188$$

$$p_6 = P (20760 < x \leq 22500) = 0,122$$

$$p_7 = P (x > 22500) = 0,087$$

Utilizando-se essas probabilidades, calcula-se o valor de D^2 :

$$D^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(n_i - 51 p_i)^2}{51 p_i} = 0,644$$

Através dos resultados apresentados, foram estimados dois parâmetros (\bar{x} e s) da população e, por isso, os graus de liberdade são $r = 7 - 1 - 2 = 4$.

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, em uma tabela de qui-quadrado obtem-se, com $r = 4$ e $1 - \alpha = 0,95$, a constante $C = 9,488$.

Como $D^2 < C$, pode-se aceitar a hipótese de os dados apresentarem uma distribuição normal.

5.2.6.3.2 - Teste de Kolmogorov - Smirnov

O teste de Kolmogorov - Smirnov está descrito em 4.2.5.2 e no anexo I. Utilizando-se o procedimento ali descrito, obteve-se $d = 0,04859$, sendo o valor crítico igual a 0,19044.

Como d é menor que o valor crítico, aceita-se a hipótese de os dados apresentarem uma distribuição normal.

5.2.6.3.3 - Função NSCORES - Teste de normalidade

O teste de normalidade utilizando-se a função NSCORES está descrito no item 4.2.5.3.3. Aplicando-se essa função estatística aos dados do módulo de elasticidade à tração, obtem-se o seguinte gráfico:

DADOS NORM.

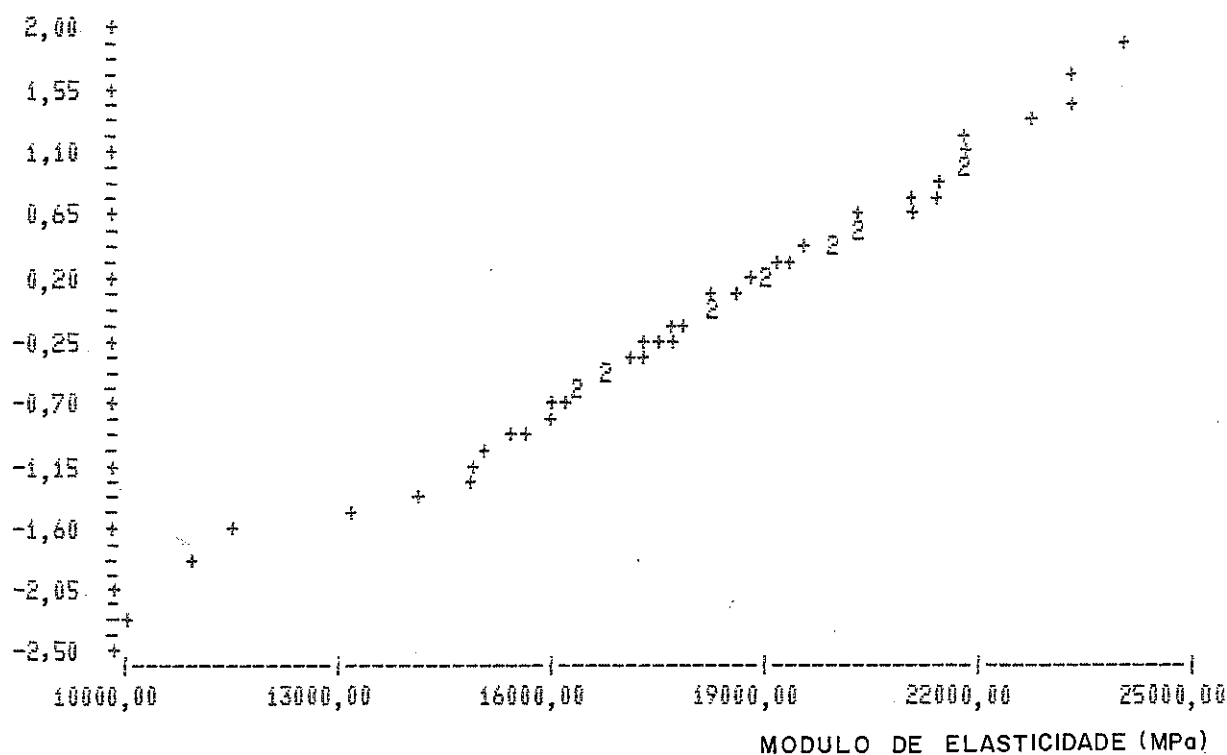


Figura 5.5. - Gráfico Estatístico de Normalidade

Analisando o gráfico acima, observa-se a tendência dos pontos a uma reta, com $r^2 = 98,76\%$. Assim, pode-se admitir que os dados apresentam uma distribuição normal.

5.2.7 - Conclusões

Analisando-se os histogramas e os resultados dos testes de aderência apresentados nos itens 5.2.6.3.1, 5.2.6.3.2 e 5.2.6.3.3., conclui-se pela aceitação da hipótese de os dados da Tabela 5.1 (módulo de elasticidade para corpos de prova de tração, madeira com umidade em torno do ponto de saturação das fibras) apresentarem uma distribuição normal.

5.3 - OUTROS DADOS

5.3.1 - Considerações iniciais

Com o intuito de ampliar o número de espécies analisadas com vistas à determinação da função densidade de probabilidade dos módulos de elasticidade à tração da madeira, foram considerados, neste item, os resultados da experimentação realizada por Hellmeister, apresentados no texto de sua dissertação de mestrado.

5.3.2 - Espécie ensaiada

Como já mencionado em 4.3.2, Hellmeister estudou a espécie Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), conífera muito utilizada na construção civil nos Estados Unidos.

5.3.3 - Resultados apresentados por Hellmeister

Os resultados dos ensaios realizados por Hellmeister - trinta e três corpos de prova, madeira verde, estão apresentados a seguir na tabela 5.4.

CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
1	8582	12	11475	23	12855
2	9075	13	11834	24	12897
3	9413	14	11848	25	13890
4	9462	15	11961	26	14031
5	9701	16	11961	27	14101
6	9962	17	12278	28	14242
7	10046	18	12313	29	14756
8	10229	19	12369	30	14756
9	10673	20	12447	31	15150
10	10701	21	12658	32	15565
11	11398	22	12707	33	16199

TABELA 5.4 - Módulos de Elasticidade à Tração para Corpos de Prova Saturados de Douglas - fir

Esses dados apresentam média aritmética (\bar{x}) igual a 12168 MPa, desvio padrão (s) igual a 2004 MPa e coeficiente de variação igual a 0,16.

5.3.4 - Análise dos resultados

A análise dos resultados apresentados por Hellmeister seguiu a mesma sequência do item 4.2.5.

5.3.5 - Histograma dos resultados

Utilizando os conceitos apresentados em 4.2.5.2, os dados foram agrupados em cinco intervalos de classe, tabela 5.5, cujo histograma é apresentado na figura 5.6.

INTERVALO DE CLASSE	FREQUÊNCIA
$x < 9700$	4
$9700 \leq x \leq 11250$	6
$11250 < x \leq 12800$	12
$12800 < x \leq 14350$	6
$x > 14350$	5

TABELA 5.5 - Dados Divididos em 5 Intervalos de Classe

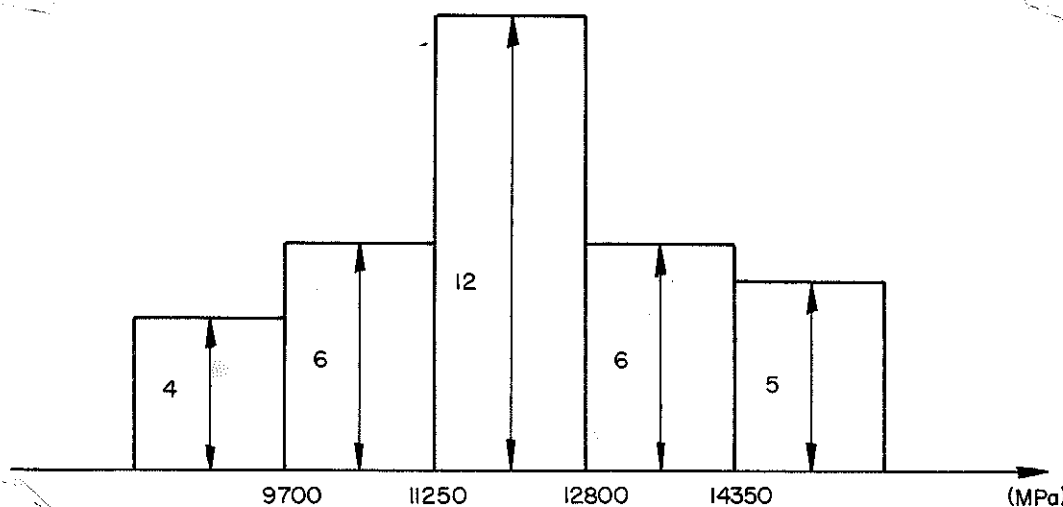


Figura 5.6 - Histograma do Módulo de Elasticidade (Douglas-Fir) 5 Intervalos de Classe

5.3.4.2 - Testes de aderência

Uma observação preliminar do histograma da figura 5.5, permite admitir a hipótese de os dados apresentarem tendência a distribuição normal. Para verificar a mencionada hipótese, foram feitos testes de aderência.

5.3.4.2.1 - Teste de aderência de Pearson

Com a idéia geral do teste mostrada no item 4.2.5.3.1 e no anexo I, o teste de Pearson foi aplicado aos dados divididos em cinco intervalos de classe.

$$A_1 : \quad x < 9700 \rightarrow n_1 = 4$$

$$A_2 : \quad 9700 \leq x \leq 11250 \rightarrow n_2 = 6$$

$$A_3 : \quad 11250 < x \leq 12800 \rightarrow n_3 = 12$$

$$A_4 : \quad 12800 < x \leq 14350 \rightarrow n_4 = 6$$

$$A_5 : \quad x > 14350 \rightarrow n_5 = 5$$

Com a média dos resultados $\bar{x} = 12168$ MPa, o desvio padrão $s = 2004$ MPa e a tabela de distribuição normal, calculam-se as probabilidades:

$$p_1 = P(x < 9700) = 0,109$$

$$p_2 = P(9700 \leq x \leq 11250) = 0,213$$

$$p_3 = P(11250 < x \leq 12800) = 0,303$$

$$p_4 = P(12800 < x \leq 14350) = 0,237$$

$$p_5 = P(x > 14350) = 0,138$$

Utilizando-se estas probabilidades, calcula-se o valor de D^2 :

$$D^2 = \sum_{i=1}^5 \frac{(n_i - 33 p_i)^2}{33 p_i} = 1,064$$

Através do conjunto de resultados, foram estimados dois parâmetros (\bar{x} e s) da população e, por isso, tem-se $r = 5 - 1 - 2 = 2$ graus de liberdade.

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, em uma tabela de qui-quadrado, obtem-se com $r = 2$ e $1 - \alpha = 0,95$, a constante $C = 5,991$.

Como $D^2 < C$, pode-se aceitar a hipótese de os dados apresentarem distribuição normal.

5.3.4.2.2 - Teste de aderência de Kolmogorov - Smirnov

Com a idéia geral do teste mostrada no item 4.2.5.3.2 e no anexo I, foi aplicado o teste de Kolmogorov - Smirnov sobre os dados da tabela 5.4. Neste caso:

$$d = 0,117$$

$$\text{valor crítico} = 0,231$$

Como $d < 0,231$, aceita-se a hipótese de os dados apresentarem distribuição normal.

5.3.4.2.3 - Função NSCORES - Teste de normalidade

Com a idéia geral da função NSCORES mostrada no item 4.2.5.3.3, o teste de normalidade apresentou o seguinte coeficiente de correlação linear:

$$r^2 = 97,27\%$$

Com esse valor, é possível admitir que os dados apresentam distribuição normal.

DADOS NORM.

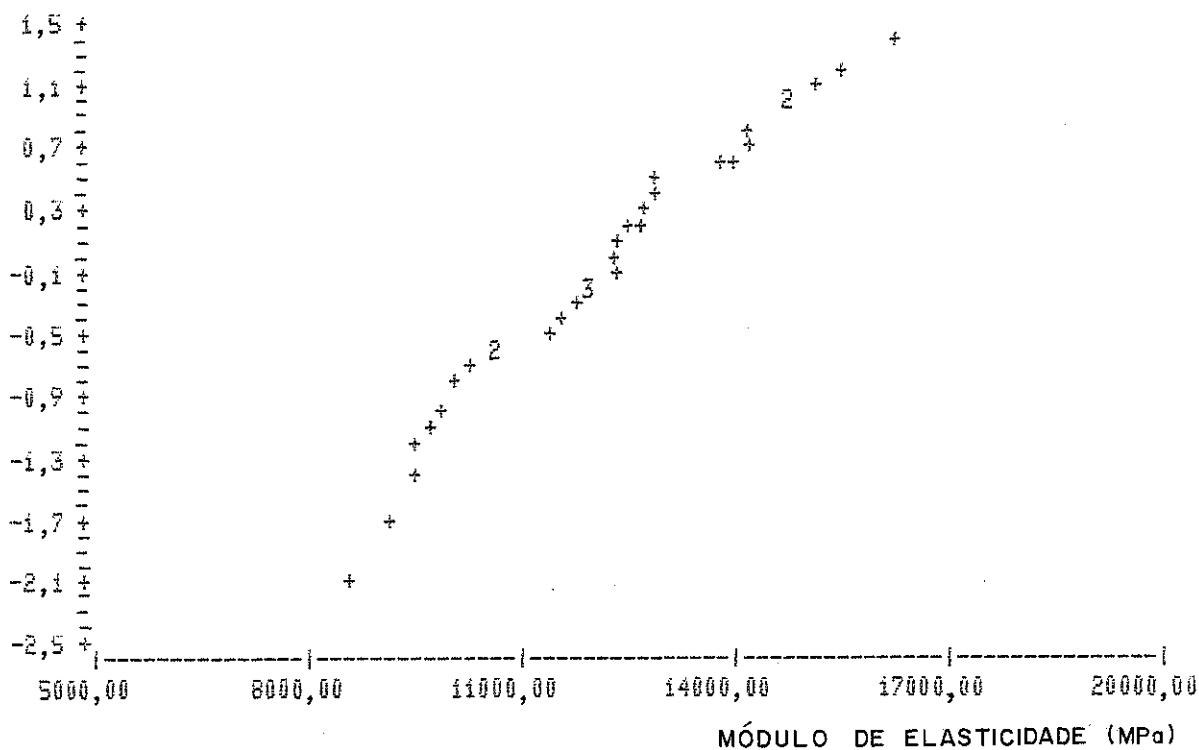


Figura 5.7 - Gráfico Estatístico de Normalidade

5.3.5 - Conclusões

Analisando-se o histograma e os resultados dos testes apresentados nos itens 5.3.4.2.1, 5.3.4.2.2 e 5.3.4.2.3, concluiu-se pela aceitação da hipótese de os dados da tabela 5.4 apresentarem distribuição normal.

6 - VALORES CARACTERÍSTICOS DE PROPRIEDADES DA MADEIRA À TRAÇÃO

6.1 - INTRODUÇÃO

Ao longo de toda a história da construção, um dos problemas mais frequentes encontrados pelos arquitetos e engenheiros foi o de estabelecer o nível de segurança para as estruturas. Atualmente, os conceitos de segurança estrutural ganham ainda maior importância e aumenta o interesse pelo seu estudo, quer voltado para uma abordagem teórica, quer dirigido para uma verificação experimental.

Segundo diversos autores, entre eles Zagottis: "segurança de uma estrutura é a capacidade que ela apresenta de suportar as diversas ações que vierem a solicitá-la durante a sua vida útil continuando a preencher as condições funcionais a que destinava a sua construção" (41). A partir da consideração da idéia qualitativa ligada ao conceito de segurança estrutural, criou-se a necessidade de serem estabelecidos métodos para a determinação quantitativa da segurança, ou seja, a determinação de valores numéricos que exprimissem os níveis de segurança para as mais diferentes situações de solicitação, às quais uma estrutura pode estar sujeita em sua vida em serviço.

Nesta busca, vários métodos têm sido utilizados. São citados:

- . Método das tensões admissíveis;
- . Método dos estado limites;
- . Métodos probabilísticos e semi probabilísticos.

No Brasil, com relação às normas para o cálculo e a execução de estruturas de madeira, tem-se a NB-11, cuja redação original data de 1951. Nesta norma a "segurança" estrutural é avaliada, preponderantemente, através do método das tensões admissíveis, mas com algumas orientações baseadas no método dos estados limites. A constatação de diversas limitações destes métodos para a determinação da segurança efetiva das estruturas, gerou a necessidade do estabelecimento de outras alternativas para a mencionada determinação. Por estas razões, pode ser observado um desenvolvimento significativo a respeito dos conceitos de segurança estrutural com

grande fundamentação estatística, e foram se definindo os chamados métodos probabilísticos.

Nos métodos das tensões admissíveis e dos estados limites é admitida a premissa de o comportamento estrutural bem como de os parâmetros associados às propriedades mecânicas dos materiais e também à geometria dos elementos estruturais se constituírem em fenômenos determinísticos. A experiência tem mostrado que o comportamento estrutural pode, em muitos casos, ser considerado como fenômeno determinístico, mas os parâmetros mecânicos e geométricos são aleatoriamente variáveis.

Nos métodos probabilísticos, a análise da segurança estrutural pode ser desenvolvida de duas maneiras, originando:

. o método probabilístico puro: onde, por hipótese, as resistências e as ações são caracterizadas através de variáveis aleatórias, e a configuração de ruína não pode ser definida deterministicamente;

. o método probabilístico condicionado: onde, ao contrário do anterior, a configuração de ruína é considerada determinística, embora mantenha-se a idéia de se associar uma variável aleatória às resistências.

Entretanto, à vista de dificuldades de várias naturezas para a aplicação do método probabilístico puro e do método probabilístico condicionado, tem sido utilizado, nesta fase considerada como de transição, o método semi-probabilístico, cujas idéias básicas são definir, ao longo do cálculo estrutural, valores:

. das ações, com pequena probabilidade de serem alcançados;

. dos esforços solicitantes, com pequena probabilidade de serem ultrapassados;

. das resistências dos materiais e das condições solicitantes limites, com pequena probabilidade de não serem alcançadas.

Segundo Fusco, "... as variáveis são tratadas como se fôssem de natureza determinística, não se explicando a aleatoriedade das mesmas, exceto em aspectos particulares do cálculo estrutural. A aleatoriedade das variáveis é considerada através do emprego de valores característicos e de valores de cálculo" (42).

Desta forma, entende-se o método semi-probabilístico como um método através do qual é possível a "introdução da segurança

no projeto estrutural, considerada a conceituação probabilística, mas que mantém, parcialmente, o esquema usual dos projetos estruturais e a utilização de coeficientes análogos aos de segurança, de modo a se constituir em um progresso em relação ao estágio anterior e a permitir a incorporação gradual da conceituação probabilística em fase de transição, que deverá culminar, no futuro, com a utilização corrente dos métodos probabilísticos" (43).

No Brasil, as estruturas de concreto por exemplo, já são projetadas de acordo com uma norma redigida com base no método semi-probabilístico de segurança estrutural. No caso das estruturas de madeira, encontra-se em fase inicial todo um conjunto de investigações teóricas e experimentais para a geração dos subsídios necessários à redação de uma nova norma, também baseada nas idéias do método semi-probabilístico.

Desta forma, os capítulos 6,7 e 8 do presente trabalho devem ser entendidos como uma apresentação preliminar de sugestões para a determinação de parâmetros ligados às propriedades de resistência e de elasticidade da madeira à tração, sob a ótica do método semi-probabilístico. Outros trabalhos deverão suceder a este e a abordagem se estenderá de modo a abranger mais amplamente todos os aspectos do problema em questão.

6.2 - RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DA MADEIRA À TRAÇÃO

O valor característico de uma variável aleatória qual - quer, associada à segurança das estruturas, é o valor que tenha uma certa probabilidade, fixada a priori, de não ser ultrapassada por valores desfavoráveis (44).

Para a determinação dos valores característicos de uma variável, é necessário o conhecimento da função de probabilidade ou da função densidade de probabilidade, em geral dependentes de um ou dois parâmetros.

Segundo o CEB (Comite Europeu-Internacional do Concreto Armado) de onde muitas sugestões são aceitas no transcórre deste trabalho, a resistência característica de materiais estruturais, admitindo distribuição normal, é calculada através da expressão:

$$f_k = f_n - ns$$

onde:

f_k = valor característico

f_m = valor médio da distribuição

n = coeficiente dependente da probabilidade de serem obtidos resultados inferiores a f_k , correspondente ao limite inferior de 5% da distribuição considerada.

s = desvio padrão da distribuição

As notações para outros parâmetros relacionados com o assunto deste trabalho também estão baseadas na norma "Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas".

f_{wtk} = resistência característica da madeira à tração

f_{wtm} = valor médio das resistências à tração da madeira

s_{wt} = desvio padrão das resistências à tração da madeira

A equação anterior pode ser utilizada se o valor da média e o valor do desvio padrão das resistências forem conhecidos.

No caso das resistências à tração da madeira, foi visto, no capítulo 4, que as mesmas seguem uma lei de distribuição normal.

Segundo Fusco: "No caso de ser satisfatória uma estimativa que com 95% de probabilidade conduza a um erro relativo do desvio-padrão de no máximo 25%, a amostra a ser empregada deverá ter pelo menos 32 exemplares" (45).

Segundo Hellmeister, em sua Tese de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, o número de árvores, estatisticamente aceitável para a caracterização de uma espécie de madeira, é três no mínimo. Tais árvores devem sempre ser obtidas por amostragem ocasional (46).

Com base no exposto e na amostragem efetivamente adotada, pode-se passar à determinação dos valores característicos da resistência à tração para:

. Jatobá - 108 ensaios realizados

$f_{wtm} = 121,9$ MPa

$s_{wt} = 30,9$ MPa

$n = 1,645$ (quantil de 5%, distribuição normal)

$$f_{wtk} = 121,9 - 30,9 \cdot 1,645$$

$f_{wtk} = 71,1 \text{ MPa}$

. Douglas-fir - 33 resultados

$$f_{wtm} = 68,8 \text{ MPa}$$

$$s_{wt} = 7,2 \text{ MPa}$$

$n = 1,645$ (quantil de 5%, distribuição normal)

$$f_{wtk} = 68,8 - 7,2 \cdot 1,645$$

$f_{wtk} = 57,0 \text{ MPa}$

6.3 - MÓDULO DE ELASTICIDADE CARACTERÍSTICO DA MADEIRA À TRAÇÃO

6.3.1 - Generalidades

Atualmente, ao se referirem ao módulo de elasticidade da madeira às diversas solicitações, as normas admitem para efeito de cálculo, o valor médio das amostras consideradas para a caracterização da espécie. Ao ser utilizado este valor para o módulo de elasticidade, é óbvia a não consideração, por parte das normas, da significativa variabilidade associada àquela propriedade. Hellmeister, para o módulo de elasticidade à tração em coníferas obteve coeficiente de variação ao redor de 10 a 15%. Hellmeister e Pigozzo, para o módulo de elasticidade à compressão de dicotiledôneas, obtiveram coeficiente de variação ao redor de 20%. Rocco Lahr, para o módulo de elasticidade à flexão de diversas espécies de dicotiledôneas, obteve coeficiente de variação ao redor de 17 a 20%.

A partir destas constatações e dos resultados apresentados no capítulo 5 deste trabalho, parece oportuno lançar aqui a idéia da utilização, para o cálculo de elementos estruturais e mesmo de estruturas de madeira, do módulo de elasticidade característico para a madeira. Evidentemente as discussões a respeito deste aspecto deverão ser mais amplas, à vista da peculiaridade de sua

essência. Outro pormenor a ser considerado nesta apresentação se refere às constantes observações de deformações excessivas, além das calculadas, em elementos estruturais de madeira (terças, deformações devidas à flexão) e mesmo em estruturas de madeira (treliças, deformações devidas à compressão, a tração e, até, as ligações) projetadas com os critérios da NB-11. Isto evidencia, entre outros aspectos, as consequências negativas do emprego, em projeto, do valor médio da amostra para o módulo de elasticidade.

Neste contexto, são apresentados, a seguir, alguns valores para o módulo de elasticidade característico de duas espécies de madeira. Servirão de ponto de partida para futuras discussões a respeito do assunto.

6.3.2 - Cálculo do módulo de elasticidade característico

Pelas conclusões obtidas no capítulo 5, sabe-se que o módulo de elasticidade à tração apresenta uma distribuição normal. Tendo-se então uma grande amostra obtida aleatoriamente (mínimo de 32 elementos), calcula-se o valor característico como visto no item 6.2.

$$f_k = f_n - ns$$

Para o módulo de elasticidade característico da madeira, sugere-se a seguinte simbologia, baseada no projeto de norma "Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas":

E_{wtk} - módulo de elasticidade característico da madeira a tração

E_{wtm} - módulo de elasticidade médio da madeira a tração

s_{wt} - desvio padrão do módulo de elasticidade da madeira a tração

Como já mencionado em 6.2, os melhores estimadores para a média e o desvio padrão de um universo normal são a média e o desvio padrão de uma grande amostra (mínimo de 32 elementos).

Utilizando-se os resultados apresentados no capítulo 5, tem-se:

Para o Jatobá: 51 resultados (grande amostra)

$$E_{wtm} = 18180 \text{ MPa}$$

$$S_{wt} = 3179 \text{ MPa}$$

$n = 1,645$ (quantil de 5% em uma distribuição normal)

$$E_{wtk} = E_{wtn} - n \cdot s_{wt}$$

$$E_{wtk} = 18800 - 1,645 \cdot 3179$$

$$E_{wtk} = 12950 \text{ MPa}$$

. Para o Douglas-fir: 33 resultados (grande amostra)

$$E_{wtm} = 12168 \text{ MPa}$$

$$s_{wt} = 2004 \text{ MPa}$$

$n = 1,645$ (quantil de 5% em uma distribuição normal)

$$E_{wtk} = E_{wtn} - n \cdot s_{wt}$$

$$E_{wtk} = 12168 - 1,645 \cdot 2004$$

$$E_{wtk} = 8871 \text{ MPa}$$

7 - VALORES DE CÁLCULO PARA RESISTÊNCIA DA MADEIRA

7.1 - INTRODUÇÃO

Devido a possíveis erros teóricos no cálculo dos esforços solicitantes, da variabilidade das características mecânicas e de deformabilidade dos materiais em laboratório e da variabilidade das características mecânicas e de deformabilidade dos materiais do laboratório para a obra, os métodos atuais de segurança estrutural recomendam, para o projeto, não o valor característico das resistências mas o chamado valor de cálculo das resistências.

O valor de cálculo das resistências tem, então, a finalidade de cobrir as incertezas não consideradas pelo cálculo estatístico.

7.2 - VALORES DE CÁLCULO

Segundo Fusco, os valores de cálculo são obtidos a partir dos valores característicos correspondentes, pela sua divisão por coeficientes de ponderação adequados (47).

No caso das resistências de cálculo, estas são obtidas a partir das resistências características, através da relação:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

onde:

f_d = resistência de cálculo

f_k = resistência característica

γ_m = coeficiente de ponderação

O coeficiente γ_m é função de três outros coeficientes: (γ_{m1} ; γ_{m2} ; γ_{m3}), segundo o Projeto de Norma 2: 02.17-004 - AÇÕES E SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS. Estes coeficientes são comentados a seguir.

γ_{m1} - Leva em conta a variabilidade da resistência efetiva, transformando a resistência característica num valor de menor probabilidade de ocorrência.

γ_{m2} - considera as diferenças entre a resistência efetiva do material da estrutura e a resistência medida convencionalmente em corpos de prova padronizados.

γ_{m3} - Considera as incertezas existentes na determinação das solicitações resistentes, seja em decorrência dos métodos construtivos, seja em virtude do método de cálculo empregado.

Portanto, $\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{m3}$ é destinado a reduzir as resistências características de modo a se obterem valores com pouca probabilidade de serem alcançados.

7.3 - ESTUDO DOS COEFICIENTES γ_{mi} PARA A MADEIRA

7.3.1 - Estudo do γ_{m1}

A resistência característica é definida como sendo o valor correspondente ao quantil inferior de 5% na distribuição normal de frequência da solicitação em estudo.

Determinando-se, através de um número suficiente de grandes amostras obtidas aleatoriamente do universo em estudo, as resistências características de cada amostra, tem-se a respectiva distribuição de frequência, suposta normal, com média igual à resistência característica do universo e desvio padrão conhecido.

Uma minoração da resistência característica pode ser considerada como o valor correspondente ao quantil inferior de 5% da distribuição de frequência das resistências características das amostras retiradas do universo original.

Em uma distribuição normal, o parâmetro z , correspondente ao quantil inferior de 5%, vale 1,645. Com ele é possível se determinar o "valor característico" da distribuição normal das resistências características obtidas com base em grandes amostras retiradas do universo original.

Nos estudo das resistências de madeira e, mais especificamente, da resistência à tração da madeira, com vistas à definição dos valores de cálculo, sugere-se, em primeira aproximação, abrindo a possibilidade para novas discussões, o valor de $\gamma_{m1} = 1,65$. Com isto, estabelece-se um ponto de partida para novas considerações a respeito deste coeficiente γ_{m1} , não apenas com relação à tração, mas também para as outras solicitações em peças de madeira.

7.3.2 - Estudo do γ_{m2}

O coeficiente γ_{m2} objetiva levar em conta as diferenças existentes na resistência do material de dimensões estruturais utilizado nas obras, e o utilizado nos ensaios, ou seja, as diferenças entre os valores obtidos nos corpos de prova e os valores efetivos nas peças de tamanho estrutural.

Não foi possível a realização de ensaios de tração em peças de tamanho estrutural no transcórrer deste trabalho. Isto se deveu ao fato de não ter sido possível, por diversas razões, o término da construção, no LaMEM, da máquina de ensaio de peças de dimensões estruturais, com aproximadamente 50 toneladas de capacidade.

Em consequência disso, um estudo preliminar a respeito do coeficiente γ_{m2} foi conduzido a partir de resultados de ensaios em corpos de prova de Douglas-fir apresentados por Hellmeister(48) e nos resultados de ensaios em peças de tamanho estrutural de Douglas-fir apresentados por Johnson e Kunesch (49) conforme tabela 7.1.

Os dados apresentados por Hellmeister se referem à resistência de corpos de prova com umidade de 10% e foram tratados como grandes amostras. A partir deles, foram determinados os valores referentes à média, ao desvio padrão e à resistência característica.

Os dados apresentados por Johnson e Kunesch se referem à resistência de peças estruturais com umidade de 10% e também foram tratados como grandes amostras. Embora não tenham sido tabelados para cada peça ensaiada, há indicações dos valores da média e do desvio padrão para cada dimensão de peças ensaiadas (2" x 4"; 2" x 6"; 2" x 8" e 2" x 10"). Deve ser observado o fato de a resistência à tração da madeira decrescer com o aumento da seção transversal da peça ensaiada.

Na tabela 7.1, estão apresentados os valores das resistências características à tração, nas diversas situações mencionadas:

DIMENSÕES (cm ²)	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À TRAÇÃO (MPa)
Corpos de Prova	68,2
2" x 4" (5,08 cm x 10,16 cm)	53,2
2" x 6" (5,08 cm x 15,24 cm)	45,5
2" x 8" (5,08 cm x 20,32 cm)	35,9
2" x 10" (5,08 cm x 25,40 cm)	35,5

TABELA 7.1 - Valores das Resistências Características à Tração - Douglas Fir - 10% de Umidade

Como referência inicial ao estudo do coeficiente γ_{m2} , foi adotada a relação entre o valor da resistência característica à tração obtida nos ensaios de corpos de prova e o valor da resistência característica à tração obtida nos ensaios de peças estruturais. Observa-se o aspecto de ser sugerido em coeficiente γ_{m2} como função da altura das peças a serem empregadas na construção.

Utilizando-se a definição anterior, chega-se aos valores de γ_{m2} mostrados na tabela 7.2, dados em função das dimensões das peças a serem utilizadas na estrutura.

DIMENSÕES (cm ²)	γ_{m2}
5,08 x 10,16	1,27
5,08 x 15,24	1,53
5,08 x 20,32	1,90
5,08 x 25,40	1,92

TABELA 7.2 - Valores de γ_{m2} em função das dimensões das Peças

Os valores da tabela 7.2 foram colocados em gráfico (figura 7.1).

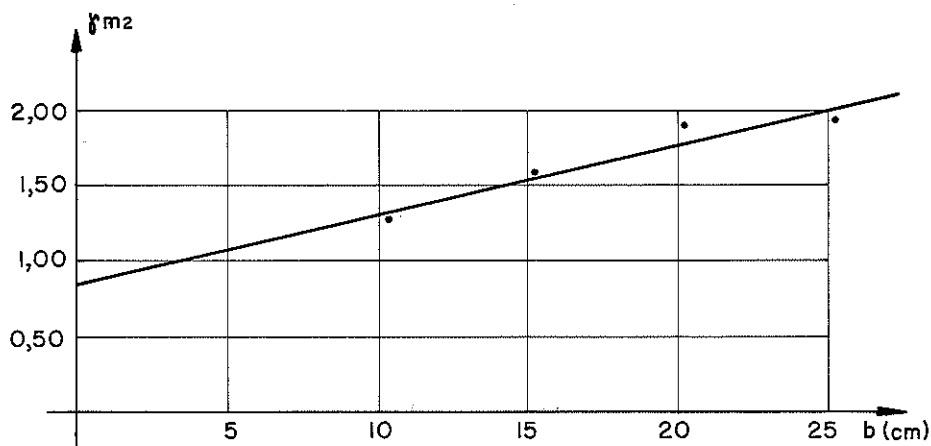


Fig. 7.1 - Gráfico da Regressão e dos Pontos Correspondentes a γ_{m2}

Através de regressão linear, obtem-se a equação:

$$\gamma_{m2} = 0,84 + 0,05 b \quad (b \text{ em cm})$$

$$r^2 = 91,50\%$$

numa tentativa de buscar uma generalização inicial para adoção de um coeficiente γ_{m2} para a tração em peças de madeira.

7.3.3 - Estudo do γ_{m3}

Os aspectos considerados para adoção de γ_{m3} foram apresentados no item 7.2.

A partir daquelas considerações, pensou-se em estabelecer uma abordagem inicial sobre o γ_{m3} , com base na experimentação desenvolvida anteriormente no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira.

Como se sabe, a maior frequência de peças tracionadas ocorre em estruturas treliçadas de madeira. Rocco Lahr estudando o comportamento do modelo reduzido (escala 1:3) de uma tesoura para a cobertura de um vão de 30 metros, concluiu que a diferença entre os valores das tensões atuantes nas barras da treliça em questão (tensões determinadas a partir do módulo de elasticidade da barra multi

plicada pela deformação específica registrada em um "strain - Meter") e as tensões calculadas não ultrapassou 7% (50). Rocco Lahr, em sua dissertação de Mestrado, estudando o comportamento de dois modelos reduzidos (escala 1 : 3) de arcos treliçados biarticulados, 27 metros de vão livre, conclui não haver diferença superior a 10% entre as tensões calculadas e as obtidas através da experimentação (51).

Outras citações de trabalhos experimentais desenvolvidos no LaMEM poderiam ser mencionadas. Todavia, não levariam a valores diferentes dos citados anteriormente.

Por estas razões, foi adotado para γ_{m3} o valor de 1,1 no caso das peças de madeiras tracionadas. A discussão sobre o assunto deve prosseguir, ampliando os subsídios para a revisão da norma brasileira a respeito das madeiras e das estruturas de madeira.

7.4 - ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DE CÁLCULO PARA O JATOBÁ

Neste item é apresentada uma estimativa da resistência à tração de cálculo para o Jatobá, a partir das considerações dos itens 7.3.1, 7.3.2 e 7.3.3. Trata-se de uma estimativa preliminar, pois baseada em parâmetros estabelecidos com base na análise de resultados de coníferas (γ_{m2}) e em outros dados observações fundadas em resultados, até certo pontos isolados.

Assim, para peças de Jatobá, de $(6 \times 16) \text{ cm}^2$, tem-se:

$$f_{wtk} = 71,1 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{m1} = 1,65$$

$$\gamma_{m2} = 1,64 \text{ (com base no item 7.3.2)}$$

$$\gamma_{m3} = 1,10$$

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{m3} = 1,65 \cdot 1,65 \cdot 1,10 = 2,98$$

$$f_{wtd} = \frac{f_{wtk}}{\gamma_m} = \frac{71,1}{2,98} = 23,9 \text{ MPa}$$

7.5 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DA RESISTÊNCIA DE CÁLCULO E DAS TENSÕES ADMISSÍVEIS (NB-11) À TRAÇÃO

Para efeito de comparação, se for considerado o critério da NB-11 atual para a determinação da tensão admissível à tração ($\bar{\sigma}_t$), ter-se-ia, para o Jatobá:

σ_f = tensão média de ruptura à flexão de corpos de prova de Jatobá (médida das árvores nºs 26, 27, 28, 29 20 e 31 apresentadas no Boletim 31, do IPT) = 134,2 MPa.

Pela NB-11, item 53:

$$\bar{\sigma}_t = 0,15 \sigma_f = 0,15 \cdot 134,2 = 20,1 \text{ MPa}$$

Observam-se resultados bastante próximos para f_{wtd} (23,9 MPa) e $\bar{\sigma}_t$ (20,1 MPa). Nesta fase de transição entre os conceitos do Método das Tensões Admissíveis e do Método Semi-Probabilístico, é até interessante a reduzida diferença entre os valores efetivamente utilizados no dimensionamento de peças de madeira submetidas à tração paralela. A tendência, no futuro, é a análise do coeficiente γ_m a partir de mais resultados experimentais, para a fixação do valor definitivo do mencionado parâmetro.

8 - INTRODUÇÃO À IDÉIA DA ACEITAÇÃO OU REJEIÇÃO DE UM LOTE DE MADEIRA

8.1 - INTRODUÇÃO

O capítulo anterior refere-se a determinação do valor característico da madeira à tração (f_{wtk}), a partir de uma grande amostra obtida aleatoriamente, com vistas à caracterização de uma espécie.

Obtido o valor característico da madeira à tração (f_{wtk}) para a espécie, o mesmo será utilizado na definição dos parâmetros de cálculo de elementos estruturais e de estruturas construídas com peças desta espécie.

Todavia, em função do porte da obra projetada, pode ser necessário o conhecimento das propriedades do lote de madeira a ser empregado na respectiva construção. Surgem questões do tipo:

. a madeira recebida apresenta qualidade dentro dos padrões requeridos pelo projeto?

. os valores das resistências utilizadas no projeto estão representados no lote em questão?

Estas questões surgem, obviamente, do fato de não haver, no país, indicações de norma para se proceder à classificação das peças de madeira para uso em estruturas. Se esta indicação fôsse disponível e sua prática obrigatória, o comprador teria condições de garantir a segurança de sua estrutura.

No Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) já foram desenvolvidos trabalhos no sentido de se sugerir um procedimento expedito para a classificação das peças estruturais para emprego em determinada obra. Fundamentalmente, não tratam da idéia da aceitação ou rejeição de um lote de madeira e sim da estimativa, através de ensaios não destrutivos, do módulo de elasticidade à flexão das peças. Conhecidos estes valores, as peças com módulo mais elevado são posicionados nas regiões mais solicitadas da estrutura e vice-versa.

Todavia, nestas condições, a idéia da aceitação ou da rejeição de um lote de madeira, ainda está associada à necessidade da realização de ensaios de laboratório.

Na tentativa de se conseguir os parâmetros característicos de resistência e de elasticidade da madeira de um lote considerado, sem grande demanda de tempo e de dinheiro, os mencionados parâmetros podem ser estimados a partir de ensaios de um pequeno número de corpo de prova.

Os itens a seguir apresentam as definições básicas, em primeiro momento, necessárias para a estimativa de valores característicos de um lote de madeira e da aceitação ou rejeição do mesmo.

8.2 - INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA

O intervalo de confiança da média de uma população com desvio padrão conhecido $\bar{\sigma}$ é determinado por:

$$\bar{x} - u (P\%) \frac{\sigma_x}{n} \leq \mu_x < \bar{x} + u (P\%) \frac{\sigma_x}{n}$$

onde:

\bar{x} = média aritmética da amostra

n = número de elementos da amostra

$u (P\%)$ = valor referente à probabilidade $P\%$

σ_x = desvio padrão da população

A determinação das propriedades à tração de uma espécie de madeira é feita a partir de um número de elementos suficientes para caracterizar uma grande amostra. Como visto no capítulo 4, as resistências à tração apresentam uma distribuição normal, podendo-se assumir, para uma grande amostra, o desvio padrão da amostra (s) como sendo igual ao desvio padrão da população.

Conseqüentemente:

$$\bar{x} - u (P\%) \frac{s}{n} \leq \mu_x \leq \bar{x} + u (P\%) \frac{s}{n}$$

8.3 - NÚMERO MÍNIMO DE CORPOS DE PROVA

À vista da inconveniência de se realizar número elevado de ensaios para se obter parâmetros de decisão em um lote, fixou -

se um número estatisticamente suficiente de corpos de prova para se determinar a média das resistências da madeira à tração do lote.

Os dados do Jatobá (Tabela 4.1 - dicotiledônea) e do Douglas-fir (Tabela 4.4 - conífera) apresentam coeficientes de variação (c.v.) 0,25 e 0,10 respectivamente. Em uma primeira aproximação foi adotado c.v. = 0,18 (média aritmética entre o coeficiente de variação da dicotiledônea e da conífera) como sendo o coeficiente de variação da madeira à tração.

Admitiu-se o desvio padrão $s = 0,18 \bar{x}$, compatível com o acima exposto, $\delta = 0,20 \bar{x}$, ou seja, aceita-se uma variação de 20% para a estimativa da média \bar{x} .

Com: $n \geq \frac{t_{05}^2 s^2}{\delta^2}$, sendo t_{05} o valor de t (tabelado) para um nível de segurança de 95% e 5 graus de liberdade e igual a 2,57, obteve-se $n \geq 6$.

Aceita-se assim, como suficiente, o ensaio de 6 corpos de prova para a determinação da média da resistência da madeira à tração de um lote.

8.4 - DETERMINAÇÃO DO f_{wtk} COM O NÚMERO MÍNIMO DO CORPO DE PROVA

Utilizando-se o número mínimo de corpos de prova definido no item anterior, fica determinada a média aritmética da resistência da madeira em estudo, não se podendo afirmar nada a respeito do desvio padrão, pois o número de corpos de prova é reduzido.

Sem o conhecimento do desvio padrão não é possível determinar o f_{wtk} através da expressão:

$$f_{wtk} = f_{wtn} - n s_{wt}$$

mesmo utilizando-se n obtido pela distribuição de Student ($f_{wtk} = f_{wtn} - t(5\%) s_{wt}$, com s_{wt} = desvio padrão da amostra), pois, segundo Fusco, a baixa precisão da estimativa do desvio padrão não pode ser compensada pela alteração da função que rege a distribuição do universo (52).

8.5 - ESTIMADOR PARA O f_{wtk} DE UM LOTE

Com a impossibilidade do cálculo do f_{wtk} pelo não conhecimento do desvio padrão da amostra, surgem considerações a respeito da possibilidade de estimar f_{wtk} de um lote através de estimadores não dependentes do desvio padrão.

Introduzindo a idéia, prevendo-se o prosseguimento da discussão e estudos posteriores, sugere-se, em primeira aproximação, o emprego de um estimador, para a madeira, análogo ao indicado pela NB-1 (Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado) pelo qual a resistência característica é dada por:

$$f_{k,est} = k_a f_1$$

com:

n = número de elementos da amostra (se n é ímpar despreza-se o menor);

m = metade do número n de elementos;

$f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_m \leq \dots \leq f_n$ = resistências dos n elementos.

$f_{k, est}$ = valor estimado da resistência característica.

Para o caso da resistência da madeira à tração, foi determinado o número mínimo de 6 ensaios de corpos de prova retirados aleatoriamente. Com resultados $f_{wt1} \leq f_{wt2} \leq f_{wt3} \leq f_{wt4} \leq f_{wt5} \leq f_{wt6}$ e a resistência estimada dada por:

$$f_{wtk,est} = k_a f_{wt1}$$

onde para $c.v. = 0,18$ e 6 corpos de prova, $k_a = 0,89$.

8.6 - UM CRITÉRIO DE DECISÃO

Com a estimativa do f_{wtk} de um lote de madeira e o conhecimento do f_{wtk} da espécie utilizado no projeto, necessita-se de um critério que possibilite aceitar ou rejeitar o lote de madeira.

Uma primeira idéia para esse critério seria: realizando-se 6 ensaios com corpos de prova obtidos aleatoriamente do lote ,

tem-se uma estimativa da resistência média do lote. Se a resistência média do lote não se encontrar dentro do intervalo de confiança da média da população o lote deveria ser rejeitado.

No caso da média da amostra encontrar-se dentro do intervalo da média da população, estima-se o valor da resistência característica da madeira à tração: $f_{wtk,est} = k_a f_{wt1}$ devendo, em uma primeira aproximação ser inferior a:

$$f_{wtk,est} \leq 0,85 \frac{\sum_{i=1}^6 f_{wti}}{6}$$

caso em que se encontra a estimativa da resistência característica à compressão do concreto no índice de amostragem reduzida de controle sistemático (6 corpos de prova).

Estando o $f_{wtk,est}$ dentro do especificado acima, o lote será aceito se $f_{wtk,est} \geq 0,9 f_{wtk}$, como Fusco especifica para o caso do concreto (53).

Caso $f_{wtk,est} < 0,9 f_{wtk}$, rejeita-se o lote ou altera-se o projeto, com $f_{wtk,est}$ no lugar do f_{wtk} até então utilizado.

8.7 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Com base nos dados da Tabela 4.1, o Jatobá apresenta o intervalo de confiança da média das resistências à tração:

$$121,9 - 1,645 \frac{30,9}{108} \leq \mu_x \leq 121,9 + 1,645 \frac{30,9}{108}$$

$$117 \leq \mu_x \leq 126,79 \quad \text{com } 90\% \text{ de confiança}$$

Sorteando-se, desses 108 resultados, 6 valores aleatoriamente, obtem-se, por exemplo:

$$f_{wt_1} = 80,3 \text{ MPa}$$

$$f_{wt_2} = 93,8 \text{ MPa}$$

$$f_{wt_3} = 136,9 \text{ MPa}$$

$$f_{wt_4} = 143,6 \text{ MPa}$$

$$f_{wt_5} = 147,9 \text{ MPa}$$

$$f_{wt_6} = 148,5 \text{ MPa}$$

$$f_{wt,est} = 71,5 < 0,85 f_{wtm} = 80,06 \text{ MPa}$$

que apresentam média $\bar{x}=125,2$ MPa.

Como a média da amostra se encontra dentro do intervalo de confiança da média da população, estima-se o valor de f_{wtk} .

$$f_{wtk,est} = 0,89 f_1 = 0,89 \cdot 80,3 = 71,5 \text{ MPa}$$

$$f_{wtk} = 71,5 \geq 0,9 \cdot 71,1 = 64,0 \text{ MPa}$$

Portanto o lote é aceito e o projeto não é modificado.

8.8 - COMENTÁRIOS

Como já dito anteriormente, ressalta-se o fato de o presente capítulo ter como objetivo lançar a idéia da aceitação ou rejeição de um lote de madeira no que, até os dias atuais, as normas brasileiras que tratam da madeira são omissas.

A sugestão, para exposição de idéia, foi baseada em um dos critérios da NB-1, pois se trata de um assunto amplamente discutido e estudado para o concreto e, por isso, o mesmo pode-se tornar o ponto de partida para a discussão e o estudo do problema aplicado à madeira.

9 - INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO CORPO DE PROVA AO LONGO DE UMA PEÇA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

9.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante a análise dos resultados dos ensaios realizados, uma questão foi levantada: a posição de retirada dos corpos de prova, ao longo do comprimento de uma peça (3 a 4 metros) influi significativamente na resistência à tração destes mesmos corpos de prova?

A questão ganha ainda maior interesse quando se cogita sugerir, para a redação do novo texto do Método Brasileiro para Ensaios Físicos e Mecânicos de Madeiras, uma amostragem alternativa para a determinação das características da madeira, com base na proposta de Hellmeister, a partir de peças de madeira de dimensões estruturais.

À vista destas considerações, foi planejado e executado um conjunto de ensaios. Neste capítulo é apresentada a descrição do material e da metodologia empregados, e desenvolvida a análise estatística para a avaliação da referida influência.

9.2 - MATERIAL EMPREGADO

Para a obtenção dos corpos de prova de tração, foram utilizadas três peças de madeira, seção (6 x 6) cm² e 350 cm de comprimento. Foi escolhida a espécie Jatobá. De cada peça foram retirados sete corpos de prova, numerando-se as suas posições ao longo das peças, de acordo com as indicações da figura 9.1.

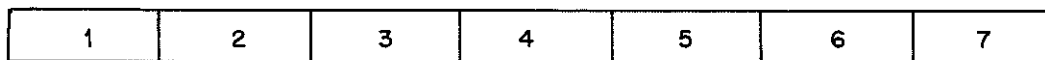


Fig. 9.1 - Posição dos Corpos de Prova ao longo de uma Peça

Conforme já foi dito anteriormente, foram ensaiados corpos de prova do tipo CP I, e a madeira apresentava porcentagem de umidade ao redor do ponto de saturação das fibras.

9.3 - MÉTODO DE ENSAIO

Foi empregada a metodologia de ensaio citada no item 3.3.1 e os corpos de prova foram ensaiados até a ruptura.

9.4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

9.4.1 - Peça nº 1

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 9.1.

POSIÇÃO	RESISTÊNCIA (MPa)
1	125,9
2	124,8
3	122,2
4	116,6
5	148,7
6	198,1
7	*

* O Corpo de Prova Apresentou Defeito de Confecção.

Tabela 9.1 - Resultados Obtidos nos Ensaio da Peça nº 1

Os fundamentos estatísticos aqui utilizados são mostrados no Anexo I. Foi empregado o critério de Chauvenet de aceitação e rejeição de medidas. Para tal, é necessário que os dados apresentem distribuição normal (capítulo 4).

Por esse critério: $P = \frac{1}{2n}$, onde:

P = valor que a probabilidade de ocorrência do maior desvio não deve exceder.

n = número de elementos em estudo

$$P = \frac{1}{2n} = 0,0833 \quad \xrightarrow{\text{distribuição normal}} \quad Z' = 1,73$$

$$\bar{x} = 139,4 \text{ MPa}$$

$$s = 30,8 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad 86,1 \leq x \leq 192,7$$

$$Z' \cdot s = 53,3 \text{ MPa}$$

Ou seja, valores fora do intervalo (86,1; 192,7) devem ser eliminados da análise estatística. Na peça em estudo, o valor obtido no ensaio da posição 6 foi eliminado.

Aplicando-se o critério novamente, nenhum outro valor foi eliminado.

Através de uma regressão linear, obtém-se:

$$f_{wt} = 3,74 p + 116,4$$

$$\bar{x} = 127,6 \text{ MPa}$$

$$s = 12,3 \text{ MPa}$$

$$r^2 = 23,1\%$$

com

p = posição do corpo de prova na peça

f_{wt} = resistência da madeira à tração

9.4.2 - Peça nº 2

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 9.2

POSIÇÃO	RESISTÊNCIA MPa
1	118,2
2	127,4
3	109,8
4	122,4
5	134,0
6	142,5
7	97,2

Tabela 9.2 - Resultados Obtidos nos Ensaio da Peça nº 2

Com o procedimento utilizado no item 9.4.1, obtêm-se:

$$P = \frac{1}{2n} = 0,071 \text{ distribuição normal} \quad Z' = 1,80$$

$$\bar{x} = 121,6 \text{ MPa}$$

$$s = 15,1 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad 94,4 \leq x \leq 148,8$$

$$Z' \cdot s = 27,2 \text{ MPa}$$

Todos os valores obtidos nos ensaios da peça nº 2 encontram-se dentro do intervalo (94,4 ; 148,8) e, portanto, nenhum valor foi eliminado.

Através de uma regressão linear, obtêm-se:

$$f_{wt} = - 0,31 p + 122,9$$

$$\bar{x} = 121,6 \text{ MPa}$$

$$s = 15,1 \text{ MPa}$$

$$r^2 = 0,2\%$$

9.4.3 - Peça nº 3

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 9.3:

POSIÇÃO	RESISTÊNCIA (MPa)
1	121,0
2	154,6
3	145,8
4	157,6
5	153,2
6	144,4
7	124,9

Tabela 9.3 - Resultados Obtidos nos Ensaios da Peça nº 3

Com o procedimento utilizado no item 9.4.1, obtem-se:

$$P = \frac{1}{2n} = 0,071 \quad \frac{\text{distribuição}}{\text{normal}} \quad Z' = 1,80$$

$$\bar{x} = 143,1 \text{ MPa}$$

$$s = 14,6 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad 116,9 \leq x \leq 169,3$$

$$Z' \cdot s = 26,2 \text{ MPa}$$

Todos os valores obtidos nos ensaios da peça nº 3 encontram-se dentro do intervalo (116,9; 169,3) e, portanto, nenhum resultado foi eliminado.

Através de regressão linear, obtem-se:

$$f_{wt} = 0,5 p + 143,3$$

$$\bar{x} = 143,1 \text{ MPa}$$

$$s = 14,6 \text{ MPa}$$

$$r^2 = 0,005\%$$

9.5 - CONCLUSÕES

Da análise de resultados efetuada, mesmo admitindo um número relativamente reduzido de peças ensaiadas, podem ser observados valores extremamente baixos para os coeficientes de correlação 23,1% para a peça nº 1, 0,2% para a peça nº 2; 0,005% para a peça nº 3. Estes valores definem a influência não significativa da posição de retirada do corpo de prova, ao longo do comportamento de uma peça de madeira, na respectiva resistência à tração.

Com isto, fica respondida a questão levantada no item 9.1 e estabelecido mais um subsídio importante para a adoção da amostragem sugerida por Hellmeister para a próxima redação do MB-26.

10 - UMA TENTATIVA DE ESTIMAR O MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRACÇÃO A PARTIR DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO DE PEÇAS DE MADEIRA

10.1 - INTRODUÇÃO

O módulo de elasticidade à tração da madeira é um parâmetro imprescindível para o cálculo da flecha em estruturas treliçadas - em geral desenvolvido com base no Princípio dos Trabalhos Virtuais-e, também, para uma avaliação da rigidez de ligações estruturais de peças de madeira.

Todavia, os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade à tração de corpos de prova de madeira são de realização muito mais demorada e difícil quando comparados com os ensaios para a determinação unicamente da resistência à tração do corpo de prova. Entre as dificuldades, podem ser citadas:

. na montagem do ensaio, a fixação dos relógios comparadores é trabalhosa; pequenos desajustes podem introduzir erros significativos nas leituras das deformações durante a realização propriamente dita do ensaio; tais erros poderão conduzir a valores incompatíveis do módulo de elasticidade;

. no ensaio, eventuais defeitos dos corpos de prova, não detectados inicialmente, poderão provocar sua ruptura precoce, às vezes com carga muito baixas, não havendo tempo suficiente para a retirada dos relógios comparadores; nestes casos, podem ocorrer queda e avarias indesejadas nestes instrumentos;

. na leitura das deformações, são necessários dois auxiliares, além de um terceiro para a operação da máquina de ensaio; este fato provoca um aumento significativo no custo da mão de obra para a realização dos ensaios.

Com base nestas constatações, pensou-se em utilizar a resistência à tração da madeira como estimador para o respectivo módulo de elasticidade à tração. Nestas condições, optou-se pela avaliação de uma série de ensaios, a seguir descrita, para a obtenção de subsídios que possibilitem a verificação da adequabilidade da hipótese aventada.

10.2 - MATERIAL E MÉTODO

10.2.1 - Material utilizado nos ensaios

Para esta fase do trabalho, foram considerados quarenta corpos de prova, tipo I, ensaiados à tração. Por razões já mencionadas no item 3.3.2, foram escolhidas peças de Jatobá para a retirada dos corpos de prova. Estes apresentavam porcentagem de umidade ao redor do ponto de saturação das fibras.

10.2.2 - Metodologia de ensaio

Para este conjunto de ensaios, foi empregada a metodologia já descrita no item 3.3.1 e foram obtidos os valores da resistência e do módulo de elasticidade à tração da madeira.

10.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Na tabela 10.1 são apresentados os resultados das resistências à tração (f_{wt}) e os respectivos módulos de elasticidade (E_{wt}) de quarenta corpos de prova ensaiados.

CORPO DE PROVA Nº	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	CORPO DE PROVA Nº	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
1	135,6	18335	11	175,9	19937
2	169,3	23391	12	109,7	14969
3	128,5	16456	13	136,9	19340
4	166,5	21860	14	143,6	17575
5	197,7	21361	15	100,0	17328
6	136,2	19043	16	117,7	15909
7	93,8	14157	17	123,7	19937
8	149,5	18773	18	165,9	23382
9	131,0	16146	19	97,3	19498
10	138,0	17889	20	111,3	18305

TABELA 10.1 - RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

continua

continuação:

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
21	120,5	20223	31	90,3	13202
22	136,8	21750	32	131,5	17714
23	126,5	21024	33	114,9	17614
24	144,6	22840	34	103,3	19101
25	120,9	21757	35	131,8	16701
26	114,3	21143	36	149,4	21813
27	130,8	20255	37	148,1	18930
28	131,3	20232	38	115,3	18172
29	110,3	16767	39	118,8	17133
30	188,4	24124	40	125,6	16433

TABELA 10.1 - Resultados das Resistências à Tração e Módulo de Elasticidade

10.4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Na análise estatística dos resultados, foram utilizados os conceitos de regressão múltipla, apresentados com mais detalhes no anexo I. Com o objetivo de se determinar a equação estatisticamente mais adequada para representar a relação entre a resistência e o módulo de elasticidade à tração, foram pesquisadas mais de trinta funções envolvendo os dois mencionados parâmetros. Foram tentadas relações envolvendo logaritmos, exponenciais, polinômios na variável resistência, polinômios na variável logaritmo da resistência, raízes, entre outras.

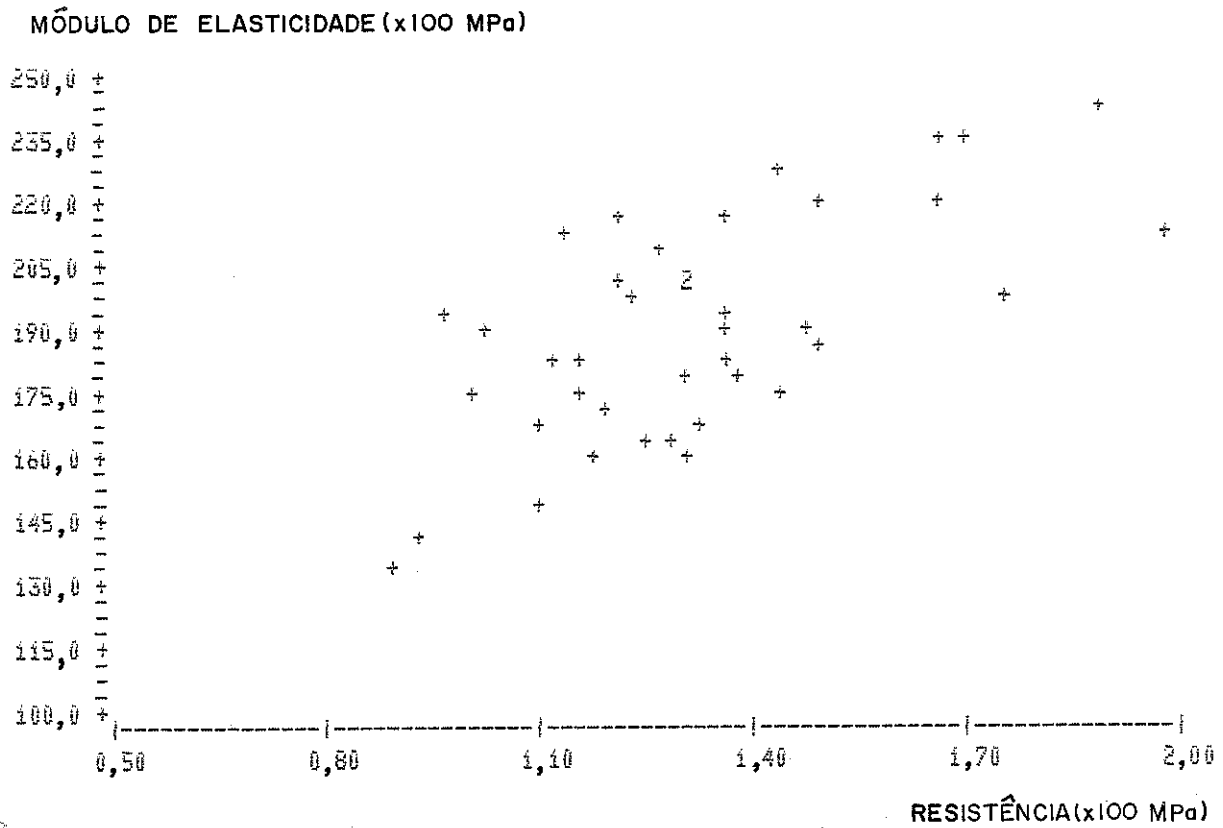


Figura 10.1 - Gráfico do Módulo de Elasticidade x Resistência

Inicialmente, a equação polinomial abaixo, no logaritmo da resistência, pareceu a de melhor ajuste aos pontos (na figura 10.1 estão apresentados em gráfico, os pontos de f_{wt} e E_t) obtidos da experimentação:

$$E_{wt} = 166 + 287 (\log f_{wt}) - 858 (\log f_{wt})^2 + 2226 (\log f_{wt})^3$$

com coeficiente de correlação linear $r^2 = 43,63\%$

A análise dos resíduos, figura 10.2, revela uma certa tendência, evidenciando, com clareza, a necessidade de ser introduzi-do na equação pelo menos mais um termo linear. Na continuação, foi considerado o termo f_{wt} .

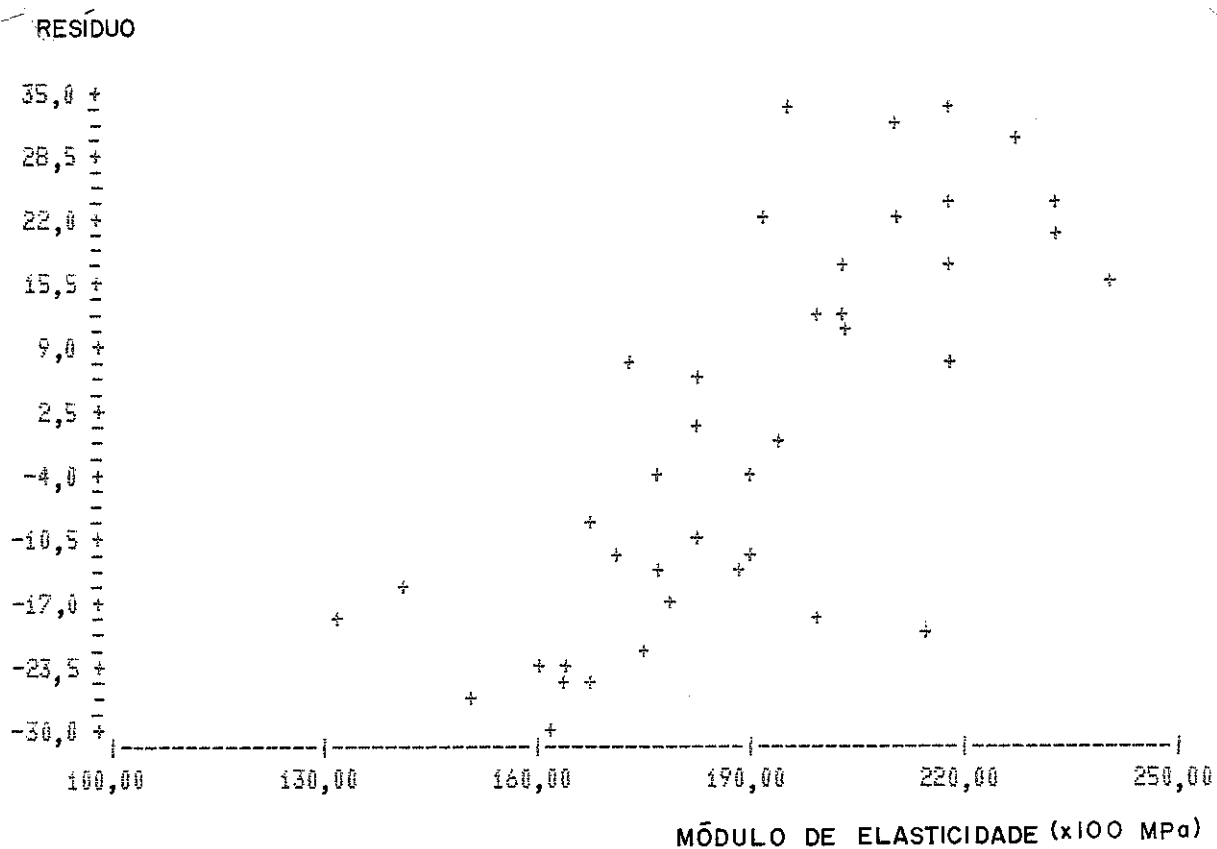


Figura 10.2 - Gráfico de Resíduos

A equação polinomial relacionando E_{wt} e f_{wt} fica sendo:

$$E_{wt} = 62238 - 62064 f_{wt} + 143358 (\log f_{wt}) + \\ + 157335 (\log f_{wt})^2 + 171917 (\log f_{wt})^3$$

com coeficiente de correlação linear $r^2 = 49,78\%$

A análise dos resíduos, figura 10.3, ainda revela certa tendência, evidenciando a necessidade de ser considerado outro parâmetro para melhor ajuste dos dados.

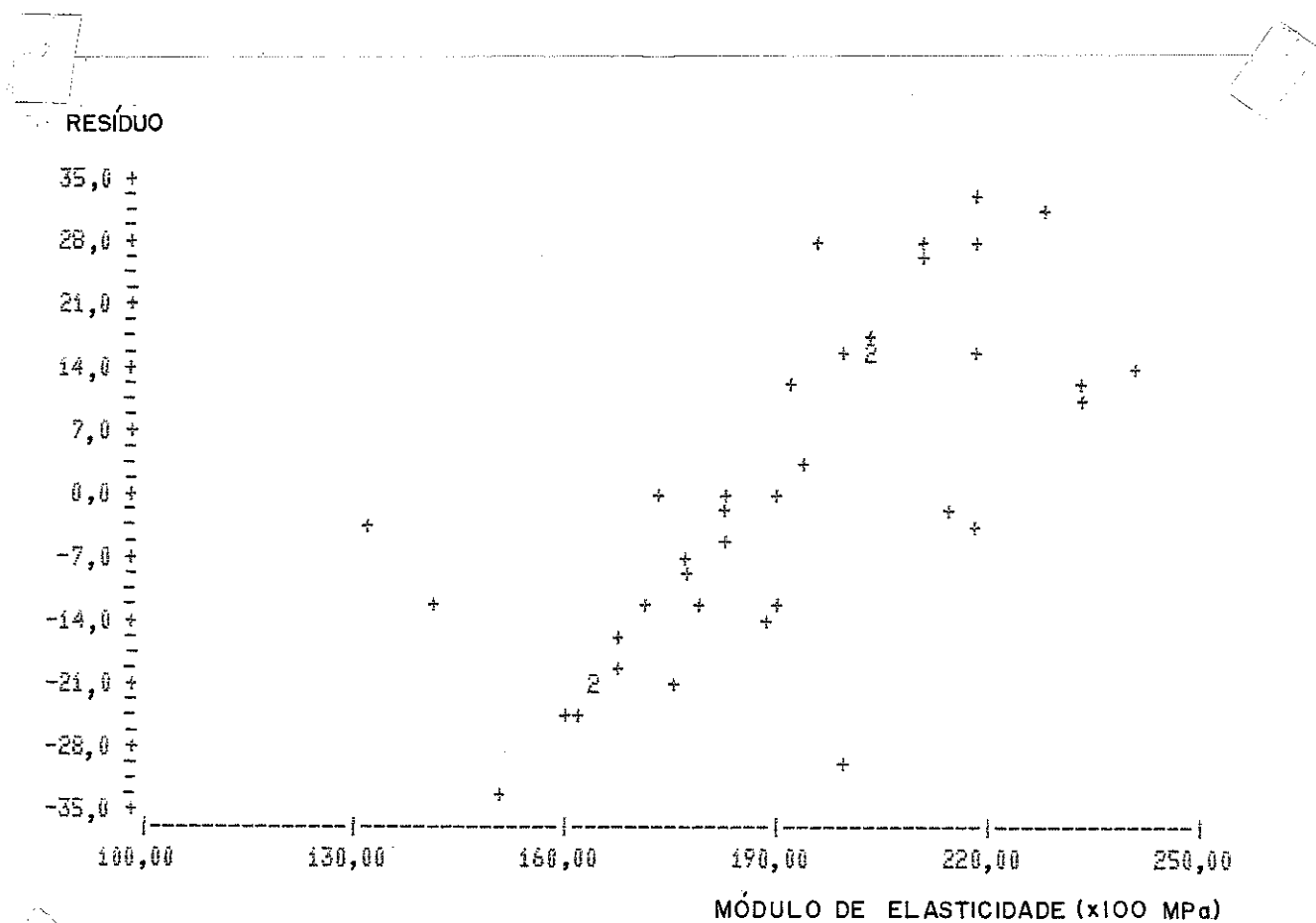


Figura 10.3 - Gráfico de Resíduos

Apenas com os resultados experimentais disponíveis, não foram possíveis novas tentativas para obter valor mais elevado de r^2 , bem como distribuição não tendenciosa dos resíduos.

10.5 - CONCLUSÕES

A partir das considerações do item 10.4, pode - se concluir, com base nos resultados experimentais considerados, que a resistência à tração de uma peça de madeira, isoladamente, não se constitui em um estimador aceitável do módulo de elasticidade à tração.

Corroboram para esta afirmação dois fatos:

. A obtenção de um valor de r^2 relativamente baixo, na verificação do ajuste da expressão relacionando E_{wt} e f_{wt} .

. A impossibilidade, confirmada ao longo de muitas tentativas, de se eliminar a tendência no gráfico dos resíduos, mantendo-se a configuração de falta de uma variável para completar a análise.

Sugere-se, no prosseguimento da pesquisa a respeito da tração em peças de madeira, a realização de outras séries de ensaios envolvendo outras espécies de madeira com vistas à consideração de outros parâmetros físicos e ou mecânicos da madeira, para permitir, se possível, a estimativa do módulo de elasticidade à tração a partir de ensaios mais simples.

11 - CONCLUSÕES

No transcorrer da pesquisa desenvolvida a respeito da Tração Paralela em Peças de Madeira, muitas observações importantes foram registradas e apresentadas no texto deste trabalho. Entre as conclusões, devem ser aqui ressaltadas as mais significativas:

. Para a realização dos ensaios de laboratório, devem ser adotados os corpos de prova do tipo CP I, pois, entre os modelos estudados, se comportou mais favoravelmente, recebendo poucas influências distintas da tração durante a aplicação da carga, até a ruptura, na máquina universal de ensaios utilizada;

. Para a caracterização da resistência à tração de uma espécie de madeira, é necessária a realização de um número de ensaios tal que se configure uma grande amostra, isto é, pelo menos trinta e dois. Com base na proposta de Hellmeister para amostragem aleatória, a partir de peças de dimensões estruturais, para a determinação das propriedades físicas, de resistência e de elasticidade da madeira, os mencionados corpos de prova devem ser retirados de, pelo menos, três árvores escolhidas ao acaso.

. A partir dos dados da experimentação realizada e de resultados experimentais apresentados na literatura, ficou evidenciada o fato de as resistências à tração e os módulos de elasticidade à tração apresentarem distribuição normal. Com isto torna-se possível estabelecer os valores característicos das resistências à tração para a madeira e discutir o interesse de se empregar os valores característicos para o módulo de elasticidade à tração da madeira.

. As idéias a respeito dos valores de cálculo, com base na adoção do coeficiente de ponderação γ_m como um produto dos coeficientes γ_{m1} , γ_{m2} e γ_{m3} , devem continuar em discussão, para se chegar às necessárias definições dos respectivos valores numéricos - aqui já estimados para o caso de peças tracionadas - para todas as solicitações envolvendo os elementos estruturais de madeira. O mesmo raciocínio e as mesmas observações cabem para a idéia referente à aceitação ou rejeição de um lote de madeira, ora introduzida.

. A resistência à tração da madeira, ao longo do comprimento de peças estruturais (3 a 5 metros) não apresenta variação es

taticamente significativa. Esta conclusão corrobora para a adoção, proposta por Hellmeister, a respeito da amostragem aleatória, a partir de peças de dimensões estruturais, para a determinação das propriedades físicas, de resistência e de elasticidade da madeira.

. A resistência à tração da madeira não é, isoladamente, um parâmetro suficiente para estimar adequadamente o módulo de elasticidade à tração, sendo necessária a introdução de um novo parâmetro para complementar a análise e definir o relacionamento entre a resistência e a elasticidade à tração da madeira.

12. PROPOSTA PARA A REVISÃO DO MB-26 E DA NB-11

12.1. PROPOSTA PARA A REVISÃO DO MB-26

Com base no presente trabalho sugere-se, para a revisão do MB-26, que o mesmo deva conter um item relativo aos ensaios de tração com as seguintes recomendações:

- . Geometria do corpo de prova: figura 12.1;
- . Número mínimo de corpos de prova: 32, obtidos aleatoriamente de pelo menos 3 árvores;
- . Umidade dos corpos de prova no momento do ensaio: os corpos de prova a serem ensaiados deverão apresentar umidade igual ou superior ao ponto de saturação das fibras (madeira verde);
- . Velocidade de aplicação de carga: de modo tal a se obter 10 MPa/min;
- . Ancoragem dos corpos de prova: as máquinas de ensaio de corpos de prova de tração deverão apresentar sistema de ancoragem semelhante ao mostrado na figura 12.2;
- . Determinação da Resistência à Tração:
 - área da menor seção transversal do corpo de prova :
 $A = b.e$
 - carga da ruptura: P
 - resistência à tração: $f_{wt} = P/A$
 - resistência característica da madeira à tração (f_{wtk}):
 $f_{wtk} = f_{wtm} - 1,645 s_{fwt}$
 - f_{wtm} = média aritmética das resistências da madeira à tração, dos pelo menos trinta e dois corpos de prova ensaiados.
 - s_{fwt} = desvio padrão das resistências da madeira à tração.
- . Determinação do Módulo de Elasticidade à Tração (E_{wt})
 - a leitura das deformações deve ser feita a cada carga de

1000 N aplicada; para efeito de cálculo, utiliza-se a média das duas leituras registradas, por exemplo, em relógios comparadores de 0,001mm de precisão com distância entre os pontos de fixação de 100 mm;

- as leituras das deformações, devem ser feitas abaixo do limite de proporcionalidade;
- o módulo de elasticidade à tração pode ser obtido através de regressão linear entre as tensões aplicadas e as respectivas deformações específicas;
- módulo de elasticidade característico (E_{wtk}):

$$E_{wtk} = E_{wtm} - 1,645 s_{Ewt}$$

E_{wtm} = média aritmética dos módulos de elasticidade à tração, dos pelo menos trinta e dois corpos de prova ensaiados.

s_{Ewt} = desvio padrão dos módulos de elasticidade à tração.

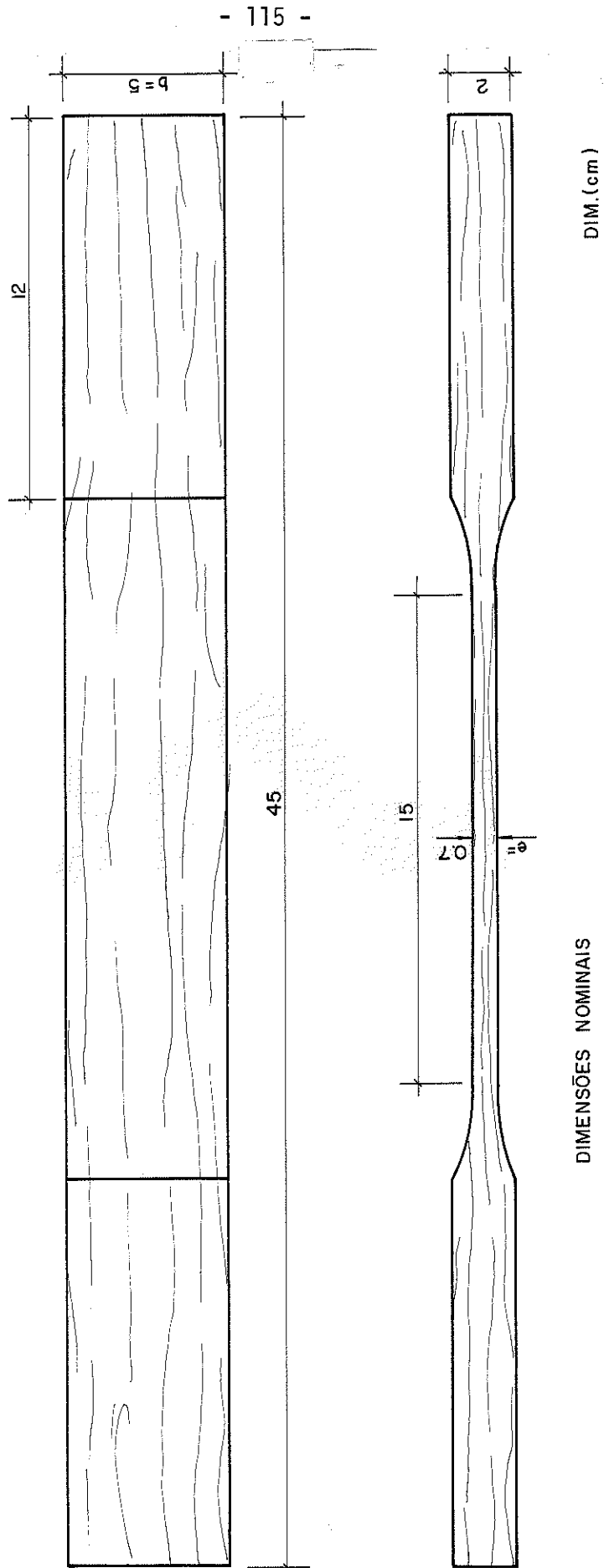


Figura 12.1 - Geometria do Corpo de Prova

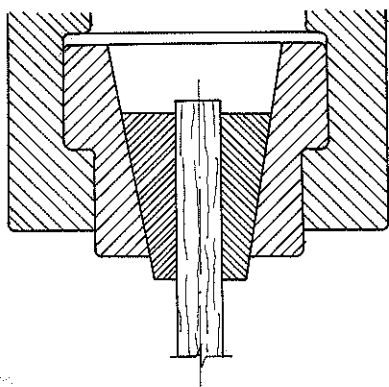


Figura 12.2 - Esquema de Ancoragem

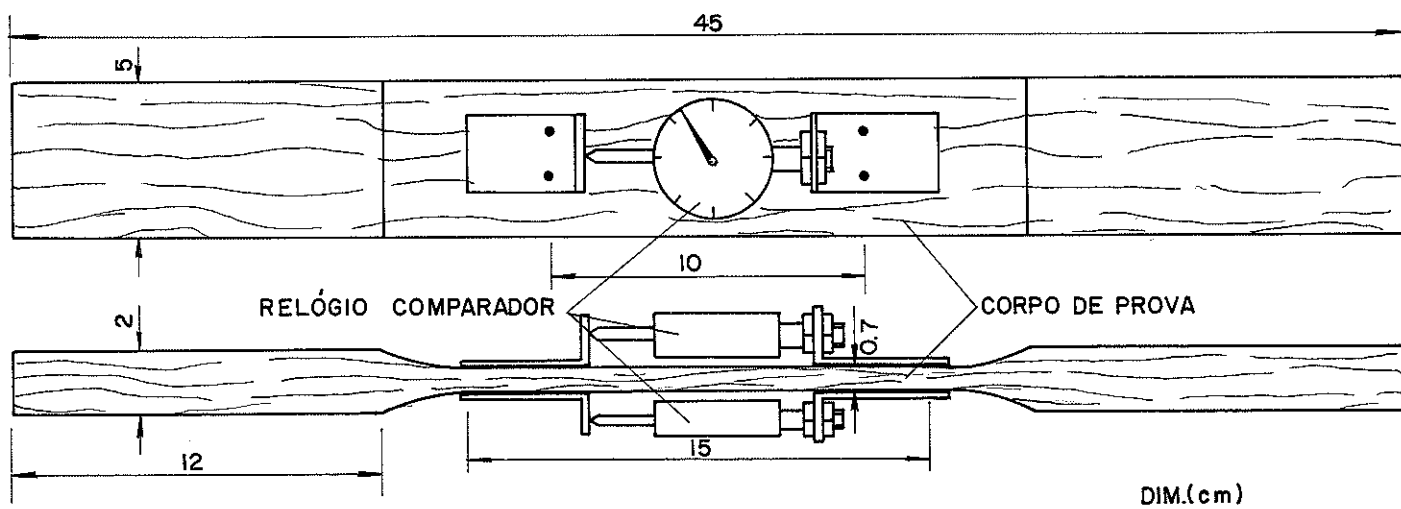


Figura 12.3 - Esquema de Colocação dos Relógios Comparadores

12.2. PROPOSTA PARA REVISÃO DA NB-11

Com base no presente trabalho, no dimensionamento de uma peça de madeira submetida à tração paralela, deve se considerar a resistência de cálculo da madeira à tração (f_{wtd}), ou seja, a máxima sollicitação provável na peça não deve superar f_{wtd} . Este parâmetro é obtido pela divisão de f_{wtk} pelo coeficiente γ_m , resultado da multiplicação de tres outros coeficientes: $\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{m3}$.

São sugeridos os seguintes valores:

$$\gamma_{m1} = 1,65$$

$$\gamma_{m2} = \text{função da largura da peça tracionada}$$
$$(\gamma_{m2} = 0,84 + 0,05b \text{ com } b \text{ em cm})$$

$$\gamma_{m3} = 1,1$$

$$f_{wtd} = \frac{f_{wtk}}{\gamma_m}$$

No cálculo das deformações em peças tracionadas, deve ser considerado o módulo de elasticidade característico, obtido conforme indicado em 12.1.

13. PROPOSTA PARA A REALIZAÇÃO DE TRABALHOS DE PESQUISA
EM CONTINUAÇÃO AO AQUI APRESENTADO

No desenvolvimento deste trabalho, foram abordados diversos aspectos relacionados com a tração paralela em peças de madeira. Entretanto, alguns tópicos não abordados também podem se constituir em interessantes contribuições para a revisão do MB-26 e da NB-11, além de, evidentemente, proporcionar mais subsídios para o melhor conhecimento da madeira como material para fins estruturais. Entre estes tópicos podem ser citados:

13.1 - Estudo das relações entre a resistência da madeira à tração e propriedades físicas, como a umidade e a densidade. O interesse em se estabelecer tais relações reside na criação de condições para se estimar a resistência da madeira a partir de determinações extremamente simples, como da umidade e da densidade.

13.2 - Estudo das relações entre o módulo de elasticidade à tração e as propriedades físicas, como a umidade e a densidade da madeira. O interesse de se estabelecer tais relações é análogo ao mencionado no item 12.1.

13.3 - Estudo das relações entre a resistência da madeira à tração e as propriedades da resistência e de elasticidade à flexão da madeira. O interesse em se estabelecer tais relações é análogo ao mencionado no item 12.1.

13.4 - Estudo das relações entre o módulo de elasticidade da madeira à tração e as propriedades de elasticidade à flexão e à compressão da madeira. O interesse em se estabelecer tais relações é análogo ao mencionado no item 12.1.

13.5 - Continuação da pesquisa teórica e experimental a respeito do coeficiente de ponderação γ_m , e dos respectivos desdobramentos, para se estabelecer, com maior embasamento, os valores de cálculo para a resistência da madeira à tração.

14 - A N E X O I

Neste anexo, estão sucintamente apresentados diversos dos conceitos estatísticos utilizados do decorrer do trabalho.

14.1 - POPULAÇÃO

Dado um experimento para estudo, define-se população como sendo o conjunto de todos os resultados possíveis desse experimento.

14.2 - AMOSTRA

Da população em estudo, define-se uma amostra como sendo um sub-conjunto da população cujos elementos são obtidos aleatoriamente (ou seja, todos os elementos da população têm a mesma probabilidade de fazerem parte da amostra).

14.3 - MÉDIA DA POPULAÇÃO

A média de uma população que apresenta uma função densidade de probabilidade $f(x)$ é definida como sendo o valor:

$$\mu_x = \frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x \cdot f(x) dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x) dx}$$

14.4 - DESVIO PADRÃO

O desvio padrão de uma população que apresenta uma função de densidade de probabilidade $f(x)$ e média μ_x é definido como sendo o valor:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} (x - \mu_x)^2 \cdot f(x) dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x) dx}}$$

14.5 - MÉDIA DA AMOSTRA

Dada uma amostra de n elementos x_i , define-se a média da amostra como sendo o valor:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

14.6 - DESVIO PADRÃO DA AMOSTRA

Dada uma amostra de n elementos x_i e média \bar{x} , define-se o desvio padrão da amostra como sendo o valor:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

14.7 - INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA

Dada uma amostra de n elementos x_i , com média \bar{x} e desvio padrão s , define-se o intervalo de confiança da média da população com $P\%$ de probabilidade como sendo:

$$\bar{x} - u(P%).s \leq \mu_x \leq \bar{x} + u(P%).s$$

14.8 - HISTOGRAMA

Dada uma amostra de n elementos, define-se histograma como sendo uma representação gráfica desses elementos, também conhecida como diagrama de blocos.

O histograma é obtido pela divisão dos dados da amostra em intervalos de tamanho preferivelmente constantes (a base dos blocos) e determinando-se a frequência de cada intervalo (a altura dos blocos).

Com os valores da base e da altura, traçam-se retângulos montando-se o histograma.

14.9 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL DE FREQUÊNCIAS

Um experimento em estudo, que tome valores entre $-\infty < x < \infty$, tem uma distribuição normal (ou (gaussiana) se sua função densidade de probabilidade puder ser expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp. \left(-\frac{1}{2} \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right]^2 \right)$$

com $-\infty < \mu < \infty$ e $\sigma > 0$.

14.10 - CRITÉRIO DE CHAUVENET

O critério de Chauvenet é um critério para rejeição de valores obtidos no desenvolver de um experimento. Por esse critério, um valor será rejeitado se o seu desvio em relação à média é tal que a probabilidade de ocorrência de outro desvio igual ou superior ao mesmo não exceda $1/2n$.

Isso significa que valores fora do intervalo $\bar{x} \pm z_{ch}$ são rejeitados, com $z_{ch} = h \cdot z_{ch}/\sigma$ e $h \cdot z_{ch}$ valor obtido através de uma tabela de distribuição normal e de $1/2n$.

14.11 - TESTES DE ADERÊNCIA

Em muitos estudos estatísticos, dada uma variável aleatória, assume-se a hipótese de a mesma apresentar uma certa distribuição especificada.

Os testes de aderência são realizados para se testar a hipótese assumida. Vários são os testes encontrados na literatura, e no presente trabalho, utilizaram-se alguns deles, a seguir mencionados.

14.11.1 - TESTE DE PEARSON

De uma amostra aleatória, com n elementos x_i , suponha-se $P(x_i) = p_{i0}$. Sendo n_i o número de vezes que x_i ocorre dentro dos n elementos, tem-se $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$

Desejando-se testar a hipótese $H_0: p_{i0} = p_i, i = 1, \dots, k$ onde p_i é um valor especificado, pelo teste de Pearson; rejeita-se

H_0 sempre que:

$$D^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n p_i)^2}{n p_i} > C$$

onde C é uma constante a ser determinada em uma tabela de valores da distribuição qui-quadrado, com $k-1$ graus de liberdade e nível de segurança α .

14.11.2 - TESTE DE KOLMOGOROV - SMIRNOV

Kolmogorov e Smirnov desenvolveram um método para testar a aderência, em que a variável de teste é a maior diferença observada entre a função de distribuição acumulada do modelo e a da amostra.

A função de distribuição acumulada do modelo dá as probabilidades acumuladas em cada ponto.

$F(x) = P(X \leq x)$. A função de distribuição acumulada da amostra corresponderá ao gráfico das frequências relativas acumuladas, designadas por $G(x)$.

O teste consiste da comparação do valor:

$$d = \max |F(x) - G(x)|$$

com um valor crítico tabelado em função do número de elementos da amostra e do nível de significância.

14.12 - FUNÇÃO NSCORES - TESTE DE NORMALIDADE

Essa função testa o valor da hipótese da variável em estudo apresentar distribuição normal.

É traçado um gráfico dos valores da variável e dos valores normalizados da mesma, através de uma rotina do conjunto de programas estatísticos MINITAB implementados no IBM-370 do Centro de Processamento de Dados da Escola de Engenharia de São Carlos.

Quando mais se aproximarem de uma reta os dados apresentados no gráfico da função NSCORES, melhor é o comportamento da variável em estudo em relação à distribuição normal.

14.13 - REGRESSÃO LINEAR

É um processo pelo qual os dados em estudo são ajustados a uma função linear de uma ou de mais variáveis, das quais os dados são dependentes.

14.14 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR

O coeficiente de correlação determina o nível de dependência linear entre variáveis, e é dado por:

$$r^2 = \frac{[n \sum x y - (\sum x) (\sum y)]^2}{[n \sum x^2 - (\sum x)^2] [n \sum y^2 - (\sum y)^2]}, \quad 0 \leq r^2 \leq 1$$

15 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1)- TIMONSHENKO, Stephen P. - Resistência dos materiais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1979. p.24.
- (2)- CHIMELO, João Peres & ALFONSO, Veronica A. - Curso de anatomia e identificação de madeiras empregadas para dormentes e cruzetas. São Paulo, IPT-SP, Agrupamento de Anatomia e Identificação, Divisão de Madeiras, 1983. P.2.
- (3)- Loc., Cit.
- (4) ROCCO LAHR, Francisco Antonio, et alii- Estruturas de madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1984. p.4.
- (5)- Loc., Cit.
- (6)- Loc., Cit.
- (7) CHIMELO, J.P. & ALFONSO, V.A.- Op. Cit. p.3.
- (8) Id., ibid. p.2.
- (9) ROCCO LAHR, Francisco Antonio, et alii- Estruturas de madeira. p.5-6.
- (10) Id., ibid. p.7.
- (11) RAWITSCHER, Felix- Elementos básicos de botânica: introdução ao estudo da botânica. São Paulo, Ed. Centro Universitário, 1964. p.27.
- (12) HELLMEISTER, João Cesar- Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1982. p.18.
- (13) KOLLMANN, Franz F.P. & CÔTÉ JR., Wilfred A.- Principles of wood science and technology: solid wood. Berlin, Springer-Verlag, 1968. 592p.
- (14) TIMOSHENKO, Stephen P.- History of strength of materials. New York, Mc Graw-Hill, 1953. 452p.

- (15) HELLMEISTER, João Cesar- Loc., Cit. 119p.
- (16) TIMOSHENKO, S.P.- History of strength of materials. Op. Cit.
p.21.
- (17) KOLLMANN, Franz- Technologie des holzes und der holzwerkstoffe.
p.647.
- (18) KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A.- Op. Cit. p.321.
- (19) Id., ibid. p.323.
- (20) Loc., Cit.
- (21) Id., ibid. p.321
- (22) Loc., Cit.
- (23) HELLMEISTER, João Cesar- Tension and related properties of Douglas-Fir. New York, College of Forestry at Syracuse, 1966. p.25.
- (24) NEMETH, L.J.- Correlation between tensile strength and modulus of elasticity for dimension lumber. In: SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 2, Proc's, Wash., apr. 1965. p.391-418.
- (25) DOYLE, D.V. & MARKWARDT, L.J.- Tension parallel-to-grain properties of southern pine dimension lumber. Madison, U.S. Forest Service Research Paper - FPL - 84, Forest Products Lab., 1966. 36p.
- (26) OROSZ, Ivan- Modulus of elasticity and bending-strength ratio as indicators of tensile strength of lumber. Journal of Materials, 4 (4): 842-864, Dec. 1969.
- (27) GERHARDS, C.C. & ETHINGTON, R.L.- Evaluation of models for predicting tensile strength of 2-by 4 - inch lumber. Forest Products Journal, 24 (12): 46-54, Dec. 1974
- (28) GALLIGAN, William L.; GERHARDS, C.C.; ETHINGTON, R.L.- Evolution of tensile design stresses for lumber. I.S. Dept. Agriculture, Forest Products Lab., Gen. Tech. Rep. FPL - 28, 1979. 8p.

- (29) WANGAARD, Frederich F.- The mechanical properties of wood.
New York, John Wiley, 1950.
- (30) GIORDANO, Guglielmo- La moderna tēcnica della costruzioni in
legno. Milāo, U. Hoepli, 1947. p. 647-649
- (31) KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A.- Op. Cit. p.327
- (32) HELLMEISTER, João Cesar- Tension an related properties of
Douglas-Fir. Op. Cit. p.55-56.
- (33) GIORDANO, G.- La moderna tēcnica della costruzioni in legno.
Loc. Cit.
- (34) KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A.- Loc., Cit.
- (35) LEWIS, W.C.- Strength-specific gravaty relationships in tension
parallel to the grain for Douglas-Fir and White Oak. Madison,
U.S. Dept. Agriculture, Fonest Service, Forest Products Lab.,
s.d. 12p.
- (36) HELLMEISTER, João Cesar- Tension and related properties of Dou-
glas-Fir. Op. Cit. p.47-48.
- (37) ALFRED J. AMSLER & CO: Catālogo tēcnico. Schaffhouse (Suisse),
AMSLER, s.d.
- (38) COUTINHO, A. de Souza- Fabrico e propriedades do betāo. Lisboa,
Laboratōrio Nacional de Engenharia Civil, 1974. p.4.
- (39) HELLMEISTER, João Cesar- Tension and related properties of Dou-
glas-Fir. Op. Cit. p.25.
- (40) DEUTSCHE NORMEN - Din 52188- Prüfung von holz zugversuch. Ber-
lin, DNA, 1952. 1p.
- (41) ZAGOTTIS, Dēcio de- Pontes e grandes estruturas: parte IV - in-
trodução da segurança no projeto estrutural. São Paulo, Es-
cola Politēcnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e
Fundações. 1978. p.1.1.
- (42) FUSCO, Pēricles Brasiliense- Estruturas de concreto: fundamentos
do projeto estrutural. São Paulo, McGraw-Hill, 1977.
p.217.

- (43) ZAGOTTIS, D.- Op. Cit. p.9.2
- (44) FUSCO, P.B.- Loc., Cit.
- (45) Id. Estruturas de concreto: fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976. p.25.
- (46) HELLMEISTER, João Cesar- Sobre a determinação das características físicas da madeira. Op. Cit. p.106
- (47) FUSCO, P.B.- Estruturas de concreto: fundamentos do projeto estrutural. Op. Cit. p.206.
- (48) HELLMEISTER, João Cesar- Tension and related properties of Douglas-Fir. Op. Cit. p.32.
- (49) JOHNSON, James W. & KUNESH, Robert, H.- Tensile strength of special Douglas-Fir and Hem - Fir 2-inch dimension lumber. Wood and Fiber, 6 (4): 305-318, Winter, 1975.
- (50) ROCCO LAHR, Francisco Antonio- Tesouras de madeira: otimização de sua aplicação na construção civil brasileira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1974. (Relatório nº 3, Bolsa de Iniciação Científica - FAPESP).
- (51) Id. Arco treliçado de madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1978. 112p. (Dissertação de Mestrado).
- (52) FUSCO, P.B.- Estruturas de concreto: fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. Op. Cit. p.41
- (53) Id. Estruturas de concreto: fundamentos do projeto estrutural. Op. Cit. p. 185.

16. - BIBLIOGRAFIA

- ALFRED, J. AMSLER & CO: Catálogo técnico. Schaffhouse (Suisse), AMSLER, s.d.
- APLIN, E.N. & KEENAN, F.J. - Limit states design in wood: a canadian perspective. Forest Products Journal, 27.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cálculo e execução de estruturas de madeira - NB-11. Rio de Janeiro, ABNT, 1951.
- Ensaio físico e mecânico de madeira- MB-26. Rio de Janeiro, ABNT, 1940.
- BROCHARD, F.X - Bois et charpentes en bois: Le materiau et son utilisation. Paris, Eyrolles, 1960.
- BOX, F.E.P. & HUNTER, W.G. - Statistics for Experimenters. New York, 653p.
- CHIMELO, João Peres & ALFONSO, Veronica A. - Curso de anatomia e identificação de madeiras empregadas para dormentes e cruzetas. São Paulo, IPT - SP, Agrupamento de Anatomia e Identificação, Divisão de Madeiras, 1983. p.2.
- COMITÉ EUROPEEN DU BETON - Manual securité des structures: concepts généraux, charges e acções. Bulletim D' Information (102), set. 1974.
- COSTA NETO, P.L.O. - Estatística. São Paulo, BLUCHER Ltda. 1977. 264p.
- COUTINHO, A. de Souza - Fabrico e propriedades do betão. Lisboa, Lab. Nacional de Engenharia Civil, 1974. P.4.
- DELANDES, Fernand & Van Denberghe - Le'on - les bois Caractéristiques - Usinage Utilisations Diverses. Paris, Eyrolles, 1959.
- DEUSTSCHE NORMEN - DIN 52188 - Prüfung von Holz zugversuch. Berlin, INA, 1952. 1p.

- DOYLE, I.V. & MARKWARDT, L.J - Tension parallel - to - grain properties of southern pine dimension lumber. Madison, U.S. Forest Service Research Paper - FPL-84, Forest Products Laboratory, 1966. 36 p.
- FUSCO, Péricles Brasiliense - Estruturas de concreto: fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976. 274p.
- _____ - Estruturas de concreto: fundamentos do projeto estrutural. São Paulo, Mc Graw - Hill, 1977. 298p.
- GALLIGAN, William, L; GERHARDS, C.C.; ETHINGTON, R.L. - Evolution of tensile design stresses for lumber. U.S. Dept. Agriculture Forest Products Lab., General Technical Rep., FPL - 28, 1979. 8p.
- GERHARDS, C.C. & ETHINGTON, R.L - Evaluation of models for predicting tensile strength of 2-by 4 - inch lumber. Forest Products Journal, 24 (12); 46 - 54, Dec. 1974.
- GIORDANO, Guglielmo - A moderna técnica das construções de madeira. Milão, U. Hoepli, 1947. p.22-24.
- _____ - La moderna técnica della costruzioni in legno. Milão, U. Hoepli, 1947. p.647 - 649.
- HELLMEISTER, João Cesar - Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1982. 119p.
- _____ - Tension and related properties of Douglas-Fir. New York, College of Forestry at Syracuse, 1966. 94p.
- HOFFMAN, R. & VIEIRA, S - Análise de regressão: uma introdução à economia. São Paulo, HUCITEC, EDUSP. 1977. 339p.
- JOHNSON, James W. & KUNESH, Robert H. - Tensile strength of special Douglas - Fir and Hem - Fir 2 - inch dimension lumber. Wood and Fiber, 6 (4): 305 - 318, Winter, 1975.
- KARLSEN, G.G. - Wooden Structures. Moscou. Mir Publisher, 1967. 638p.

- KOLLMANN, Franz - Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 1.647.
- KOLLMANN, Franz F.P. & CÔTÉ JR., Wilfred A. - Principles of wood science and technology: solid wood. Berlin, Springer - Verlag, 1968. 592p.
- LAHR, Francisco Antonio Rocco - Arco treliçado de madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1978. 112p. (Dissertação de Mestrado).
- LAHR, F.A.R. et alii - Estruturas de madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1984. 65p.
- _____ - Tesouras de madeira: Otimização de sua aplicação na construção civil brasileira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1974. (Relatório nº 3, Bolsa de Iniciação Científica - FAPESP).
- LEWIS, WiC. - Strength-specific gravity relationships in tension parallel to the grain for Douglas - Fir and White Oak. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Products Lab., s.d, 12p.
- MATEUS, Tomãs J.E. - Bases para o Dimensionamento de estruturas de madeira. Lisboa, Lab. Nacional de Engenharia Civil, 1961. 30p.
- MEYER, Paul - Probabilidade: Aplicação à Estatística. Rio de Janeiro - GB, 1972, 391 p.
- NEMETH, L.J. - Correlation between tensile strength and modulus of elasticity for dimension lumber. In: SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 2, Proc's, Wash, Apr. 1965. p. 391 - 418.
- OROSZ, Ivan - Modulus of elasticity and bending - strength ratio as indications of tensile strength of lumber. Journal of materials, 4 (4): 842 - 864, Dec. 1969.
- PARADINE, C.G. & RIVETT, B.H.P. - Métodos estatísticos para tecnólogos. Trad. de Miguel C. Santoro. São Paulo, Polígono; EDUSP, 1974. 350p.

- PARRATT, L.G. - Probability and Experimental Errors in Science New York, 1961, 255p.
- RAWITSCHER, Felix - Elementos básicos de botânica. Introdução ao estudo da botânica. São Paulo, Ed. Centro Universitário, 1964. 290p.
- TIMOSHENKO, Stephen P. - History of strength of materials. New York, Mc Graw-Hill, 1953. 452p.
- _____ - Resistência dos materiais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1979. 451p.
- _____, WANGAARD, Frederick F. - The Mechanical properties of wood. New York, John Wiley, 1950.
- ZAGOTTIS, Dêcio de - Pontes e grandes estruturas: parte IV - introdução de segurança no projeto estrutural. São Paulo, Escola Politécnica, Deptº de Engenharia das Estruturas e Fundações, 1978. 102p.