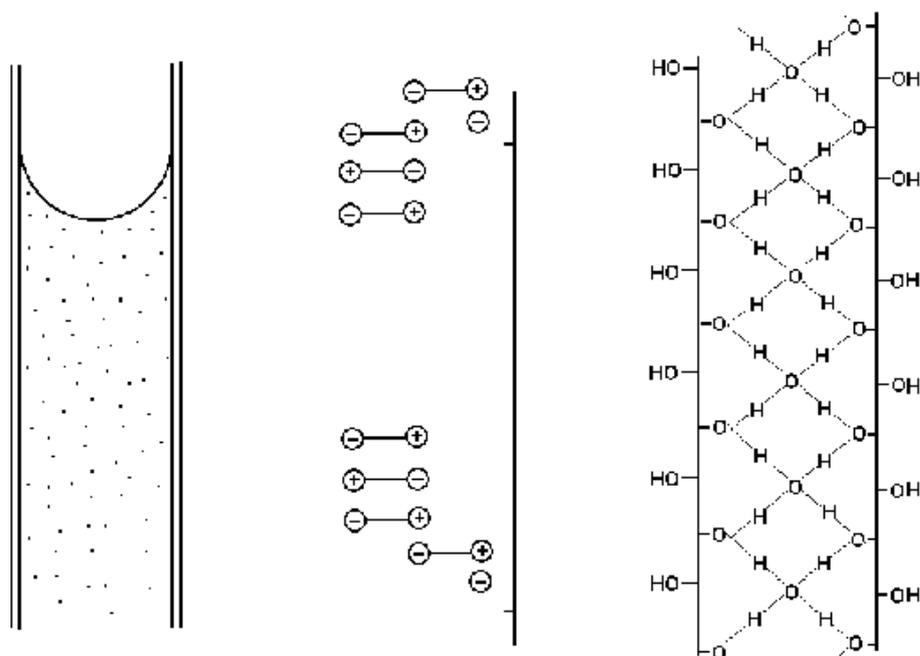


# MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO

SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UFPR  
CENTRO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA  
Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal

## PROPRIEDADES DA MADEIRA



**Prof. Dr. João Carlos Moreschi**

Fevereiro/ 2.005  
4ª edição – novembro / 2.012  
- Curitiba, PR -

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	x
<b>1. PROPRIEDADES ORGANOLÉTICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>1</b>
1.1. Cor .....	1
1.2. Cheiro .....	3
1.3. Gosto ou Sabor .....	4
1.4. Grã .....	5
1.5. Textura .....	7
1.6. Brilho .....	8
1.7. Desenho .....	8
<b>2. MASSA ESPECÍFICA (Densidade) .....</b>	<b>9</b>
2.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE .....	9
2.1.1. Determinação da Massa Específica Aparente .....	11
2.1.1.1. Determinação do volume pelo método estereométrico .....	11
2.1.1.2. Determinação do volume pelo método por deslocamento .....	11
2.1.1.3. Determinação do volume pelo método de pesagem .....	14
2.1.2. Determinação da Massa Específica pela Imersão Relativa da Peça .....	15
2.1.3. Determinação da Massa Específica Através da Passagem de Raios .....	16
2.1.4. Fatores que Influem na Massa Específica da Madeira .....	16
2.1.4.1. Influências internas .....	16
2.1.4.2. Influências externas .....	26
2.2. MASSA ESPECÍFICA REAL .....	27
<b>3. UMIDADE .....</b>	<b>28</b>
3.1. DEFINIÇÃO .....	29
3.2. MÉTODOS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE .....	30
3.2.1. Método por Pesagens .....	30
3.2.2. Método Químico por Destilação .....	31
3.2.3. Método Químico por Titulação (Karl Fischer) .....	34
3.2.4. Aparelhos Elétricos .....	35
3.2.4.1. Aparelhos baseados em medidas de resistência .....	36

3.2.4.2. Aparelhos baseados na capacidade elétrica .....	36
3.3. AMOSTRAGEM .....	37
3.4. DEPENDÊNCIA DA UMIDADE DA MADEIRA .....	39
3.5. SORÇÃO DA MADEIRA .....	45
<b>4. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO .....</b>	<b>52</b>
4.1. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO VOLUMÉTRICO .....	52
4.1.1. Coeficiente de Inchamento Volumétrico Máximo .....	54
4.1.2. Coeficiente de Contração Volumétrica Máxima .....	55
4.2. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO LINEARES .....	58
4.3. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO LINEARES EM ÂNGULO .....	62
4.4. COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE (Q) .....	63
4.4.1. Utilização do Coeficiente de Retratabilidade da Madeira .....	64
4.4.2. Determinação dos Coeficientes de Contração, Inchamento e de Retratabilidade .....	66
4.5. ANISOTROPIA DIMENSIONAL .....	69
<b>5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>73</b>
5.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MADEIRA .....	74
5.2. CALOR ESPECÍFICO DA MADEIRA .....	81
5.3. TRANSMISSÃO TÉRMICA .....	83
5.4. EXPANSÃO TÉRMICA DA MADEIRA .....	84
<b>6. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>86</b>
<b>7. PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>91</b>
<b>8. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>100</b>
8.1. ELASTICIDADE E PLASTICIDADE .....	100
8.1.1. Módulo de Elasticidade .....	102
8.2. DEPENDÊNCIAS GERAIS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÁSTICAS DA MADEIRA .....	107
8.2.1. Condições do Ensaio .....	107
8.2.2. Influências Internas da Madeira .....	110
8.2.3. Influências Externas da Madeira .....	121
<b>9. ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>126</b>
9.1. FLEXÃO ESTÁTICA .....	126
9.1.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio .....	126
9.2. FLEXÃO DINÂMICA .....	138
9.2.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio .....	139

9.2.1.1. Testes de flexão dinâmica segundo as Normas DIN e AFNOR-IPT.....	139
9.3. COMPRESSÃO AXIAL OU PARALELA ÀS FIBRAS .....	148
9.3.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio .....	148
9.3.2. Cálculo do Módulo de Elasticidade e da Resistência Máx. à Compressão Axial .....	152
9.4. COMPRESSÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS .....	154
9.4.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio .....	154
9.4.2. Cálculo da Resistência à Compressão Perpendicular às Fibras .....	158
9.5. TRAÇÃO AXIAL OU PARALELA ÀS FIBRAS .....	158
9.5.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio .....	158
9.5.2. Cálculo Para a Determinação da Resistência à Tração .....	162
9.6. TRAÇÃO PERPENDICULAR .....	166
9.6.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio .....	166
9.6.2. Cálculo da Resistência à Tração Perpendicular às Fibras .....	171
9.7. CISALHAMENTO .....	171
9.7.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio .....	171
9.7.2. Cálculo da Resistência ao Cisalhamento .....	174
9.8. RESISTÊNCIA À DUREZA .....	174
9.8.1. Considerações Gerais .....	176
9.8.1. Dureza Brinell .....	176
9.8.2. Dureza Janka .....	178
9.9. RESISTÊNCIA À ABRASÃO .....	181
9.10. RESISTÊNCIA À TORÇÃO .....	182
<b>10. DEPENDÊNCIAS GERAIS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>185</b>
10.1. CONDIÇÕES DO ENSAIO .....	185
10.1.1. Tamanho e Forma do Corpo de Prova .....	185
10.1.2. Velocidade do Ensaio .....	186
10.2. INFLUÊNCIAS INTERNAS DA MADEIRA .....	187
10.2.1. Massa Específica .....	187
10.2.2. Ângulo das Fibras .....	187
10.2.3. Posição no Tronco .....	187
10.2.4. Porcentagem dos Lenhos Inicial e Tardio .....	187
10.2.5. Defeitos da Madeira .....	188
10.2.5.1 Galhos (nós) .....	188

10.2.5.2. Grã irregular .....	189
10.2.5.3. Lenho de reação .....	189
10.3. INFLUÊNCIAS EXTERNAS .....	191
10.3.1. Temperatura .....	191
10.3.2. Umidade .....	191

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1 Aparelho para a medição de volume por imersão em mercúrio (Amsler) - Kollmann, p.362. ....	12
2 Exemplo de recipiente usado na determinação do volume pelo deslocamento de água (kollmann,pag.361):recipiente e tubo capilar em perfil, e escala graduada e tubo capilar vistos de frente.....	14
3 Determinação do volume por pesagem .....	14
4 Representação de peça de madeira preparada para determinação da massa específica pelo método de imersão relativa.....	15
5 Distribuição normal da massa específica de 6 espécies de madeira .....	16
6 Variação da massa específica ( $\rho_u$ ) em função do teor de umidade (U)...	19
7 Distribuição normal da massa específica para os lenhos tardio e inicial.....	20
8 Relação entre massa específica ( $\rho_o$ ) e a proporção de lenho tardio (%) (coníferas).....	20
9 Variação da massa específica ( $\rho_o$ ) e da proporção de lenho tardio (para o <i>Fraxinus excelsius</i> ) - Madeira com porosidade em anel .....	22
10 Relação entre a massa específica ( $\rho_o$ ) e a largura do anel de crescimento, para folhosas com porosidade em anel (a = 1 e 2), e porosidade difusa ( b = 3 e 4 ).....	22
11 Variação da massa específica no sentido transversal, para coníferas e folhosas com porosidade em anel.....	24
12 Relacionamento entre as massas específicas aparente básica ( $\rho_u$ ) e	

a 0%U ( $r_0$ ) com a altura da árvore.....	24
13 Representação esquemática das paredes celulares, correspondentes aos lenhos inicial e tardio da madeira.....	28
14 Aparelhagem utilizada para a determinação do teor de umidade pelo método de destilação.....	32
15 Instalação utilizada para a determinação do teor de umidade da madeira pelo método Karl Fischer.....	35
16 Representação da curva e distribuição da umidade dentro de uma peça de madeira seca, e de pontos representativos para a sua determinação.....	37
17 Relação entre a temperatura, umidade absoluta e umidade relativa do ar ( $\varphi$ ) .....	42
18 Relação entre a massa específica ( $\rho_0$ ) e o teor de umidade máxima da madeira ( $U_{max}$ ).....	43
19 Possíveis formas de água existentes na madeira .....	45
20 Relação entre várias propriedades de resistência mecânica e o teor de umidade da madeira (U%).....	47
21 Diferentes formações de meniscos nos capilares da madeira durante a adsorção e a desorção - ângulo de humectação $\phi$ -.....	49
22 Isotermes de desorção e adsorção de umidade na madeira .....	49
23 Curvas de umidade de equilíbrio para a madeira de <i>Picea sitchensis</i> , em relação à temperatura e à umidade relativa do ar.....	50
24 Moléculas de água (em cor mais clara) entre as regiões cristalinas e dentro das regiões amorfas das micelas.....	52
25 Relação entre o coeficiente de inchamento volumétrico ( $\alpha_v$ ) e o teor de umidade da madeira, para diferentes espécies florestais.....	53
26 Relação entre a contração volumétrica e o teor de umidade da madeira, em função da sua massa específica (m.e.).....	58
27 Diferentes sentidos anatômicos da madeira .....	60
28 Relação entre o teor de umidade e o inchamento volumétrico da madeira em seus diferentes sentidos .....	60
29 Contração linear em ângulo ( $\varphi$ ) da madeira, considerando uma peça de madeira anatomicamente bem orientada.....	62
30 Corpo-de-prova segundo a COPANT 30:1-005, para a determinação dos coeficientes de contração, inchamento e de retratibilidade.....	67
31 Visualização dos tipos de defeitos desenvolvidos durante a secagem da madeira, devidos ao fenômeno da anisotropia .....	69
32 Representação esquemática do maior número de paredes celulares	

por unidade de distância, entre os diferentes sentidos anatômicos da madeira.....	71
33 Representação do coeficiente de condutividade térmica da madeira ....	75
34 Relacionamento entre a condutividade térmica e o teor de umidade, para madeiras com diferentes massas específicas.....	78
35 Parede construída para obter um isolamento térmico de $1/K = 1,20$ ....	80
36 Relação existente entre a resistência elétrica específica da madeira e o seu teor de umidade .....	88
37 Efeito de um forro acústico confeccionado de chapa de fibras de madeira perfuradas: a) penetração das ondas sonoras pelos buracos, e perda de energia por efeito da reflexão sucessiva nas paredes do espaço vazio entre o teto e o forro aplicado; b) reflexão de parte da onda sonora incidente na superfície da chapa de fibras; e c) absorção da onda sonora pela chapa de fibras.....	94
38 Propagação do som pela vibração de uma parede por efeito de choque de ondas sonoras.....	95
39 Dependência do isolamento acústico versus a frequência do som, de um compensado de madeira (1) e de uma parede de alvenaria (2)..	97
40 Tipos de paredes de madeira e qualificação quanto ao isolamento acústico: a) Parede múltipla com isolamento deficiente; b) parede múltipla com elevado poder de isolamento acústico.....	98
41 Formas práticas de isolamento do som por materiais sólidos: a) em um teto de laje de concreto, acima; e b) em teto com vigeamento de madeira, abaixo.....	99
42 Típica relação carga / deformação para testes de tração e de compressão .....	101
43 Esquema simplificado do sistema de classificação de madeiras, baseado no módulo de elasticidade E. ....	103
44 Esquema simplificado da determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	105
45 Dependência da resistência à flexão e da deformação total sobre a relação L/h dos corpos-de-prova .....	108
46 Relação da energia absorvida por volume, como uma função da relação L/h - o valor mínimo do trabalho de impacto corresponde a $L/h = 12$ .....	108
47 Dependência das propriedades de resistência relativa em função do ângulo da grã, em relação à direção axial do corpo-de-prova.....	111
48 Representação de tensões internas e de rachaduras microscópicas dentro de um anel de crescimento.....	117
49 Representação da posição dos lenhos de compressão e de tração no fuste de árvores.....	117

50	Influência da temperatura de secagem sobre a resistência à compressão.....	123
51	Esquema do ensaio de flexão estática (P= carga; d= deformação).....	126
52	Forma e dimensões do corpo-de-prova para flexão estática, segundo a Norma COPANT 30:1-006.....	127
53	Distribuição das tensões dentro do corpo-de-prova durante o ensaio de flexão estática.....	128
54	Distribuição das tensões de compressão, tração e cisalhamento em peças submetidas à flexão estática, com cargas distribuídas simetricamente.....	128
55	Percentual de deformação causada pelas tensões de cisalhamento no teste de flexão estática.....	129
56	Distribuição das tensões durante o ensaio de flexão estática (as situações A, B e C são descritas a seguir).....	129
57	Representação da ruptura e da deformação plástica em um corpo-de-prova submetida ao ensaio de flexão estática.....	130
58	Posição de tomada dos dados de deformação durante o ensaio de flexão estática.....	131
59	Exemplo de determinação gráfica do limite proporcional (LP) entre as cargas e as deformações correspondentes registradas durante o ensaio de laboratório.....	134
60	Influência da relação L/h sobre o coeficiente de resiliência da madeira .....	139
61	Equipamento adotado para a avaliação da resistência à flexão dinâmica, pelas normas DIN e AFNOR-IPT.....	140
62	Relacionamento do tipo de ruptura ocorrida no ensaio de flexão dinâmica com a qualidade da madeira: da esquerda para a direita, madeiras com alta, media e baixa resistência ao choque.....	143
63	Esquema do ensaio de compressão axial (corpo-de-prova, ponte e registrador de deformações).....	148
64	Ruptura típica apresentada em corpos-de-prova testados para avaliar a compressão axial, e representação gráfica do deslizamento das fibras por efeito da deformação.....	151
65	Tipos de rupturas que poderão ocorrer com a realização do ensaio de compressão axial: a) amassamento; b) rachadura lateral; c) cisalhamento; d) rachadura longitudinal; e) amassamento e cisalhamento paralelo à grã e; f) deslizamento na forma de vassoura.....	151
66	Esquema do ensaio para a determinação da resistência à compressão perpendicular às fibras, segundo a Norma COPANT 30:1-011 .....	155
67	Gráfico típico relacionando a carga e a deformação registradas no ensaio de compressão perpendicular às fibras.....	156

68	Sentido dos esforços empregados no ensaio de tração axial.....	159
69	Forma e dimensões observadas em um corpo-de-prova para a avaliação da resistência à tração axial da madeira.....	160
70	Esquema do ensaio para a determinação da resistência à tração axial. Velocidade: 1mm por minuto.....	161
71	Representação gráfica de rupturas causadas por tração axial, em madeiras com diferentes resistências aparentes.....	163
72	Corpo de prova e forma de execução do ensaio de tração perpendicular às fibras.....	165
73	Corpo-de-prova para o ensaio de tensão perpendicular à grã, de acordo com especificações da Norma AFNOR.....	166
74	Distribuição das tensões dentro do c.p. durante a determinação da resistência.....	166
75	Corpos-de-prova de acordo com diferentes normas técnicas, para a determinação da resistência ao fendilhamento.....	167
76	Relacionamento entre a resistência ao fendilhamento determinada em corpos-de-prova confeccionados com uma (figura 71) e com duas ranhuras (figuras 68 – 70).....	168
77	Esquema do teste de cisalhamento .....	170
78	Corpo-de-prova usado para a determinação da resistência ao cisalhamento, segundo a Norma COPANT 30:1-007 - seções de trabalho em função da orientação de corte da madeira: A) tangencialmente aos anéis de crescimento; e B) perpendicularmente aos anéis de crescimento.....	172
79	Distribuição de tensões em um cubo de madeira sob carga simetricamente distribuída.....	172
80	Esquema do ensaio para a determinação da dureza Janka .....	178
81	Possíveis casos de torção de C.P. de madeira com seção transversal quadrada.....	182

## LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
1. ESPÉCIES DE MADEIRA E SUBSTÂNCIAS QUE CONFEREM A SUA COLORAÇÃO .....	1
2. ESPÉCIES DE MADEIRA E EFEITOS NEGATIVOS A HUMANOS .....	4
3. EXEMPLOS DE ALGUNS VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA - (CLIMATIZADAS PARA SE ESTABILIZAREM A 0% U).....	17
4. TIPOS DE ÁGUA EXISTENTES NA MADEIRA E SEUS RELACIONAMENTOS AO PROCESSO DE DESORÇÃO .....	51
5. VALORES DE CONTRAÇÃO LINEAR E VOLUMÉTRICA DE ALGUMAS ESPÉCIES, ORDENADAS SEGUNDO A MASSA ESPECÍFICA A 15% DE TEOR DE UMIDADE.....	61
6. EXEMPLOS DE COEFICIENTES DE RETRATIBILIDADE PARA DIFERENTES ESPÉCIES DE MADEIRA .....	64
7. FATORES DE ANISOTROPIA E RESPECTIVAS CLASSES DE QUALIDADE DA MADEIRA .....	70
8. EXEMPLOS DE ALGUNS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA .....	78
9. DIFERENÇA DE TEMPERTURA ENTRE OS LADOS INTERNO E EXTERNO DE UMA PAREDE EM FUNÇÃO DO MATERIAL E ESPESSURA DAS CAMADA UTILIZADAS .....	81
10. ALGUNS VALORES MÉDIOS DE CALOR ESPECÍFICO .....	82
11. RESISTENCIA ELÉTRICA ESPECÍFICA (R) DE ALGUNS MATERIAIS ISOLANTES .....	89
12. FORMAS DE UTILIZAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA ALTERNADA DE ALTA FREQUÊNCIA, SUAS VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	90
13. EXEMPLOS DE GRAUS DE ABSORÇÃO SONORA DE ALGUNS MATERIAIS .....	94
14. RELAÇÃO APROXIMADA ENTRE O COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE RUIDOS (ISOLAMENTO ACÚSTICO)	

DE PAREDES SIMPLES, EM DIFERENTES ESPESSURAS E MASSAS DO MATERIAL POR METRO QUADRADO.....	96
15. RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS DE ALGUMAS MADEIRAS BRASILEIRAS .....	106
16. PROPORÇÕES DE ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA, POR PERCENTUAL DE ALTERAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE .....	124
17. DADOS REGISTRADOS DURANTE UM ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA. ....	133
18. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL MÉDIA, OBTIDA EM VÁRIOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS-DE-PROVA COM DIFERENTES SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	149
19. VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA PARA ALGUNS COMPONENTES DA MADEIRA.....	160
20. CARGA APLICADA NO TESTE DE DUREZA BRINNEL EM FUNÇÃO DA PROVÁVEL DUREZA E MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA TESTADA .....	176
21. MÓDULOS DE ELASTICIDADE À FLEXÃO ESTÁTICA .....	187
22. RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS À COMPRESSÃO, TRAÇÃO E FLEXÃO ESTÁTICA DA MADEIRA COM E SEM A PRESENÇA DE NÓS.....	187
23. ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.....	191

## PROPRIEDADES DA MADEIRA

### 1. PROPRIEDADES ORGANOLÉTICAS DA MADEIRA

As propriedades organoléticas da madeira são aquelas que impressionam os órgãos sensitivos, sendo elas: cheiro, cor, gosto, grã, textura e desenho que se apresentam no material, e são diretamente ligadas ao seu valor decorativo e ornamental.

#### 1.1. COR

A cor da madeira é originada por substâncias corantes depositadas no interior das células que constituem o material lenhoso, bem como impregnadas nas suas paredes celulares. Entre estas substâncias podem-se citar resinas, gomas, goma-resinas, derivados tânicos e corantes específicos, muitos dos quais ainda não foram suficientemente estudados sob o ponto de vista químico.

A Tabela 1 abaixo apresenta algumas espécies de madeira e as respectivas substâncias responsáveis pela coloração conferida à madeira.

TABELA 1. ESPÉCIES DE MADEIRA E SUBSTÂNCIAS QUE CONFEREM A SUA COLORAÇÃO

NOME COMUM	NOME CIENTÍFICO	SUBSTÂNCIA CORANTE
Pau Brasil	<i>Guilandina echinata</i>	Brasilina
Pau Campeche	<i>Haematoxylum campechianum</i>	Hematoxilina
Ipê	Gênero <i>Tabebuia</i> ( <i>Bignoniaceae</i> )	Lepachol

A região periférica do alburno, juntamente com a do câmbio, apresenta coloração mais clara que a madeira de cerne, situado na região mais interior do fuste de uma árvore.

Alguns dos produtos depositados no interior das células e das paredes celulares, responsáveis pela coloração da madeira, podem ser tóxicos a agentes xilófagos, os quais conferem a várias madeiras de coloração escura uma alta durabilidade em situações de uso que favorecem a biodeterioração.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponíveis para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial não estão autorizadas, exceto se devidamente citada a sua fonte.

De forma geral, madeiras mais leves e macias são sempre mais claras que as mais pesadas e duras. Por outro lado, em regiões quentes predominam as madeiras com cores variadas e mais escuras que em regiões de clima frio; nestas últimas predominam as madeiras denominadas “madeiras brancas”.

A cor da madeira é de grande importância no ponto de vista prático, pela influência que exerce sobre seu valor decorativo. Adicionalmente, substâncias corantes, quando presentes em altas concentrações na madeira, podem ser extraídas comercialmente e utilizadas na tingidura de tecidos, couros e outros materiais. Como exemplo de espécies comerciais para esta finalidade temos o Pau Brasil e o Pau Campeche, apresentadas na Tabela 1, e a Taiúva (*Chlorophora tinctoria*).

A cor da madeira varia com o teor de umidade e normalmente ela se torna mais escura quando exposta ao ar, pela oxidação das substâncias orgânicas contidas no material lenhoso. Tal efeito é promovido pela elevação da temperatura, como pela exposição da madeira a radiação solar. Outras formas de alteração da cor natural da madeira dizem respeito às situações em que este material se encontra em contato com metais ou por ação de microrganismos (fungos e/ou bactérias).

Com o propósito de aumentar o valor comercial de algumas espécies de madeira, pode-se causar a modificação artificial da cor da madeira por meio de tinturas, descolorações ou outros meios, como alterações na cor por tratamentos com água ou vapor d'água.

Para escurecer madeiras recém cortadas no sentido de dar-lhes um aspecto envelhecido, e obviamente aumentar o seu valor comercial, utiliza-se com sucesso o tratamento de corrente contínua de ar quente carregado com ozônio, o que produz, simultaneamente, a secagem e o envelhecimento artificial da madeira, por evaporação d'água e por oxidação das substâncias existentes no material lenhoso.

Devido à subjetividade ao se descrever a cor da madeira, e por questão de padronização nesta área tecnológica, é recomendável a utilização da tabela de cores de Munsell para tecidos vegetais (MUNSELL COLOR – Munsell color chart for plant tissues. Baltimore, 1952).

## 1. 2. CHEIRO

O cheiro é uma característica difícil de ser definida. O odor típico que algumas espécies de madeira apresentam deve-se à presença de substâncias voláteis, concentradas principalmente na madeira de cerne. Por conseqüência ele tende a diminuir com o tempo em que a superfície da madeira fica exposta, mas pode ser realçado com a raspagem da sua superfície, produzindo-se cortes ou umedecendo o material a ser examinado.

O odor natural da madeira pode ser agradável ou desagradável, valorizando-a ou limitando-a quanto a sua utilização. Contudo ela também pode ser inodora, característica que a qualifica para inúmeras finalidades, em especial na produção de embalagens para chás e produtos alimentícios.

Como exemplo do emprego de espécies de madeira em função de seu odor característico, pode-se citar a confecção de embalagens para charutos, uma vez o sabor melhora quando estes são armazenados em caixas de madeira de Cedro (*Cedrela sp.*). Outras espécies, devido a seus aromas agradáveis, são normalmente exploradas comercialmente para a fabricação de artigos de perfumaria, como o Cedro-rosa (*Santalum album*), usada como incenso no Oriente, e o Cinamomo-cânfora (*Cinnamomum camphora*), empregado na confecção de baús para o armazenamento de lãs e peles pela sua propriedade de repelir insetos.

Em contraste às madeiras valorizadas pelo odor agradável, existem as que têm saponinas em suas células e, quando trabalhadas no estado seco, desprendem pó que irritam as mucosas nasais. Entre algumas espécies que apresentam este inconveniente, estão a *Enterolobium contortisiliquum*, *Tabebuia sp.* e a *Myrocarpus frondosus*. Também existem as que apresentam toxicidade ao homem, com efeitos como irritação da pele, dos olhos ou nariz, alergias, dores de cabeça, etc.

Além dos efeitos já apresentados, relacionados às substâncias incluídas na madeira e responsáveis pelo odor e efeitos nocivos ao homem, muitas espécies de madeira possuem substâncias especiais em suas células que podem ser problemáticas, caracterizando-se como defeitos, caso danifiquem as serras e equipamentos empregados no desdobro e na usinagem, como o carbonato de cálcio

na madeira de Baitoa (*Phyllostemon brasiliensis*), ou o elevado teor de sílica nas madeiras de Maçaranduba (*Manilkara elata*) e Itaúba (*Mazilaurus itauba*).

A Tabela 2., a seguir, apresenta algumas espécies de madeira tidas como prejudiciais à saúde humana, bem como os respectivos efeitos causados pelas substâncias depositadas no interior de suas células:

TABELA 2. ESPÉCIES DE MADEIRA E EFEITOS NEGATIVOS A HUMANOS

<b>NOME COMUM</b>	<b>NOME CIENTÍFICO</b>	<b>EFEITOS NEGATIVOS SOBRE HUMANOS</b>
Caviúna	<i>Machoerim scleroxylon</i>	Dermatite, asma, tonturas, ânsia, etc
Jacarandá-da-bahia	<i>Dalbergia nigra</i>	Dermatite
Peroba-amarela	<i>Paratecoma peroba</i>	Dermatite
Jacareúba	<i>Calophyllum brasiliense</i>	Tonturas

### 1.3. GOSTO OU SABOR

Gosto ou sabor é uma propriedade intimamente relacionada com o odor, por ambos serem originados das mesmas substâncias.

Na prática, somente de forma excepcional o gosto da madeira contribui para a identificação e distinção entre espécies. Por esta razão esta determinação está definitivamente em desuso pois, além da possibilidade de reações alérgicas ou de intoxicação ao se tentar determinar o gosto da madeira, ele é muito variável e pouco contribui. Contudo ele pode excluir certas espécies de madeira para algumas utilizações, como no caso de embalagens para alimentos, palitos de dente, de picolés e de pirulitos, brinquedos para bebês, utensílios para cozinhas, etc.

#### 1.4. GRÃ

O termo grã refere-se à orientação geral dos elementos verticais constituintes do lenho, em relação ao eixo da árvore ou de uma peça de madeira. Esta orientação é decorrente das mais diversas influências em que a árvore é submetida durante o seu processo de crescimento, culminando em grande variação natural no arranjo e na direção dos tecidos axiais, o que origina vários tipos de grãs, a saber:

- **Grã direita ou reta:** Tipo de grã considerada normal, apresentando os tecidos axiais orientados paralelamente ao eixo principal do fuste da árvore ou de peças confeccionadas de madeira.

Este tipo de grã é apreciado na prática por contribuir para uma elevada resistência mecânica, ser de fácil desdobro e processamento e não provocar deformações indesejáveis por ocasião da secagem da madeira. Contudo, no ponto de vista decorativo as superfícies tangenciais e radiais da madeira se apresentarão com aspecto bastante regular e sem figuras ornamentais especiais, a exemplo da madeira de *Araucaria angustifolia*.

- **Grãs irregulares:** Tipos de grãs cujos tecidos axiais apresentam variações na orientação, em relação ao eixo principal do fuste da árvore ou de peças de madeira. Dentre os tipos de grãs irregulares distinguem-se:

- **Grã espiral:** Determinada pela orientação espiral dos elementos axiais constituintes da madeira, em relação ao fuste da árvore. Em árvores vivas, sua presença pode ser muitas vezes visualizada pela aparência espiralada da casca, podendo, no entanto, estar oculta sob uma casca de aspecto normal.

A existência deste tipo de grã traz sérias conseqüências para a utilização da madeira, como a diminuição da resistência mecânica, aumento das deformações de secagem e dificuldade para se conseguir um bom acabamento superficial.

Além das conseqüências supracitadas, quando ocorrer uma volta completa dos elementos axiais em menos de 10 m de comprimento do fuste, a madeira apresenta sérias limitações quanto a sua utilização, sobretudo para fins estruturais.

- **Grã entrecruzada:** A existência deste tipo de grã ocorre especialmente quando a direção da inclinação dos elementos axiais se altera de período de crescimento para período de crescimento da árvore. Este tipo de grã não reduz em demasia a resistência mecânica da madeira, mas é responsável por um aumento das deformações de secagem e da dificuldade para se conseguir um bom acabamento superficial.

Apesar dos problemas supracitados, madeira que contém grã entrecruzada poderá ser valorizada sob o ponto de vista estético, pelo desenho e variação no brilho apresentados na sua superfície.

- **Grã ondulada:** Neste tipo de grã os elementos axiais do lenho alteram constantemente suas direções, apresentando-se na madeira como uma linha sinuosa regular. Suas superfícies longitudinais apresentam faixas claras e escuras, alternadas entre si e de belo efeito decorativo.

As conseqüências para a utilização prática da madeira são as mesmas da grã entrecruzada.

- **Grã inclinada, diagonal ou oblíqua:** Tipo de grã que ocorre pelo desvio angular dos elementos axiais, em relação ao eixo longitudinal de uma peça de madeira. Neste caso, as peças de madeira são provenientes de fustes excessivamente cônicos, de crescimento excêntrico, etc.

Este tipo de grã afeta significativamente as propriedades tecnológicas da madeira, sendo que, quanto maior o desvio, menor a resistência mecânica e mais acentuada a ocorrência de deformações por efeito da secagem.

## 1.5. TEXTURA

Ao termo textura refere-se o efeito produzido na madeira pelas dimensões, distribuição e porcentagem dos diversos elementos estruturais constituintes do lenho, no seu conjunto. Nas angiospermas este efeito é determinado principalmente pelos diâmetros dos vasos e pelas larguras dos raios, enquanto nas gimnospermas o efeito se dá pela maior ou menor nitidez, espessura e regularidade dos anéis de crescimento. Os seguintes tipos de textura são apresentados, de acordo com o grau de uniformidade pela madeira:

- **Textura grossa ou grosseira:** apresentada em madeiras com poros grandes e visíveis a olho nu (diâmetro tangencial maior que 250  $\mu\text{m}$ ), parênquima axial abundante ou raios lenhosos largos.
- **Textura fina:** apresentada em madeiras cujos elementos têm dimensões muito pequenas e se encontram distribuídos principalmente na forma difusa no lenho, parênquima escasso e tecido fibroso abundante, conferindo à madeira uma superfície homogênea e uniforme.
- **Textura média:** situação intermediária entre a textura grossa e a textura fina.

No caso das gimnospermas, quando o contraste entre as zonas do lenho inicial e do lenho tardio é bem marcante, a madeira tem constituição heterogênea e é classificada como de textura grossa, como no caso da madeira de *Pinus elliottii*, por outro lado, se o contraste for pouco evidente ou indistinto, a sua superfície será uniforme e a classificação será de textura fina, como é o caso do Pinheiro-bravo (*Podocarpus lambertii*).

## 1.6. BRILHO

O brilho da madeira é causado pelo reflexo da luz incidente sobre a sua superfície. Porém, como este material é constituído de forma heterogênea, ocorre variação em brilho entre as três faces anatômicas. Dentre elas a face radial é sempre a mais reluzente, por efeito de faixas horizontais do tecido que forma os raios da madeira.

A importância do brilho é principalmente de ordem estética, e sob o ponto de vista de identificação e distinção de madeiras esta propriedade é considerada irrelevante.

## 1.7. DESENHO

O termo desenho é usado para descrever a aparência natural das faces da madeira, resultante das várias características macroscópicas (cerne, albúrnio, cor, grã) e, principalmente, dos anéis de crescimento e raios da madeira.

Desenhos especialmente atraentes têm sua origem em certas anormalidades da madeira, como grã irregular, fustes bifurcados, nós, crescimento excêntrico, deposições irregulares de substâncias corantes, etc.

Certos tipos de desenhos possuem denominações especiais, como “figura prateada”, por efeito do brilho dos raios, e “olho de passarinho”, causado pela presença de brotos adventícios.

## 2. MASSA ESPECÍFICA (Densidade)

### MASSA ESPECÍFICA APARENTE

A massa específica constitui uma das propriedades mais importantes da madeira, pois dela dependem a maior parte de suas propriedades físicas e tecnológicas, servindo na prática como uma referência para a classificação da madeira. Em regra geral, madeiras pesadas são mais resistentes, elásticas e duras que as leves. Porém, em paralelo a estas vantagens, são de mais difícil trabalhabilidade e também apresentam maior variabilidade.

O conhecimento da massa específica serve como uma informação útil sobre a qualidade e para a classificação de uma madeira.

A relação entre a massa  $m$  (g) e o volume  $V$  (cm<sup>3</sup>) de um corpo equivale à sua densidade  $\varphi$  (g / cm<sup>3</sup>), ou seja:

$$\varphi = m / V \quad (\text{g} / \text{cm}^3) \quad \textcircled{1}$$

Conseqüentemente, desconsiderando-se o teor de extrativos e de material estranho à madeira, a densidade é um reflexo fiel da quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou, de forma inversa, do volume de espaços vazios existentes na madeira.

Como nos laboratórios o peso e a massa são comumente determinados de forma similar, ou seja, com a utilização de balanças, pode-se aceitar que o peso determinado é igual à massa ( $P = m$ ), obtendo-se a expressão que nos dá a massa específica  $r$  como:

$$r = P / V \quad (\text{g} / \text{cm}^3) \quad \textcircled{2}$$

**Exemplo:** Uma peça de madeira que pesa 350 g e tem um volume de 480 cm<sup>3</sup>, tem uma massa específica igual a 0,73 g / cm<sup>3</sup>.

$$r = P (\text{g}) / V (\text{cm}^3) \rightarrow r = 350 \text{ g} / 480 \text{ cm}^3 \rightarrow r = 0,73 \text{ g} / \text{cm}^3$$

Para se comparar massas específicas é imprescindível que as amostras tenham os mesmos teores de umidade, pois qualquer alteração desta acarretará na alteração do peso e, abaixo do ponto de saturação das fibras ( +/- 28 % U ), no peso e no volume da madeira.

A massa específica determinada a um dado teor de umidade, é denominada “**massa específica aparente da madeira**”. Para esta finalidade foram estabelecidos como referências os teores de umidade fixos de 0%, 12% e 15% de umidade, correspondendo o primeiro ao teor de umidade aproximado da madeira seca em estufa, o segundo ao teor de umidade de equilíbrio da madeira seca em condições climáticas padronizadas, a 20°C e 65% de umidade relativa do ar, e o terceiro ao teor de umidade de equilíbrio aproximado da madeira, que ocorre espontaneamente em muitas situações geográficas do Brasil. Por conseqüência, o teor de umidade utilizado para estabilizar a madeira sempre deverá ser especificado. Assim:

$$r_{12} = P_{12} / V_{12} \quad (\text{g} / \text{cm}^3) \quad \textcircled{2a}$$

ou

$$r_0 = P_0 / V_0 \quad (\text{g} / \text{cm}^3) \quad \textcircled{2b}$$

Quanto à climatização, deve-se ressaltar o grande problema que representa a manutenção de um ambiente sob as condições climáticas padronizadas pretendidas (12 % ou 15 % U), devido à baixa precisão dos aparelhos normalmente utilizados para este propósito.

Muitas vezes, pela dificuldade de se determinar com exatidão o volume da madeira a 0 % de umidade, pelo fato dela começar a adsorver umidade do ambiente assim que é retirada da estufa, e desejando-se resultados mais precisos, determina-se também a **massa específica aparente básica da madeira** através da seguinte relação:

$$r = P_{\text{seco}} / V_{\text{verde}} \quad (\text{g} / \text{cm}^3) \quad \textcircled{2c}$$

(Segundo a Norma COPANT 30 : 1 - 004)

A determinação da massa específica aparente básica permite sempre a reprodução de um valor constante, seguro e invariável, o que é de grande utilidade em estudos teóricos e comparações. Sua grande desvantagem é não encontrar utilidade prática alguma, mas ter apenas valor científico.

### 2.1.1. Determinação da Massa Específica Aparente

O termo **massa específica aparente** é utilizado quando se calcula a massa específica da madeira pelo relacionamento de sua massa e seu volume aparente, ou seja, do volume que inclui o material lenhoso, extrativos e o ar contido nas células da madeira, ambos em algum teor de umidade específico.

#### 2.1.1.1. Determinação do volume pelo método estereométrico

De acordo com as fórmulas vistas para massa específica, é necessário conhecer o peso e o volume da peça de madeira em questão. O peso é diretamente obtido em uma balança de laboratório (precisão em função do peso da peça), porém, para se determinar o volume existem vários métodos, dos quais os seguintes são os mais utilizados:

Neste método a determinação do volume é feita através das dimensões da amostra, o que pode ser feita com simples instrumentos de medição possuidores de escalas (paquímetros, micrômetros, etc.).

Uma condição importante é o perfeito preparo dos corpos-de-prova: superfícies lisas, lados paralelos, ausência de fendas, instrumentos de medição compatível com a precisão desejada, etc.

Este método é normalmente usado nos laboratórios, com corpos-de-prova de 20 cm X 3 cm X 3 cm, segundo a Norma COPANT 30:1 - 004

#### 2.1.1.2. Determinação do volume pelo método por deslocamento

Consiste na imersão da peça considerada em um líquido de densidade conhecida, e tem a grande vantagem de se poder utilizar corpos-de-prova com formas irregulares, como descrito a seguir:

a) Por imersão da peça em mercúrio:

É um método bastante preciso e consiste em mergulhar a amostra em mercúrio, sendo o seu volume igual à porção deste deslocada. Baseando-se neste princípio, Breuil idealizou um volumenômetro, fabricado hoje pela Amsler (Fig.1).

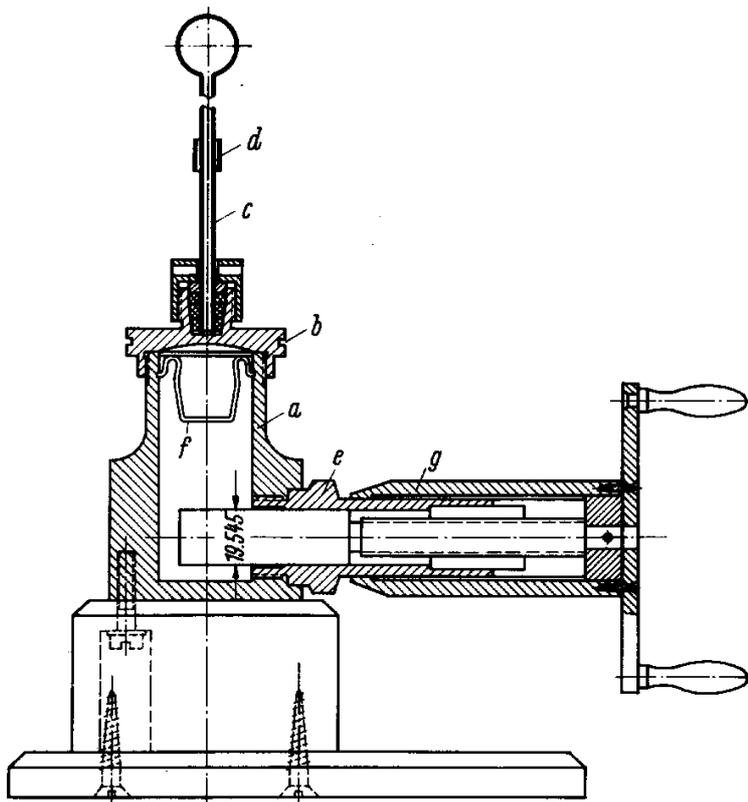


Figura 1: Aparelho para a medição de volume por imersão em mercúrio (Amsler) - Kollmann, p.362.

Este aparelho compõe-se de um depósito cilíndrico de aço (a), com tampa rosqueável (b), comunicante a um tubo vertical de vidro (c), ao qual se ajusta exteriormente uma pequena peça metálica móvel (d), indicadora da altura da coluna de mercúrio, e de um cilindro horizontal (e) no qual se move livremente um êmbolo (g) por ação de um parafuso micrométrico. No recipiente de aço existe ainda um grampo ajustável (f) com a função de manter o corpo-de-prova imerso no líquido.

Colocando-se a peça de madeira no depósito cilíndrico que contém mercúrio, gira-se o parafuso micrométrico para fazer subir um filete de mercúrio no tubo de vidro, até uma altura preestabelecida pela peça metálica, e anota-se o valor correspondente no parafuso micrométrico. Repete-se esta operação sem a amostra dentro do aparelho para fazer o filete mercúrio atingir a mesma altura anterior e anota-se o novo valor, lido no parafuso micrométrico. O volume da peça é, então, determinado pela diferença das duas leituras, multiplicada pela constante do aparelho, igual a 0,3 (cada unidade de avanço no parafuso micrométrico corresponde a 0,3 cm<sup>3</sup>), portanto:

$$V = 0,3 ( a_1 - a_2 ) ( \text{cm}^3 ) \quad \textcircled{3}$$

onde:  $V$  = volume da peça de madeira ( cm<sup>3</sup> )

0,3 = constante do aparelho

$a_1$  = leitura efetuada com a peça de madeira no interior do aparelho

$a_2$  = leitura efetuada sem a peça de madeira no interior do aparelho

b) Por imersão da peça em água:

Especialmente para amostras de madeira de maiores dimensões, o volume pode ser determinado pelo deslocamento de água (Fig. 2), usualmente em recipiente de material inoxidável, apesar da precisão cair significativamente devida a absorção desta pelo lenho. Desejando-se resultados mais precisos, é necessário o uso de um fator de correção, em função da provável absorção de água pela peça e da espécie de madeira em questão, da saturação completa da peça ou do selamento de sua superfície com parafina ou outro produto impermeabilizante.

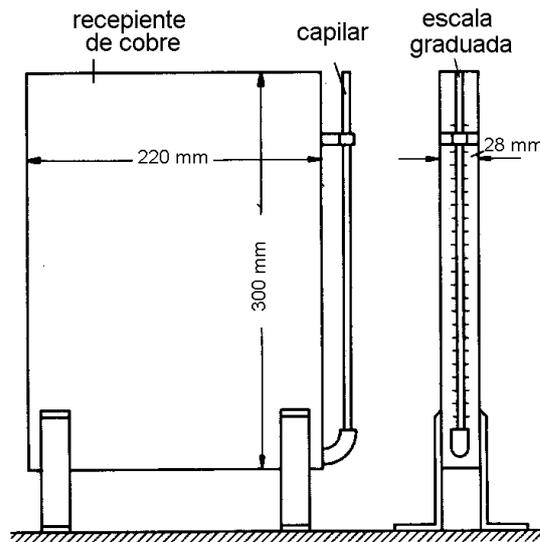


Figura 2: Exemplo de recipiente usado na determinação do volume pelo deslocamento de água ( Kollmann, pag. 361 ): recipiente e tubo capilar em perfil, e escala graduada e tubo capilar vistos de frente.

### 2.1.1.3. Determinação do volume pelo método de pesagem:

Trata-se do mesmo princípio anterior, onde se determina o volume por meio de pesagem. Sendo a água um líquido de densidade igual a 1, a diferença das leituras efetuadas antes e após a imersão da madeira (peso), corresponde ao volume de água deslocado pela peça imersa, na relação  $1 \text{ g} / 1 \text{ cm}^3$ . Assim:

$$P = A \text{ (com o corpo em suspensão)}$$

onde:

$P$  = peso

$A$  = força de sustentação (empuxo)

$$A = V_u \cdot \text{densidade da água} = V_u \cdot 1$$

$$A = V_u \text{ ou } P = V_u$$

$V_u$  = Volume úmido.

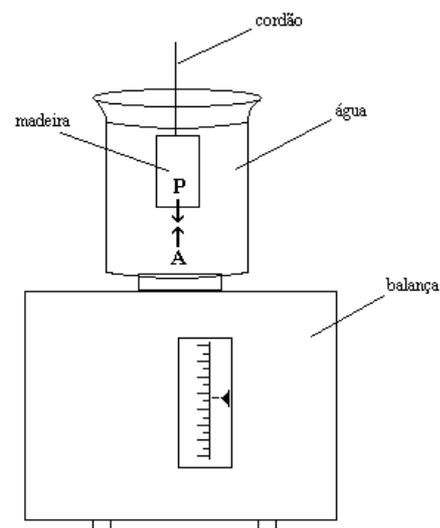


Figura 3. Determinação do volume por pesagem

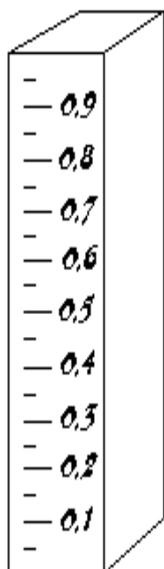
### 2.1.2. Determinação da massa específica pela imersão relativa da peça de madeira

A determinação da densidade por imersão relativa da peça, é especialmente indicada quando não se dispõe de aparelhagem alguma para a sua avaliação. A amostra pode ter qualquer comprimento, desde que apresente uma forma alongada, lados paralelos e superfícies lisas.

Para a determinação, divide-se a peça de madeira no seu comprimento, em 10 partes iguais ( 0,1; 0,2;.....;0,9; 1,0 ), e então ela é mergulhada da menor altura possível, em uma vasilha contendo água. Durante esta prática, deve-se observar que a peça fique em posição vertical, e que não toque nas paredes da vasilha.

A densidade aproximada será obtida pela leitura feita diretamente na peça de madeira (marca da água), até onde ela afundou.

Este método é de pouca precisão devido à absorção de água pelo lenho, porém permite uma avaliação rápida da densidade quando se dispõe de poucos recursos.



#### Exemplo:

Uma peça de madeira que chegou a submergir até o ponto intermediário entre as marcas 0,5 e 0,6, tem uma densidade de aproximadamente  $0,55\text{g por cm}^3$ . Caso esta peça afundasse completamente, uma baixa velocidade de submersão indicaria uma densidade de aproximadamente  $0,99\text{ g/cm}^3$  e, a velocidades maiores, indicaria uma densidade superior a  $0,99\text{ g/ cm}^3$ .

Figura 4. Representação de peça de madeira preparada para determinação da massa específica pelo método de imersão relativa.

### 2.1.3. Determinação Através da Passagem de Raios

Este método baseia-se no fato que um certo número de elétrons é perdido ao atravessar a madeira, variando em função da quantidade de matéria e substâncias lenhosas existentes por unidade de volume. Em outras palavras, o número de elétrons perdidos está em função da densidade da madeira.

### 2.1. 4. Fatores que Influem na Massa Específica da Madeira

#### 2.1.4.1. Influências internas

Sendo a madeira um produto da natureza em contínuo desenvolvimento, ela jamais fornece medidas ou valores fixos e constantes. Devido à sua variabilidade, a massa específica também é um reflexo das inúmeras influências externas e internas que atuam na organização e nas dimensões das células do lenho.

Algumas das principais causas determinantes das variações da massa específica da madeira são:

#### a) Espécie florestal:

Conhecendo a grande variabilidade da estrutura interna do lenho, é fácil compreender que cada espécie possui uma massa específica característica. O mesmo também ocorre dentro de uma mesma espécie de madeira.

Como conseqüência da existência de variações na madeira, portanto, ao se citar a massa específica deste material, na verdade cita-se um valor médio para uma espécie em particular. A figura 5, abaixo, apresenta as variações que ocorrem nesta propriedade, para seis espécies de madeira.

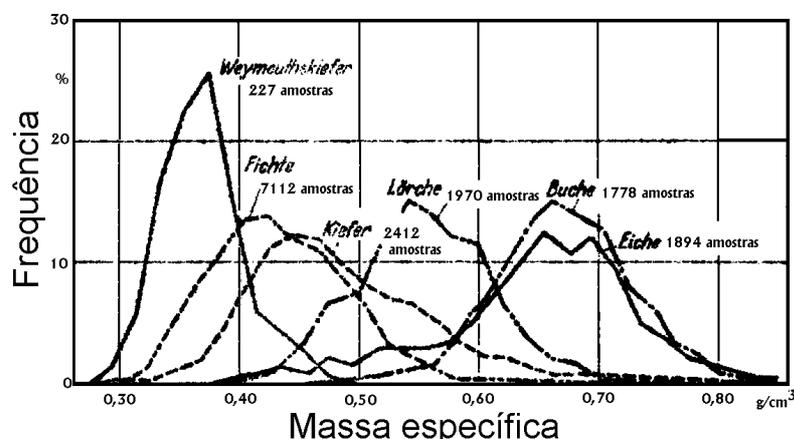


Figura 5. Distribuição normal da massa específica de 6 espécies de madeira .

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponíveis para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial não estão autorizadas, exceto se devidamente citada a sua fonte.

A lista de espécies de madeira e de suas respectivas massas específicas, apresentadas na tabela 3, a seguir, mostra perfeitamente a variação natural da massa específica média entre espécies, incluindo a madeira mais leve (balsa) e a mais pesada (Guaiaco) do mundo. Os valores mínimo e máximo da massa específica a 0%U (0,13 e 1,40 g/cm<sup>3</sup>) constituem os limites biológicos desta característica da madeira, não existindo massas específicas mais altas ou mais baixas.

TABELA 3. EXEMPLOS DE ALGUNS VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA - (CLIMATIZADAS PARA SE ESTABILIZAREM A 0% U).

<b>NOME COMUM</b>	<b>NOME BOTÂNICO</b>	<b><math>\rho_{0\%}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Guaiaco ( Pau Santo )	<i>Guajacum officinale</i>	1,23 - 1,40
Cabriuva Vermelha *	<i>Myroxylon balsamum</i>	0,95
Pau Marfim *	<i>Balforodendron riedelianum</i>	0,84
Amendoim *	<i>Pterogyne nitens</i>	0,77
Canjerana *	<i>Cabralea cangerana</i>	0,67
Pinheiro do Paraná *	<i>Araucaria angustifolia</i>	0,55
Baguaçú *	<i>Talauma ovata</i>	0,56
Cedro *	<i>Cedrela sp.</i>	0,53
Mandioqueira *	<i>Didymopanax calvum</i>	0,52
Guapuruvú *	<i>Schizolobium parahybum</i>	0,32
Balsa	<i>Ochroma lagopus</i>	0,13 - 0,20

\* Dados das Fichas de Características das Madeiras Brasileiras - IPT, 1978.

b) Umidade:

As fórmulas  $r_{12} = P_{12} / V_{12}$  e  $r_o = P_o / V_o$  permitem perceber que existe estreita relação entre a massa específica  $r$  e o teor de umidade  $U$ . Com a variação no teor de umidade, o peso da madeira se alterará na proporção:

$$P_u = P_o ( 1 + U ) \quad (g) \quad \textcircled{4}$$

onde:

$P_u$  = peso da madeira com  $u\%$  de umidade

$P_o$  = peso da madeira com  $0\%$  de umidade

$U$  = teor de umidade da madeira em  $\% / 100$

Exemplo: Um pedaço de madeira pesa 100 g no estado totalmente seco.

Qual será o seu peso com 25 % de teor de umidade ?

Resposta:  $P_u = 100 ( 1 + 0,25 ) = 125 \text{ g}$

Abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) o seu volume também sofrerá alteração, na proporção dada pela fórmula abaixo:

$$V_u = V_o ( 1 + \alpha_{vu} ) \quad (cm^3) \quad \textcircled{5}$$

onde:

$V_u$  = volume da madeira com  $u \%$  de umidade

$V_o$  = volume da madeira com  $0 \%$  de umidade

$\alpha_{vu}$  = coeficiente de inchamento volumétrico entre  $0 \%$  e  $U \%$  de umidade (vide item 5. - contração e inchamento).

Disto resulta que a massa específica com uma porcentagem  $u$  de umidade, é definida pela fórmula 6, deduzida abaixo:

$$r_u = P_u / V_u = P_o ( 1 + u ) / V_o ( 1 + \alpha_{vu} )$$

$$\therefore r_u = r_o . ( 1 + u ) / ( 1 + \alpha_{vu} ) \quad (g / cm^3) \quad \textcircled{6}$$

Por ser  $\alpha_{vu}$  um valor de difícil determinação, pode-se usar a fórmula abaixo, somente entre teores de umidade de 0% a 30 %, apesar dela não ser exata:

$$ru = ro \cdot (1 + u) / (1 + 0,85 \cdot ro \cdot u) \quad (\text{g} / \text{cm}^3) \quad (7)$$

Exemplo: Qual a massa específica de uma madeira com  $ro = 0,55 \text{ g} / \text{cm}^3$  em 15 % de umidade ?

Aplicando a fórmula acima, teremos:

$$ru = 0,55 \cdot (1 + 0,15) / (1 + 0,85 \cdot 0,55 \cdot 0,15) \quad \therefore \quad ru = 0,59 \text{ g} / \text{cm}^3$$

O gráfico apresentado na figura 6, a seguir, descreve as variações em massa específica, em função do teor de umidade da madeira:

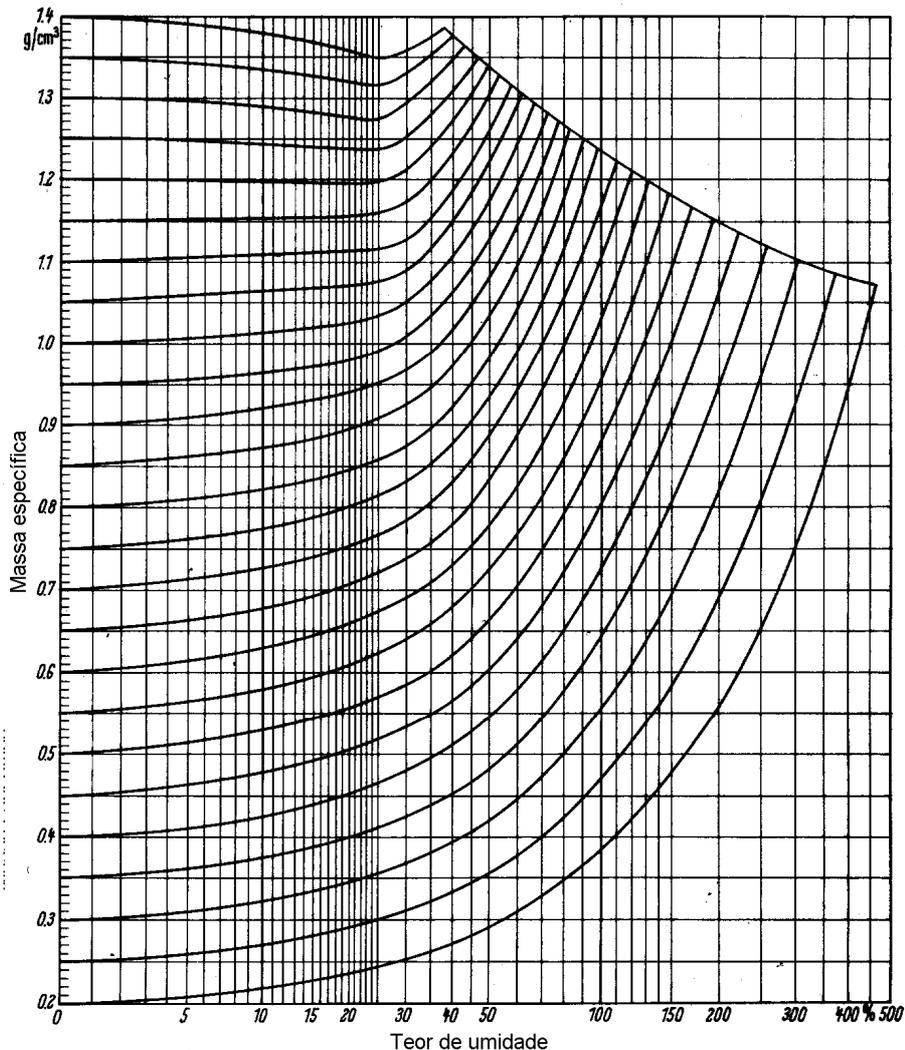


Figura 6. Variação da massa específica (**ru**) em função do teor de umidade (**U**).

c) Lenhos inicial e tardio:

As paredes delgadas das células da madeira do lenho inicial e as paredes espessas das células do lenho tardio, principalmente nas coníferas, determinam consideráveis diferenças na massa específica dentro de uma mesma peça de madeira, conforme ilustram as figuras 7 e 8 abaixo:

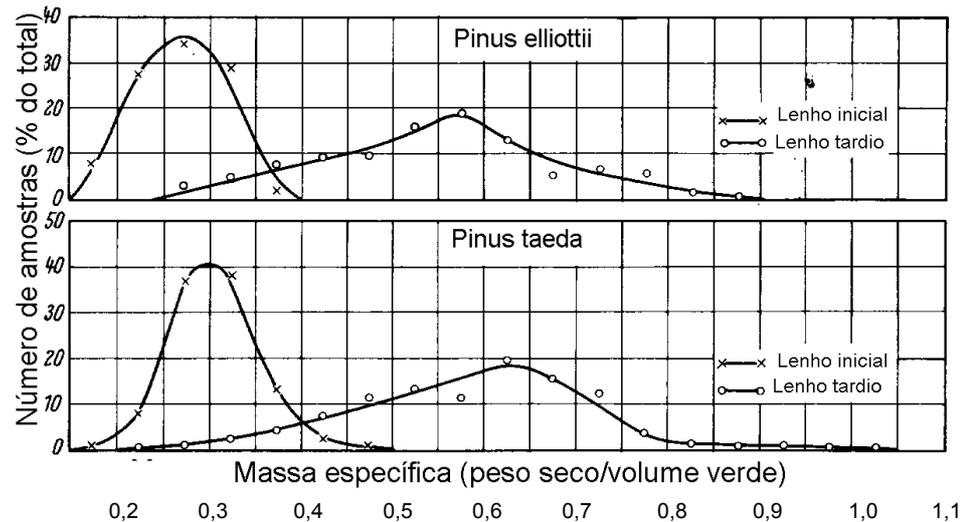


Figura 7. Distribuição da massa específica para os lenhos tardio e inicial

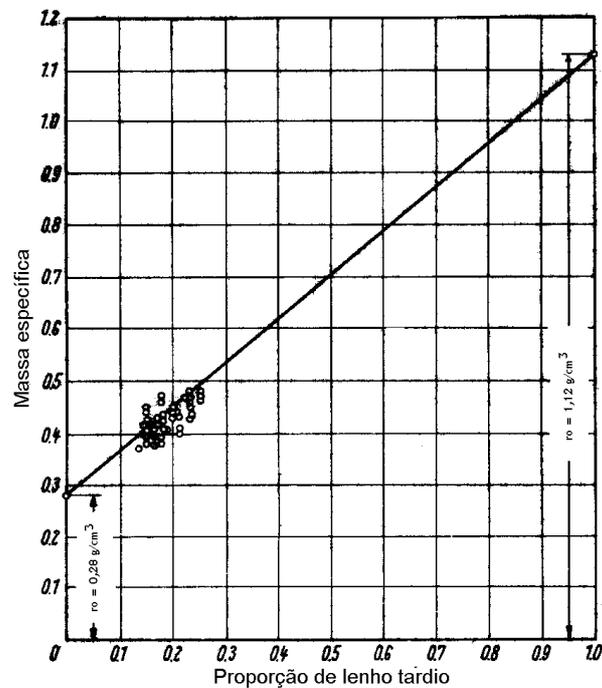


Figura 8. Relação entre massa específica ( $\rho$ ) e a proporção de lenho tardio (%) - (coníferas).

Nas folhosas, a diferença entre as massas específicas das madeiras de lenho inicial e lenho tardio é bem menos pronunciada que nas coníferas.

Exemplo: *Fraxinus excelsius* - madeira com porosidade em anel.

massa específica do lenho inicial =  $0,57 \text{ g / cm}^3$

massa específica do lenho tardio =  $0,75 \text{ g / cm}^3$

A dependência da massa específica aparente com o percentual de lenho tardio, apresenta, para esta espécie e em muitos outros casos, a situação mostrada na figura 9, apresentada a seguir:

d) Largura dos anéis de crescimento:

A largura dos anéis de crescimento não é uma referência segura para avaliação das propriedades da madeira, porém, para a maioria das coníferas, quanto mais largo o anel, maior será a proporção de lenho inicial e menor será a massa específica da madeira. Desta forma, a massa específica aparente da madeira de coníferas aumenta com a diminuição da largura dos anéis de crescimento.

Em folhosas **com porosidade em anel** se dá ao contrário (fig. 9), pois os poros de grandes diâmetros se localizam apenas no início do lenho inicial (com massa específica mais baixa). Assim, quanto mais largo o anel, **menor será a proporção** de madeira com mais porosidade dentro do lenho inicial do mesmo anel de crescimento, enquanto o volume e massa do restante do lenho inicial e do lenho tardio permanecem inalterados.

A variação em massa específica do lenho inicial em folhosas com porosidade em anel se explica pelo fato do lenho inicial se dividir em duas partes distintas, a saber: a muito porosa, desenvolvida imediatamente a seguir do lenho tardio do anel adjacente, limitando-se apenas a alguns vasos de largura; e a sem nenhum vaso desenvolvida a seguir, com maior massa específica em relação ao lenho poroso. Assim sendo, independente da largura do lenho tardio dentro de um mesmo anel de crescimento, quanto maior a largura do lenho inicial, maior será a massa específica deste anel de crescimento, pois menor será a proporção de madeira porosa dentro do lenho inicial do anel.

Por outro lado, folhosas **com porosidade difusa** quase não mostram variação neste sentido, devido à distribuição e aos tamanhos dos vasos serem heterogêneos dentro dos anéis de crescimento. A figura 10, apresentada a seguir, ilustra a diferença existente entre as massas específicas aparente de folhosas com porosidades em anel e difusa.

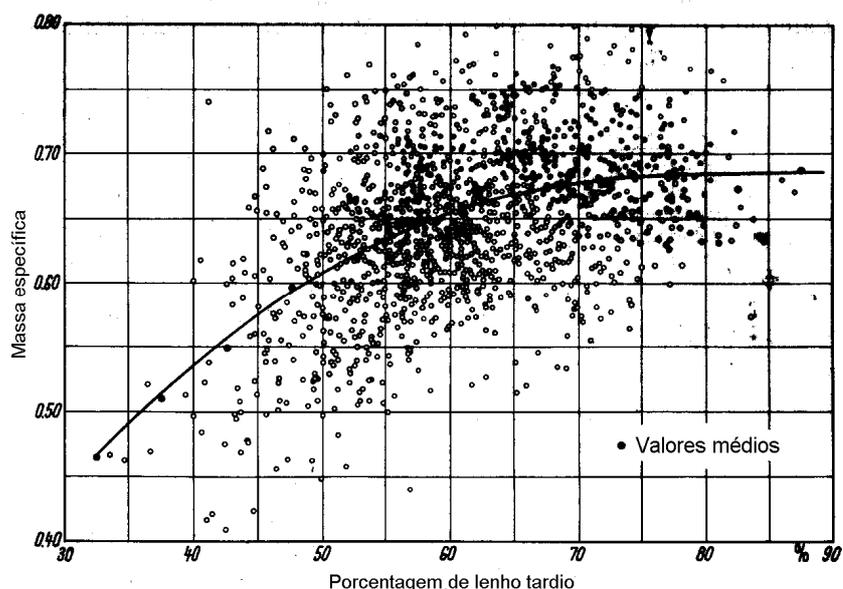


Figura 9. Variação da massa específica ( $\rho$ ) e da proporção de lenho tardio (para o *Fraxinus excelsius*) - Madeira com porosidade em anel .

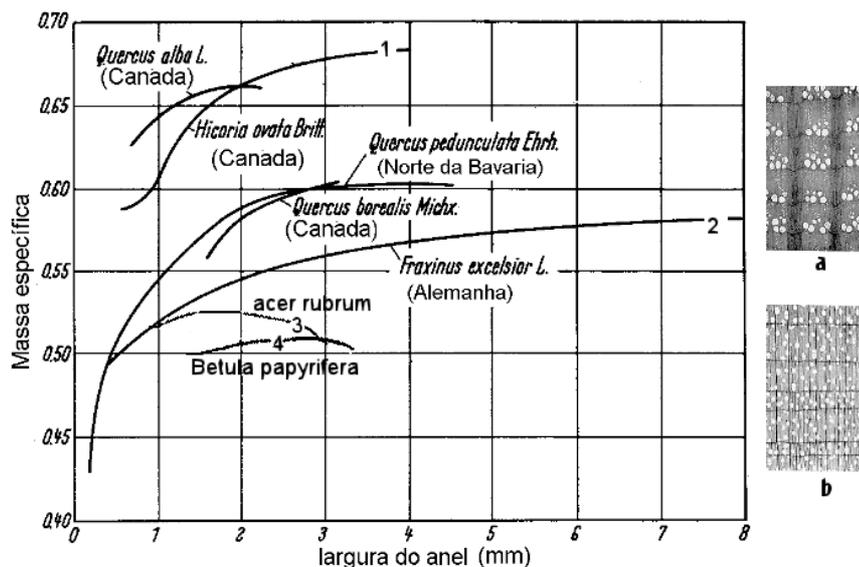


Figura 10. Relação entre a massa específica ( $\rho$ ) e a largura do anel de crescimento, para folhosas com porosidade em anel (a = 1 e 2) e com porosidade difusa ( b = 3 e 4 ).

e) Posição no tronco:

Como regra geral, a árvore forma anéis de crescimento mais largos na madeira do interior do fuste, próximo à medula, e anéis de crescimento estreitos na madeira exterior. Assim ocorrem variações na massa específica, no sentido transversal ao fuste, em decorrência das diferenças na largura dos anéis de crescimento e nas proporções entre os lenhos inicial e tardio. Para coníferas e folhosas com porosidade difusa, normalmente este aumento ocorre de dentro para fora no lenho juvenil, tendendo se estabilizar no lenho adulto, enquanto que, nas folhosas com porosidade em anel o valor máximo se situa próximo à medula, conforme ilustra a figura 11.

A diferença de massa específica entre as madeiras de cerne e de alburno é especialmente notada nas espécies que apresentam cerne distinto, enquanto que nas que possuem cerne fisiológico ou só alburno ela não é observada ou é muito pequena.

Igualmente, existem grandes variações na massa específica ao longo do tronco (figura 12), onde o valor máximo situa-se na base do mesmo, devido a existência de tecidos rígidos de sustentação. Desta posição, a massa específica decresce em direção à copa da árvore.

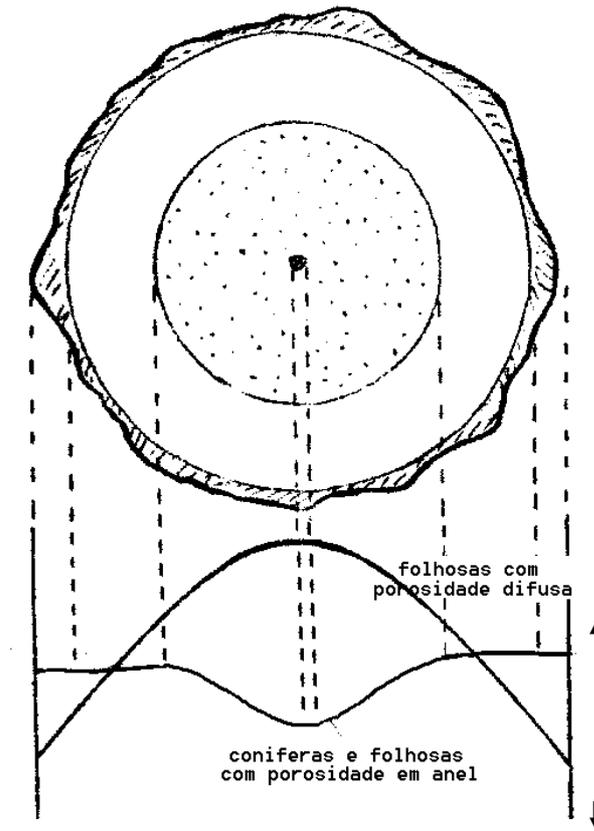


Figura 11. Variação da massa específica ( $r$ ) no sentido transversal, para coníferas e folhosas com porosidade difusa e folhosas com porosidade em anel.

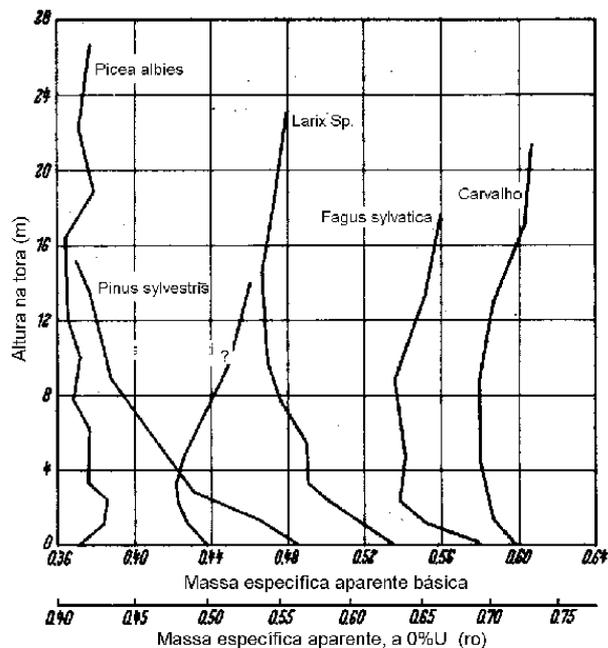


Figura 12. Relacionamento entre as massas específica aparente básica ( $r_u$ ) e a 0%U ( $r_0$ ) com a altura da árvore.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponíveis para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial não estão autorizadas, exceto se devidamente citada a sua fonte.

Considerando-se o exposto acima, pode-se dizer, de forma resumida, que a massa específica da madeira de coníferas está em função da idade da seção transversal da tora ou do fuste sendo analisados.

Tendo em vista que a da parte basal e mais idosa do fuste, além de ter tecidos rígidos de sustentação tem maior proporção de lenho adulto, enquanto as que se aproximam da copa não tem este lenho de sustentação diferenciado e tem menor idade de formação, com menor número de anéis de crescimento. Isso resulta em maior proporção de lenho juvenil nas seções transversais mais próximas da copa, ocasionando uma redução gradativa na massa específica à medida que se distancia da base, considerando-se toda a seção transversal.

Em madeira de **folhosas com porosidade difusa** esse comportamento é idêntico ao de coníferas, pois o padrão de crescimento de árvores e a homogeneidade de massa dentro dos lenhos inicial e tardio, e lenhos juvenil e adulto são similares. Entretanto, em **folhosas com porosidade em anel** a massa específica do lenho inicial como um todo, é afetada pela largura do anel de crescimento em que ele se encontra.

Como o lenho juvenil diz respeito à madeira de rápido crescimento, com anéis mais largos que os desenvolvidos na madeira de lenho adulto de uma árvore, em madeiras de folhosas com porosidade em anel, por consequência, os anéis de crescimento mais largos, dos primeiros anos de crescimento das árvores (madeira juvenil) têm maior densidade que os formados posteriormente (lenho adulto) e proporcionam que na seção transversal haja uma inversão do padrão observado para coníferas e folhosas com porosidade difusa.

#### 2.1.4.2. Influências externas

Entre as principais influências do ambiente sobre as árvores, temos:

##### a) Local de crescimento:

Clima, solo (umidade e nutrientes), altitude, declividade, vento, espaçamento, associação de espécies, etc., todas são variáveis que influenciam na taxa de crescimento das árvores ou em suas formas de desenvolvimento.

Por conseqüência, de forma direta ou indireta afetam a massa específica da madeira em formação.

Como exemplo da influência do local de plantio, podem-se citar as propriedades modificadas da madeira de reação: Segundo a literatura a massa específica do lenho de compressão (coníferas) ultrapassa o da madeira normal em 13 a 14 %, e a do lenho de tração (folhosas) é cerca de 12 % mais alta que a de madeira normal. Fenômeno semelhante ocorre na base dos ramos, onde também se forma este tipo de lenho anormal.

##### b) Métodos silviculturais:

Similarmente ao sub-item anterior, práticas de adubação, poda, desbaste, composição de espécies, etc., também afetam a massa específica, por influenciarem diretamente na taxa de crescimento das árvores e na forma de desenvolvimento do xilema de seus fustes.

## 2.2. MASSA ESPECÍFICA REAL

A massa específica real (  $r_H$  ) representa a massa específica do material lenhoso que constitui a madeira (não incluindo os espaços vazios existentes) e é, para todas as espécies de madeira, quase constante ( $r_H = 1,53$  a  $1,56$  g / cm<sup>3</sup>). Este intervalo reflete a relação existente entre o tipo e a porcentagem de cada componente que forma a madeira, bem como de sua massa específica. Como exemplo, pode-se observar a diferença entre as massas específicas da celulose e da lignina como:

Celulose:  $r = 1,58$  g / cm<sup>3</sup>

lignina:  $r = 1,38 - 1,41$  g / cm<sup>3</sup>

Para a determinação da massa específica real utiliza-se o método de deslocamento com hélio que, devido ao seu baixo peso molecular e por não ser absorvido pela celulose, preenche totalmente todos os espaços macroscópicos e microscópicos do lenho.

Diferentemente da massa específica real, a massa específica aparente depende do tipo e da formação do tecido celular, especialmente das dimensões dos lumens e das substâncias constituintes da parede celular.

A figura 13 ilustra esquematicamente a variação entre as células dos lenhos inicial e tardio em corte transversal, cujos tipos e proporções são os maiores responsáveis pelas variações em massa específica aparente da madeira: lenhos de madeiras leves, com células de lumens grandes, podem conter até mais de 90 % de espaços vazios, enquanto os de madeiras mais pesadas poderão ter apenas 6 %. Pela mesma razão, ocorre a variação na massa específica aparente entre espécies de madeira, dentro do intervalo de  $0,13$  g / cm<sup>3</sup> a  $1,40$  g / cm<sup>3</sup>.

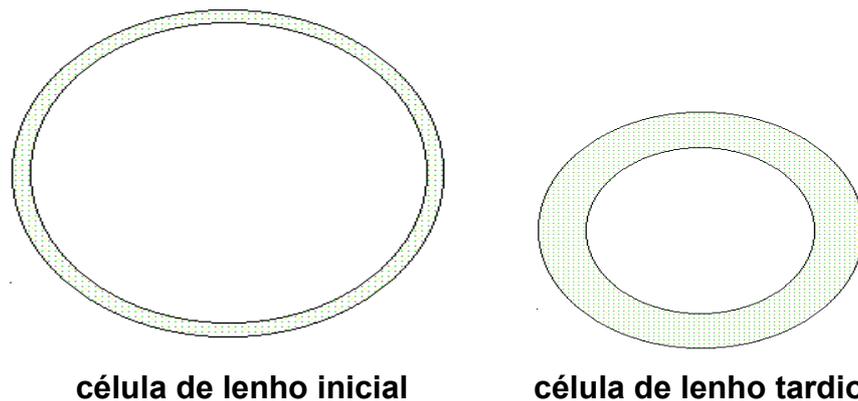


Figura 13. Representação esquemática das paredes celulares, correspondentes aos lenhos inicial e tardio da madeira.

A relação entre o lumem e a parede celular é dada pela fórmula abaixo:

$$Lu = r^2 / (R^2 - r^2) \quad (8)$$

onde:

Lu = Relação lumem / parede celular, em área da seção transversal

R = Raio maior

r = Raio menor

### 3. UMIDADE

A massa específica da madeira de uma árvore recém cortada está em função da água contida nos seus espaços celulares e intercelulares (**água livre ou de capilaridade**), da água impregnada nas paredes celulares (**água de impregnação**) e da água que participa da sua constituição química (**água de adsorção química**).

Como uma consequência óbvia no que tange a custos de transporte, o teor de umidade da madeira é um fator de grande importância, normalmente inviabilizando que a madeira no “estado verde” seja industrializada a grandes distâncias da área de exploração.

Afora o fato da variação do teor de umidade da madeira causar alterações em seu volume, estas alterações se dão em proporções diferentes segundo os três sentidos anatômicos da madeira, o que a caracteriza um material anisotrópico.

Assim, o controle do teor de umidade da madeira é indispensável para que possamos utilizá-la de forma adequada, evitando o desenvolvimento de defeitos como empenamentos, arqueamentos, torções, etc. Estes defeitos são comumente observados em artigos de madeira confeccionados antes da madeira entrar em equilíbrio higroscópico com as variáveis do ambiente (temperatura e umidade relativa do ar) em que estes artigos serão mantidos em uso.

O teor de umidade da madeira também está relacionado com as propriedades de resistência da madeira (propriedades mecânicas), com a maior ou menor facilidade em trabalhar com este material (trabalhabilidade), com seu poder calorífico, sua suscetibilidade a fungos, entre outras propriedades de importância a serem abordadas nesta apostila.

Para ilustrar a necessidade de controlar o teor de umidade da madeira, podem-se citar o elevado teor de umidade, desejado em toras a serem laminadas ou faqueadas (melhora a trabalhabilidade); teor de umidade entre 6% e 10% para lâminas e cavacos na manufatura de chapas compensadas e aglomeradas, para eliminar riscos de explosão decorrentes da formação de bolsas de vapor d'água durante a prensagem a quente; teor de umidade abaixo de 20% para evitar o ataque de fungos; e teor de umidade de equilíbrio alcançado antes da confecção de artigos de madeira, para evitar futuras deformações e outros defeitos.

### 3.1. DEFINIÇÃO

**Teor de umidade de uma madeira** é a relação entre o peso da água contida no seu interior e o seu peso no estado completamente seco, expresso em porcentagem, usualmente calculado pela seguinte fórmula:

$$U = [( P_u - P_o ) / P_o ] \cdot 100 \quad (\%) \quad \textcircled{9}$$

onde:

U = Teor de umidade da madeira;

$P_u$  = peso da madeira úmida; e

$P_o$  = peso da madeira seca a (103 +/- 2)°C, ou seja, a 0% de umidade.

Exemplo: Se tivermos que determinar o teor de umidade de uma peça de madeira que originalmente pesava 1.500g, qual seria este valor se após sua secagem a 0%U ela pesasse a 1.300g ?

Aplicando-se a fórmula ⑨ teremos:

$$U = [(P_u - P_o) / P_o] \cdot 100$$

$$U = [(1500 - 1300) / 1300] \cdot 100$$

$$U = 200 / 1300 \cdot 100$$

$$U = 15,38 \%$$

### 3.2. MÉTODOS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Existem vários métodos para determinar o teor de umidade da madeira, entretanto eles se limitam apenas a alguns, em função da forma e do estado que a madeira poderá se encontrar e da precisão desejada; os mais utilizados são:

- a) Método por pesagens (mais usuais);
- b) Métodos químicos, por destilação e por titulação (mais precisos);
- c) Métodos que utilizam aparelhos elétricos (mais rápidos).

#### 3. 2.1. Método por Pesagens

Inicia-se com a pesagem da amostra com teor de umidade desconhecido (**P<sub>u</sub>**) e anotando-se o seu peso. Em seguida a amostra é levada à estufa, a (103° C +/- 2 °C), até sua secagem completa. Para verificarmos que isso já tenha ocorrido, há necessidade de pesagens periódicas até a observância de peso constante, indicando a total remoção da água na condição de climatização utilizada.

Observada a secagem completa da madeira, a amostra é resfriada em temperatura ambiente, no interior de um dessecador contendo algum produto higroscópico que a mantenha totalmente desidratada, a exemplo da sílica gel com indicador de umidade, normalmente utilizada.

Com o peso obtido após a secagem ( $P_O$ ), determina-se o peso da água removida ( $P_U - P_O$ ) e relaciona-se este valor com peso da madeira seca ( $P_O$ ).

Posteriormente às determinações dos pesos com a madeira úmida e seca, estes valores são relacionados, e a razão entre o peso úmido e peso seco é multiplicada por 100 para obtermos o resultado em porcentagem (fórmula 9).

Este processo, mesmo que longo e trabalhoso, geralmente é considerado um dos mais exatos e utilizados em laboratório. Entretanto sua exatidão depende da precisão da balança / massa da amostra e do cuidado e rapidez do operador ao efetuar a pesagem da amostra seca, uma vez que neste estado a madeira adquirirá umidade da atmosfera com grande velocidade.

Para madeiras que contêm altos teores de material volátil (extrativos), este método não é adequado, pois várias substâncias computadas na primeira pesagem, que não a água, poderão se volatilizar, fornecendo um teor de umidade irreal.

### 3.2.2. Método Químico por Destilação

Este método é um dos mais recomendados para a determinação do teor de umidade de madeiras ricas em resinas ou óleos essenciais. Ele consiste em colocar aproximadamente 10g de madeira reduzida a tamanho de cavacos em um balão / frasco contendo algum tipo de solvente orgânico que tenha temperatura de ebulição superior à da água, e de menor densidade (xylool, toluol, etc.), o qual será aquecido para que o solvente entre em ebulição.

A temperatura de ebulição do solvente, superior à da água, é transmitida para a madeira, fazendo que a água existente em seu interior também entre em ebulição e seja removida com rapidez. Como conseqüência ambos, solvente e água passam à forma de vapor, os quais serão posteriormente condensados e coletados, e os diferentes líquidos separados por gravidade, como ilustrado / descrito a seguir:

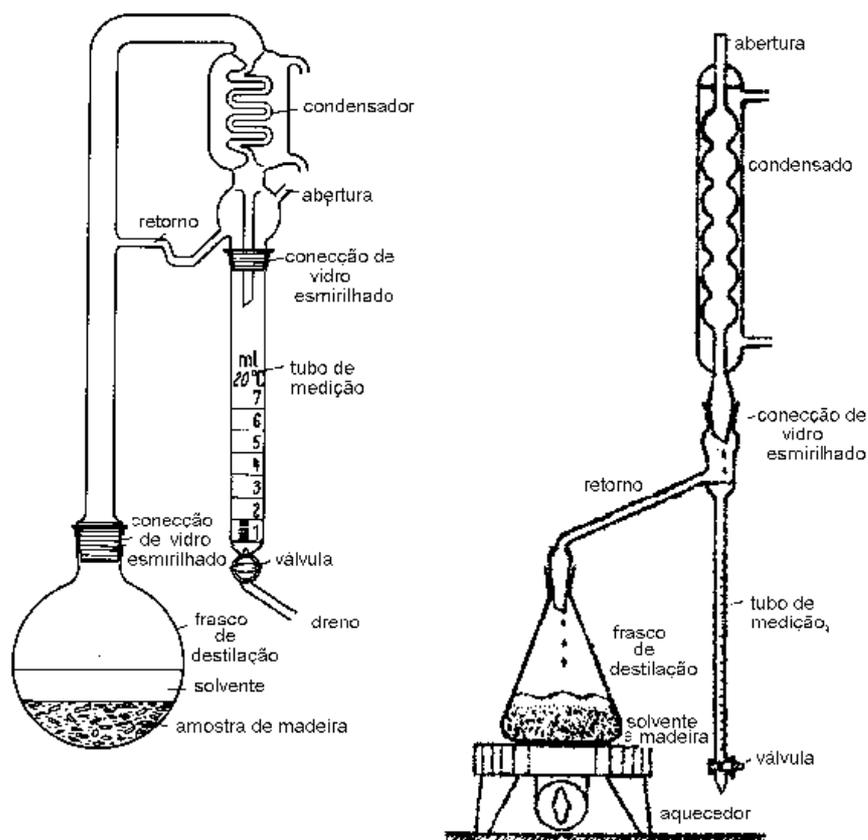


Figura 14. Aparelhagem utilizada para a determinação do teor de umidade pelo método de destilação.

Sobre o balão/ frasco, conecta-se um refrigerante e uma proveta graduada em centímetros cúbicos (Figura 14). Ocorrendo a ebulição, os vapores do solvente e da água se condensam ao entrarem em contato com o refrigerante, gotejando na proveta graduada (tubo de medição).

Como o solvente e a água condensados não se misturam, e pelo fato da densidade da água ser mais alta que a do solvente utilizado, a água se acumula na parte inferior da proveta, enquanto o volume excedente de solvente condensado sobre a água retorna para o balão sob aquecimento.

A operação de destilação se prolonga pelo tempo necessário, até que o volume de água coletado seja constante (+/- 6 horas). Este volume é então determinado pela leitura em mililitros na proveta graduada, equivalendo ao peso da água em gramas, uma vez que sua densidade é de  $1 \text{ g/cm}^3$  e a cada mililitro de água corresponde um centímetro cúbico.

A determinação do teor de umidade da madeira é feita com uma precisão de aproximadamente 1% U, e calculada por meio da seguinte expressão:

$$U = [ Pa / ( Pi - Pa ) ] . 100 \quad \textcircled{10}$$

Onde:

U = Teor de umidade da madeira;

Pa = Peso da água coletada em gramas, lida em ml ;

Pi = Peso inicial da amostra, em gramas.

Solventes mais densos que a água também poderão ser utilizados para a determinação do teor de umidade da madeira, a exemplo do tetracloreto.

Pelo fato dos cavacos de madeira serem menos densos que o solvente, eles sobrenadarão, não existindo o perigo de ficarem superaquecidos. Contudo, sendo ele mais denso que a água, se faz necessário a utilização de um coletor especial para separar a água do solvente.

Caso sejam utilizados outros solventes, que possuam baixas temperaturas de ignição, o aquecimento do balão deverá ser efetuado em banho-maria ou banho de areia ou, preferencialmente, sobre camisas aquecidas eletricamente.

A utilização deste método tem os seguintes inconvenientes:

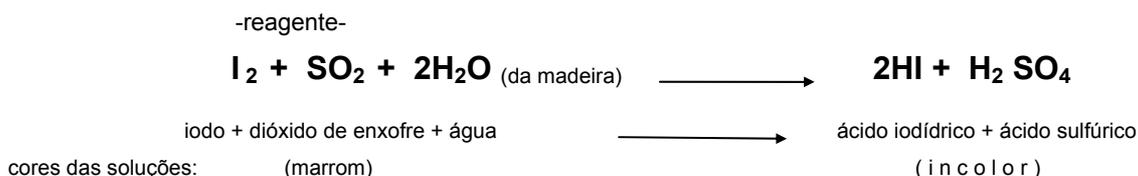
- a) Necessidade de laboratório adequado e pessoal técnico idôneo;
- b) necessidade de vidraria de laboratório frágil e custosa;
- c) emprego de solventes custosos; e
- d) escapamento de vapores insalubres e facilmente inflamáveis.

### 3.2.3. Método Químico por Titulação (Karl Fischer)

Trata-se de um processo de determinação de umidade baseado em reações químicas que ocorrem na presença de água.

O reagente Karl Fischer é constituído por uma mistura de iodo, dióxido de enxofre e piridina em metanol. Com ele podemos determinar pequenas quantidades de água, por meio da reação que provoca a redução do iodo pelo dióxido de enxofre na presença de água.

Para determinar o teor de umidade da madeira por este método, prepara-se aproximadamente 0,5 g de cavacos de madeira, que são umedecidos com metanol durante 6 horas. Em seguida os cavacos são tratados com um líquido reagente Karl Fischer, ocasionando a seguinte reação:



Adiciona-se o reagente Fischer até que a solução resultante torne-se incolor. O volume de reagente gasto na titulação da amostra é utilizado para a determinação do teor de umidade da madeira com uma precisão de +/- 0,1% de umidade.

Por ser o reagente Karl Fischer um dessecante poderoso, ambos amostra de madeira e reagente devem ser protegidos contra a umidade atmosférica em todos os procedimentos.

A figura 15 apresenta o equipamento recomendado, para a determinação do teor de umidade da madeira pelo método Karl Fischer.

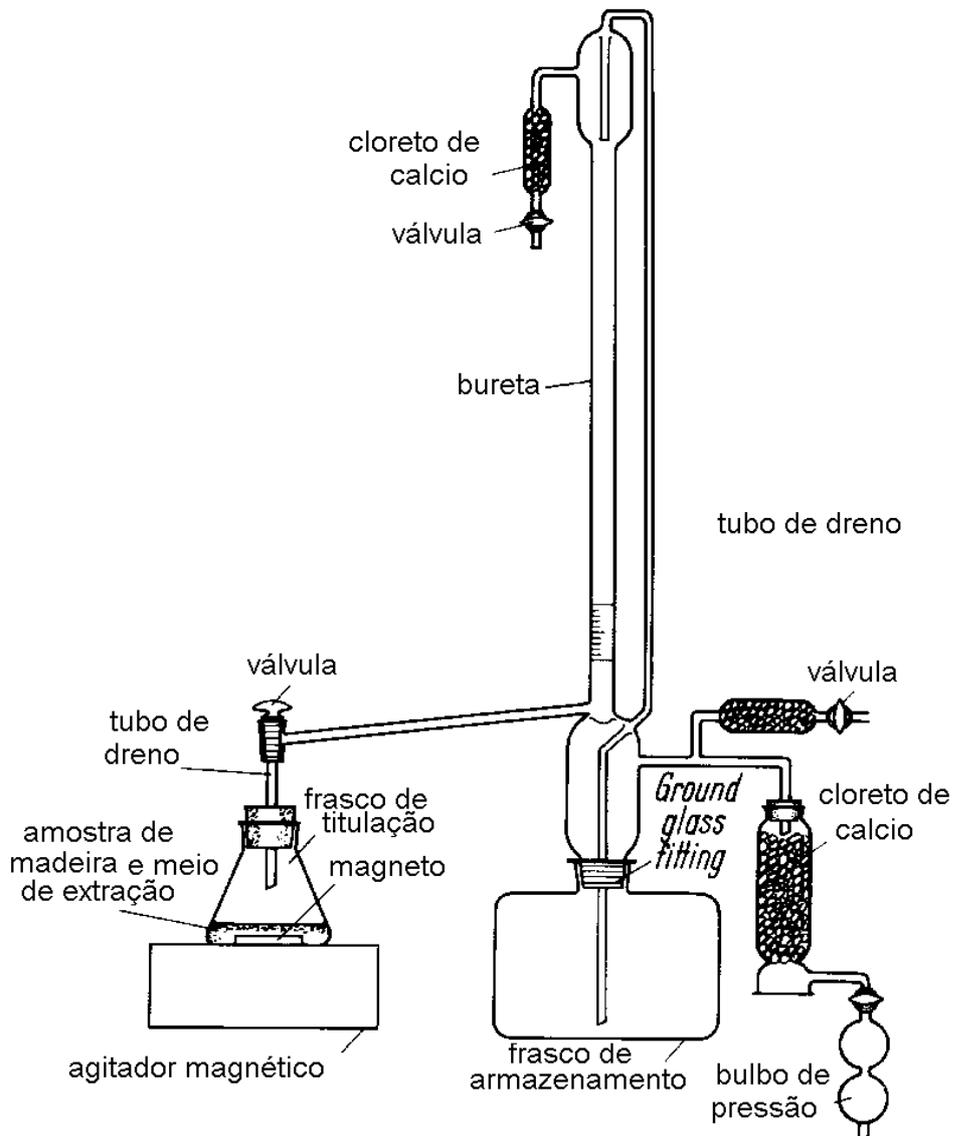


Figura 15. Instalação utilizada para a determinação do teor de umidade da madeira pelo método Karl Fischer.

#### 3.2.4. Aparelhos Elétricos

Os aparelhos elétricos utilizados para a determinação do teor de umidade da madeira podem ser construídos de duas formas distintas: Os baseados na resistência da madeira à passagem de uma corrente contínua, ou na sua capacidade elétrica

A principal desvantagem dos aparelhos elétricos é não ser possível a determinação de teores de umidade inferiores a 6%, e a pouca precisão alcançada a teores de umidade superiores a 30%, embora tenham escalas para medições até 60% U.

#### 3.2.4.1. Aparelhos baseados em medidas de resistência

Estes aparelhos são normalmente utilizados hoje em dia, e baseiam-se na resistência que a madeira oferece à passagem de uma corrente elétrica contínua.

A **resistência da madeira à passagem** elétrica é muito variável com pequenas variações do teor de umidade da madeira, sendo este diretamente determinado por aparelhos portadores de escalas convertidas para a sua medição, em percentuais, em vez de se determinar resistência elétrica propriamente dita.

Este tipo de aparelho determina diretamente teores de umidade compreendidos entre 6 e 25%, com precisão de aproximadamente 1,5%U, são portáteis, de pequenas dimensões e não necessitam de instalações elétricas externas para a sua utilização, pois funcionam com baterias de fácil aquisição no mercado.

Além das vantagens supracitadas, estes aparelhos possuem eletrodos em formas variadas, adequados para diferentes espessuras de madeira e, até mesmo, para a determinação do teor de umidade de serragem.

A resistência à passagem da corrente elétrica também varia com a espécie de madeira, com a temperatura e tipo da grã da madeira, esta última influenciando na direção de circulação da corrente elétrica (paralela ou perpendicularmente às fibras).

#### 3.2.4.2. Aparelhos baseados na capacidade elétrica

Estes aparelhos baseiam-se na medição da capacidade elétrica da madeira, ou da **constante dielétrica ( $\epsilon$ )**. Eles têm, afora o princípio de funcionamento, as mesmas características dos aparelhos anteriormente descritos.

### 3.3. AMOSTRAGEM

É de grande importância para a determinação do teor de umidade, a metodologia de seleção de corpos-de-prova, para representar o tipo de peças de madeira que constituem o lote amostrado.

A Norma COPANT No. 30.1–003 regulamenta a metodologia de amostragem e as dimensões dos corpos-de-prova, com as seguintes observações:

Para a execução das medições, a norma recomenda o uso do formulário 1, apresentado a seguir, para o método de determinação por pesagem.

O conteúdo de umidade no alburno de algumas espécies varia apreciavelmente em relação ao cerne. Por tal razão, as proporções das madeiras de alburno e de cerne nos corpos-de-prova devem ser equivalentes ao do lote de madeira.

Os corpos-de-prova não devem ser retirados da camada superficial ou das extremidades das peças, pois estas são normalmente mais secas, não representando o conteúdo de umidade interior de uma peça de madeira. Pela mesma razão não devem ser retirados do interior das peças, pois eles terão mais umidade que a correspondente à da peça como um todo.

A umidade dentro de uma peça é normalmente representada por uma distribuição parabólica, especialmente após a secagem. Portanto, para se obter um valor médio do teor de umidade de uma peça de madeira, as amostras deverão ser retiradas a uma distância da superfície de 0,2 a 0,3 vezes a espessura da peça.

Como exemplo, pode-se citar entre as formas de determinação do teor de umidade a ser executada, a com o uso de eletrodos.

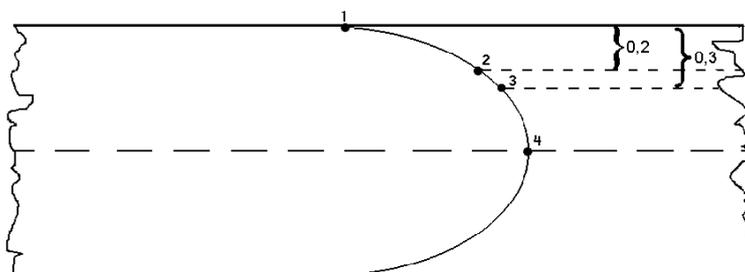


Figura 16. Representação da curva e distribuição da umidade dentro de uma peça de madeira seca, e de pontos representativos para a sua determinação.



As amostras de madeira não devem ter nós, pois apesar de ainda ser desconhecida a sua influência sobre o teor de umidade, este material constitui um tipo especial de lenho, não representando a madeira normal.

No caso de utilizarmos aparelhos elétricos, o tipo de eletrodo deve ser adequado à classe e espessura da madeira, para que as leituras efetuadas correspondam ao teor de umidade médio da peça sendo considerada.

### 3.4. DEPENDÊNCIA DA UMIDADE DA MADEIRA

A estreita relação entre a massa específica e o teor de umidade da madeira, já mencionada, define teoricamente o máximo teor de água que uma madeira pode conter. Isto pode ser expresso pela fórmula abaixo como:

$$U_{\max} = 0,28 + [ (1,50 - r_o) / (1,50 \cdot r_o) ] \cdot 100 \quad (\%) \quad (11)$$

onde:

0,28 = Valor adotado como teor de umidade médio, aproximado ao ponto de saturação das fibras (PSF) para todas as madeiras.

1,50 = Valor médio aproximado à massa específica da matéria lenhosa que constitui a madeira ( $r_H$ ), utilizado para facilidade de cálculo.

$r_o$  = Massa específica aparente, a 0%U ( $\text{g/cm}^3$ ).

O teor máximo de umidade de uma madeira depende, portanto, da massa específica aparente que, conseqüentemente, é distinta para cada espécie florestal.

Exemplo: Qual é o teor máximo de umidade que a madeira de Guaiaco poderia conter? (massa específica = 1,40 g/cm<sup>3</sup>)

Aplicando-se a fórmula 11 teremos:

$$U_{\max} = 0,28 + [ (1,50 - 1,40) / (1,50 \cdot 1,40) ] \cdot 100 = 33\%U$$

A mesma determinação, se feita para a madeira de Pinus sp. com massa específica a 0%U = 0,35 g/cm<sup>3</sup>, seria igual a:

$$U_{\max} = 0,28 + [ ( 1,50 - 0,35) / (1,50 \cdot 0,35) ] \cdot 100 = 247\%U.$$

O **ponto de saturação das fibras (PSF)** pode ser definido como o teor de umidade da madeira no momento em que esta já perdeu toda a sua água livre (lumens e espaços intercelulares vazios), porém ainda mantém as paredes celulares saturadas de umidade. Ele varia de espécie para espécie, situando-se para:

- a. Folhosas com porosidade difusa, sem cerne distinto, em aproximadamente 32% a 35% de teor de umidade;
- b. Coníferas e folhosas com porosidade em anel, ambas com cerne distinto, em aproximadamente 22% a 24% de teor de umidade.

Na prática e para fins didáticos, para facilidade de cálculos e no sentido de evitar confusões onde o PSF específico de cada espécie deveria ser usado, adota-se o valor de 28% como teor de umidade correspondente ao PSF de todas as espécies.

Obviamente, na necessidade de determinações que exijam maiores precisões, o ponto de saturação das fibra (PSF) e a massa específica real (rH) específicos de uma espécie em particular deverão ser utilizados.

Como a madeira é um material higroscópico, e por usualmente estar sujeita a alterações no teor de umidade em função das variáveis do meio ambiente, ela está quase sempre perdendo ou ganhando umidade para atingir um estado de equilíbrio com a atmosfera. Quando isto ocorre, diz-se que a madeira está em “equilíbrio higroscópico” com o ambiente.

O teor de umidade, quando a madeira atinge o equilíbrio higroscópico, está em função das condições climáticas e da espécie florestal e é conhecido como “umidade de equilíbrio da madeira”. Isto ocorre quando se estabelece um equilíbrio entre a tensão de vapor d’água contido no ar e a pressão de vapor interna existente no interior do lenho.

A umidade de equilíbrio atingida pela madeira depende, principalmente, da **umidade relativa do ar** e de sua **temperatura**.

#### Umidade absoluta do ar

A massa real de vapor contido em um volume de ar, em g/m<sup>3</sup>, denomina-se umidade absoluta do ar.

A umidade relativa do ar ( $\varphi$ ) é dada pela relação entre a massa de vapor real ( $p$ ) contido em um volume de ar, e a máxima massa de vapor que teoricamente o mesmo volume de ar poderia conter ( $ps$ ) a igual temperatura.

$$\varphi = p / ps \cdot 100 \quad (\%) \quad \textcircled{12}$$

A umidade relativa do ar pode ser determinada através de higrômetros de cabelo, psicrômetros, cloreto de lítio, ou com indicadores de umidade químicos.

As umidades, tanto absolutas como as relativas, e a sua dependência com a temperatura, podem ser determinadas através do diagrama apresentado na figura 17, a seguir:

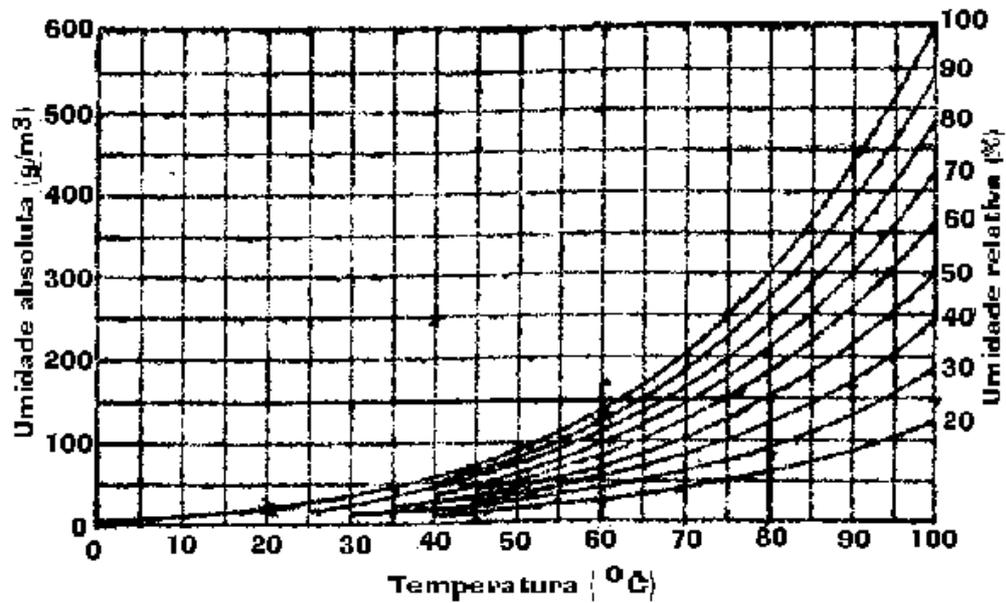


Figura 17. Relação entre a temperatura, umidade absoluta e umidade relativa ( $\varphi$ )

Exemplos:

- a. Qual é a umidade relativa do ar em um ambiente a  $80^{\circ}\text{C}$  e com umidade absoluta do ar de  $150\text{ g/m}^3$  ?

Resposta: UR = 49%

- b. Quantas gramas de água contém um metro cúbico de ar, num ambiente com uma temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  e 100% de umidade relativa ?

Resposta: 210 g de água/  $\text{m}^3$

- c. Um ambiente a  $75^{\circ}\text{C}$  e 100% de umidade relativa será resfriado para  $35^{\circ}\text{C}$ . Qual a quantidade de água contida no ar e, respectivamente, o que acontece em consequência do resfriamento ?

Respostas:

- A  $75^{\circ}\text{C}$  a quantidade de água contida no ar é de  $250\text{ g/m}^3$  e a  $35^{\circ}\text{C}$  é de  $50\text{ g/m}^3$ .

- A mudança de temperatura nas condições acima, provoca a condensação de 200 g de água /m<sup>3</sup>.

d. Uma câmara de secagem na temperatura de 20<sup>0</sup>C e  $\varphi = 100\%$  UR , é aquecida até 55<sup>0</sup>C. Qual será a umidade relativa do ar ao ser atingida esta temperatura?

Resposta:  $\varphi = 20\%$

O conteúdo máximo de umidade da madeira, em função da massa específica, pode ser determinado diretamente no gráfico apresentado a seguir (fig. 18).

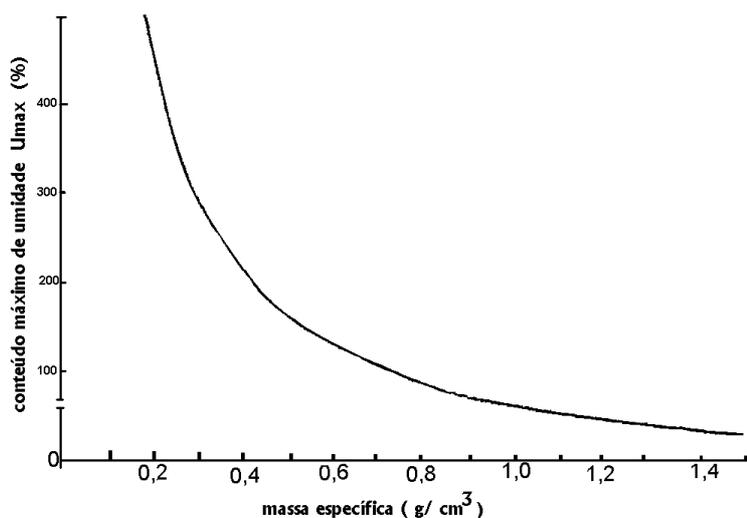


Figura 18. Relação entre a massa específica ( $\rho$ ) e o teor de umidade máxima da madeira ( $U_{max}$ ).

Do gráfico apresentado na figura 18, pode-se concluir que:

- Madeiras com baixas massas específicas apresentam uma capacidade de armazenamento de umidade máxima elevado;
- Madeiras com altas massas específicas apresentam uma capacidade de armazenamento de umidade máximo baixo.

A constituição anatômica da madeira também tem grande influência sobre o teor de umidade: Dentro do mesmo anel de crescimento, por exemplo, o lenho inicial com células de paredes finas e lumens grandes, normalmente contem mais água que o lenho tardio constituído de células com paredes espessas e lumens pequenos.

Em árvores vivas ou recém cortadas, o teor máximo de água é encontrado normalmente no alburno, já que no cerne, devido a suas transformações fisiológicas, sempre há um decréscimo no teor de umidade - fazem exceção a esta regra, madeiras de cerne úmido, em parte com problemas patológicos.

### 3.5. SORÇÃO DA MADEIRA

O lenho de uma árvore recém abatida apresenta um elevado conteúdo de umidade, distribuído em três "tipos de água" diferentes, conforme as representações gráficas apresentadas na figura 19 apresentada a seguir, sendo elas:

- "Água livre ou de capilaridade"**, a que preenche seus espaços capilares, formados pelos lumens e espaços intercelulares ---> (acima do ponto de saturação das fibras, ou seja, acima de aproximadamente 28%U);
- "Água de impregnação adsorvida"**, a impregnada nos espaços submicroscópicos da parede celular ---> em camadas polimoleculares, ligadas por forças elétricas polares ( entre 6% e 28%U ) e;
- "Água de adsorção química"**, a aderida às interfaces existentes entre moléculas de celulose e de hemicelulose por forças de valências secundárias monomoleculares ---> por forças de Van de Wall e pontes de hidrogênio, entre 0% e 6%U.

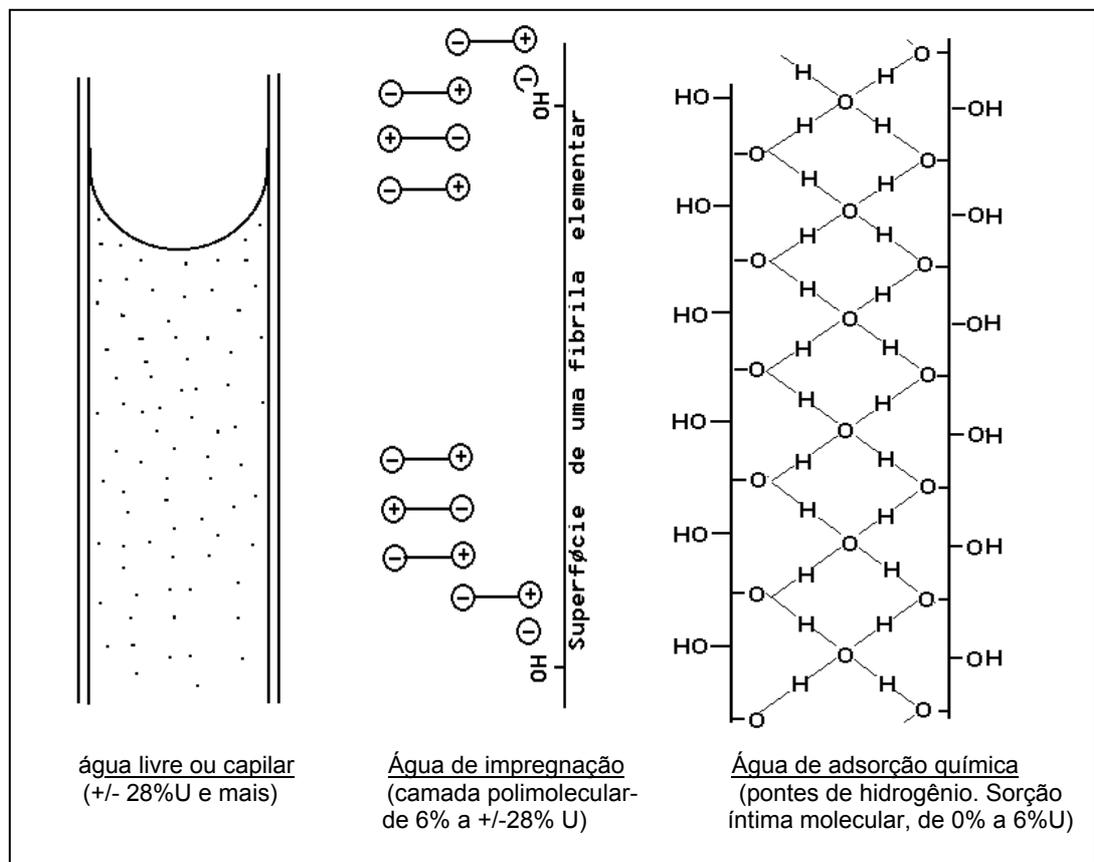


Figura 19. Possíveis formas de água existentes na madeira

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponíveis para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial não estão autorizadas, exceto se devidamente citada a sua fonte.

Após o corte de toras, a madeira úmida, ao ser serrada e empilhada, tem o seu teor de umidade reduzido por evaporação. A partir deste momento, a água livre é o primeiro tipo de água a ser removido.

Teoricamente somente depois de toda água livre ou de capilaridade ser removida começa ocorrer a perda da água de impregnação contida nos espaços submicroscópicos, existentes entre os constituintes estruturais da parede celular (entre microfibrilas, microfibrilas e fibrilas elementares de celulose, bem como do interior das regiões amorfas das fibrilas elementares). Neste momento, o teor de umidade da madeira corresponde ao PSF e é de grande importância prática.

A maioria das propriedades da madeira independem do seu teor de umidade, enquanto este se situa acima do PSF. No entanto, elas passam a ser bem relacionadas com o teor de umidade quando este se encontra abaixo do PSF, pois a partir daí até 0% de umidade, a madeira se contrairá e, de forma geral, torna-se mais resistente.

A retirada da água livre pouco altera a madeira, além de seu peso próprio. Ao contrário, com a remoção da água de impregnação, que preenche os espaços submicroscópicos e separam os constituintes estruturais da parede celular, além da redução em peso ocorrem importantes modificações com aproximação das micelas, micro e microfibrilas, conferindo-lhe maior rigidez. Por essa razão, somente a variação do conteúdo da água contida na parede celular altera o volume e afeta a resistência da madeira.

O comportamento de algumas propriedades da madeira em função do teor de umidade é apresentado pelo gráfico da figura 20 abaixo.

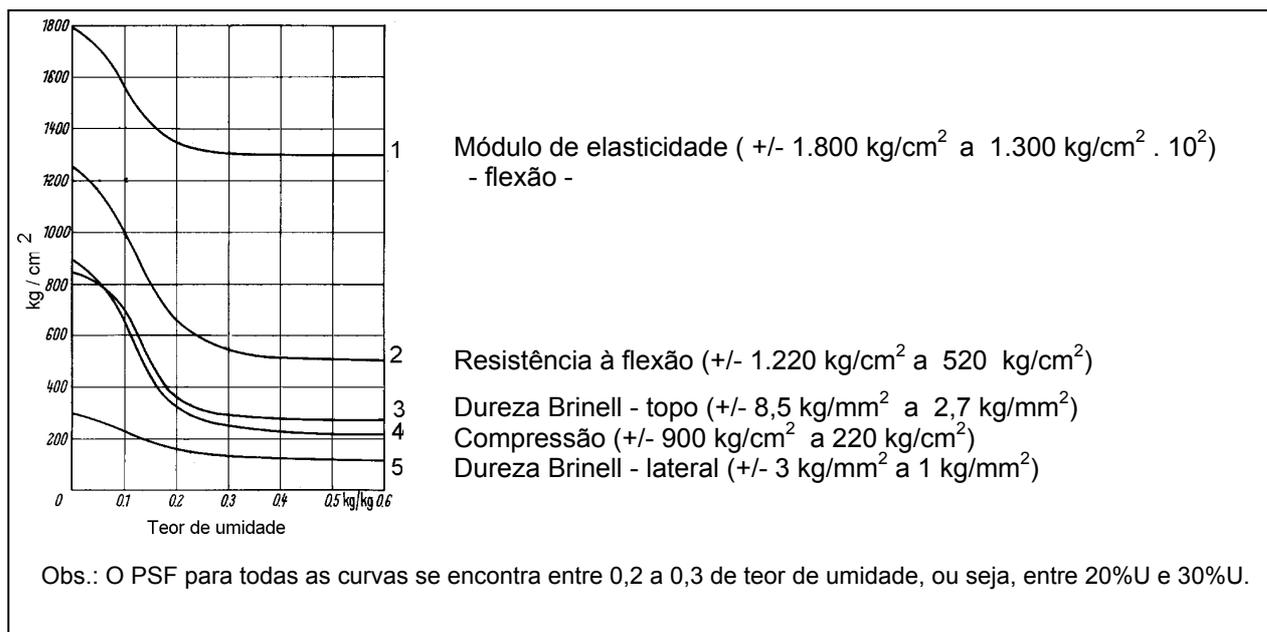


Figura 20. Relação entre várias propriedades de resistência mecânica e o teor de umidade da madeira (U%).

Note-se que a variação das propriedades de resistência da madeira sempre ocorre no intervalo higroscópico da madeira, de 0%U ao PSF (aproximadamente 28%U).

Fenômeno contrário ao de perda de umidade da madeira para o ambiente ocorre se a colocarmos em ambiente úmido: A madeira adquirirá umidade e terá suas propriedades de resistência reduzidas gradativamente com o aumento no teor de umidade, entre 0%U e o PSF. A partir deste ponto (PSF) o aumento no teor de umidade da madeira só aumentará sua massa e sua resistência se manterá estável.

De fato, dentro das etapas de sorção, não há uma separação estanque entre elas: Ocorre **adsorção química** quando a madeira adquire umidade do meio ambiente, e o seu teor de umidade se encontra entre aproximadamente 0% e 6%; a **adsorção** ocorre entre aproximadamente 6% e 28%U (PSF) e, finalmente, a **condensação** a teores de umidade superiores ao PSF.

O termo **adsorção** refere-se à capacidade de assimilação espontânea de água pela madeira, decorrente de um aumento de vapor de água na atmosfera, até que se atinja um equilíbrio entre a umidade da madeira e a do meio ambiente. Este fenômeno depende do teor de umidade atual da madeira e da umidade do ar, que se

relaciona à umidade relativa ( $\varphi$ ) e à temperatura do ar do ambiente em que a madeira se encontra, condicionando-a a se equilibrar com maior teor de umidade .

O termo **desorção** é utilizado quando o fenômeno de adsorção se dá de forma inversa, ou seja, quando a madeira perde umidade para se equilibrar com o meio ambiente. Sua ocorrência também é dependente das variáveis umidade relativa e temperatura do ar supracitadas, porém quando estas condicionam a madeira a se equilibrar com menor teor de umidade.

Portanto, o termo **adsorção** é utilizado quando nos referimos à aquisição de água espontânea pela madeira, enquanto **desorção** refere-se à perda de água espontânea pela madeira.

Um fato curioso que ocorre com a madeira, com a perda ou ganho em teor de umidade dentro do seu intervalo higroscópico, é que durante a sua secagem (**desorção**) a umidade de equilíbrio em uma dada condição ambiental é mais alta que quando esta madeira adquire umidade do meio ambiente (**adsorção**), nas mesmas condições de temperatura e umidade relativa ambientais.

Como exemplo do diferencial de umidade de equilíbrio, se colocarmos duas peças da mesma madeira em uma câmara de climatização com 20<sup>0</sup>C e 55% de umidade relativa, sendo a primeira seca em estufa ( 0%U ) e a segunda com umidade inicial superior ao PSF, a primeira peça adsorverá até atingir uma umidade de equilíbrio de 9%U, enquanto a segunda sofrerá desorção até atingir a umidade de equilíbrio de 12,5%U, resultando em uma diferença de 3,5%U na umidade de equilíbrio das duas peças. Este fenômeno denomina-se **histeresis**.

A variação em teor de umidade de equilíbrio verificada com o fenômeno histeresis é explicada pelo fato que a umidificação da madeira (adsorção), nos espaços vazios dos capilares já secos, é um processo mais moroso e mais difícil (curva do menisco menos côncava) que o com a perda de água desses espaços por evaporação (desorção), quando a parede celular ainda contém umidade (curva do menisco mais côncava), conforme representações gráficas apresentadas na figura 21 a seguir.



Figura 21. Diferentes formações de meniscos nos capilares da madeira durante a adsorção e a desorção - diferentes ângulos de humectação  $\phi$  -

A figura 22, abaixo, mostra a histerese que ocorre na madeira, em decorrência da desorção e adsorção de umidade de uma dada madeira, com variação da pressão relativa de vapor, ou umidade relativa do ar, mas dentro da mesma temperatura de climatização.

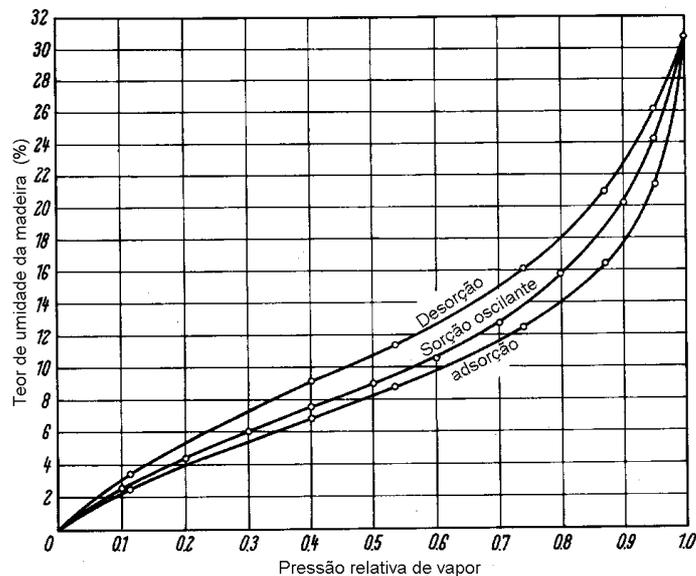


Figura 22. Isotermes de desorção e adsorção de umidade na madeira, a 25°C.

Na figura 23, a seguir, as curvas de umidade de equilíbrio da madeira foram determinadas para o caso da desorção para a madeira de *Picea sitchensis*. Porém, elas normalmente podem ser utilizadas na prática de forma satisfatória, uma vez que há pouca diferença quando comparadas às de outras espécies de madeira.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponíveis para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial não estão autorizadas, exceto se devidamente citada a sua fonte.

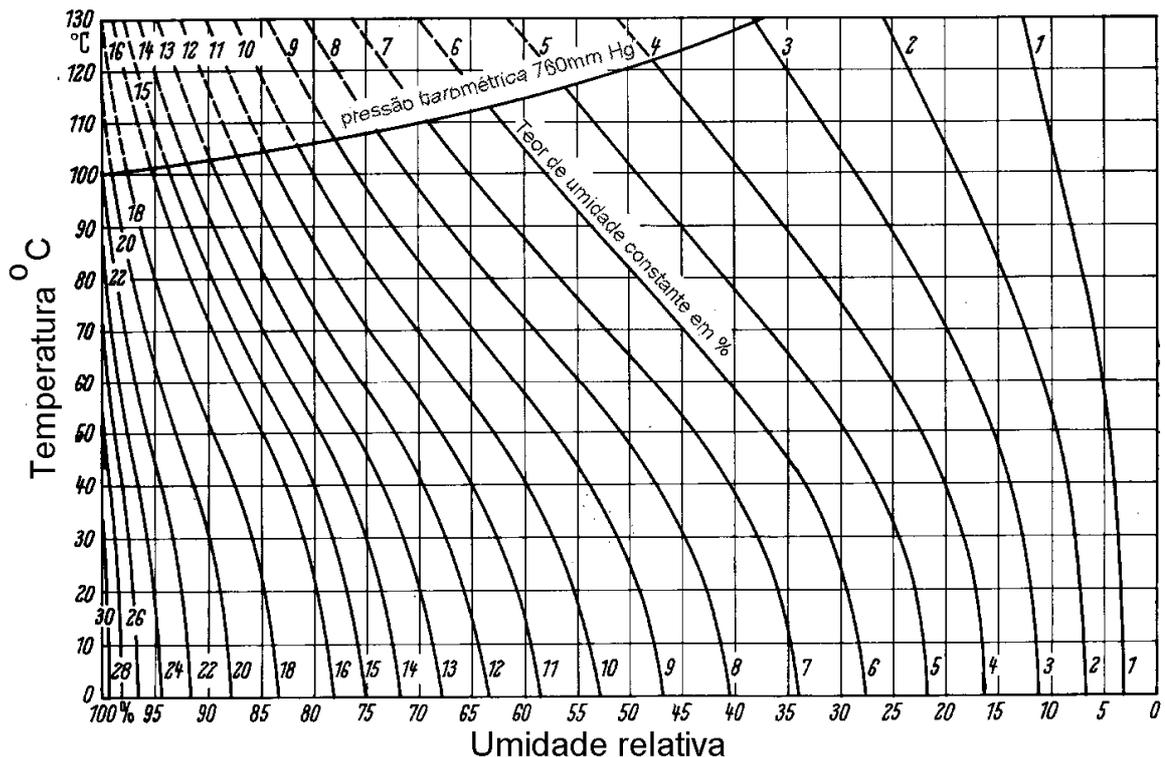


Figura 23. Curvas de umidade de equilíbrio para a madeira de *Picea sitchensis*, em relação à temperatura e à umidade relativa do ar.

Exemplos de utilização:

a. As condições de uma câmara para a secagem de um lote de madeira, foram definidas como 70°C e 45% de umidade relativa. Que umidade de equilíbrio a madeira atingirá nestas condições ?

Resposta: Aproximadamente 6,0% U.

b. Que umidade de equilíbrio a madeira armazenada ao ar livre irá atingir, nas condições climáticas locais da época, de 20°C e 80% de umidade relativa ?

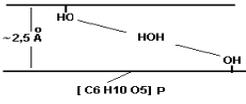
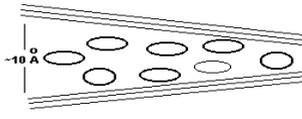
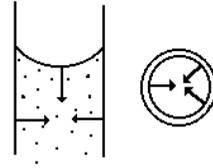
Resposta: A madeira atingirá uma umidade de equilíbrio de 16% U.

c. Qual deverá ser a umidade relativa a ser utilizada para secarmos uma madeira, em câmara de secagem regulada numa temperatura de 70°C, até que a mesma atinja 6% U<sub>equ.</sub> ?

Resposta: A umidade relativa deverá ser de 45%.

A Tabela 4 apresenta, de forma resumida, os diferentes tipos de água existentes na madeira, suas respectivas formas de retenção/ aquisição e locais de armazenamento.

TABELA 4: TIPOS DE ÁGUA EXISTENTES NA MADEIRA E SEUS RELACIONAMENTOS AO PROCESSO DE SORÇÃO

Sorção da madeira: Adsorção = aquisição de água; desorção = perda de água							*Å = 10 <sup>-8</sup> cm
No.	Teor de umidade da madeira	Processo	Tipo de água dentro da madeira	Esquema de aquisição	lugar dentro da madeira	forças responsáveis	conseqüência
1	0% a 6%	Adsorção química (adsorção)	Água química ou água de constituição		entre moléculas de celulose	Forças de valências secundárias	inchamento (inclusão de água / aumento de distância entre moléculas)
2	6% a 28%	Adsorção	Água de impregnação adsorvida		Zonas amorfas das micelas, entre micelas, entre microfibrilas e entre macrofibrilas	Forças elétricas dipolares	Mais inchamento (inclusão de água nas zonas amorfas e entre os elementos da parede celular)
3	28% a 30%	Ponto de saturação das fibras - (PSF)	1 + 2	1 + 2	Parede celular saturada de umidade	1 + 2	Inchamento máximo da madeira ( maior dimensão da peça)
4	30% a U <sub>Max.</sub>	Condensação capilar	1 + 2 + água de capilaridade ou água livre		Água dentro dos lumens das células	Força de adesão e de capilaridade	Não há mais aumento nas dimensões da peça de madeira.
5	$U_{max} = [ 0,28 + (1,50 - ro) / (1,50 \cdot ro) ] \cdot 100 \quad (\%)$ (depende da massa específica da espécie)				Lumem celular totalmente preenchido		Ocorre apenas o preenchimento dos lumens com a água.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

## 4. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO

### 4.1. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO VOLUMÉTRICO

A mudança de volume da madeira verificada entre 0%U e o PSF, devido a desorção e/ou adsorção de água, é considerada uma de suas propriedades físicas mais importantes, afetando e limitando consideravelmente o seu uso industrial em vários ramos de utilização.

O aumento de volume (inchamento) deve-se principalmente à inclusão de moléculas de água nos espaços submicroscópicos, entre as micelas (feixes formados por moléculas de celulose) e nas suas regiões amorfas, afastando-as e, conseqüentemente, alterando as dimensões da madeira.

Da mesma forma, a diminuição do volume (contração) deve-se à retirada das moléculas de água dos espaços submicroscópicos mencionados, representadas na figura 24 em cor mais clara, ocasionando a aproximação das micelas e das moléculas que as constituem, e a conseqüente retração da madeira.

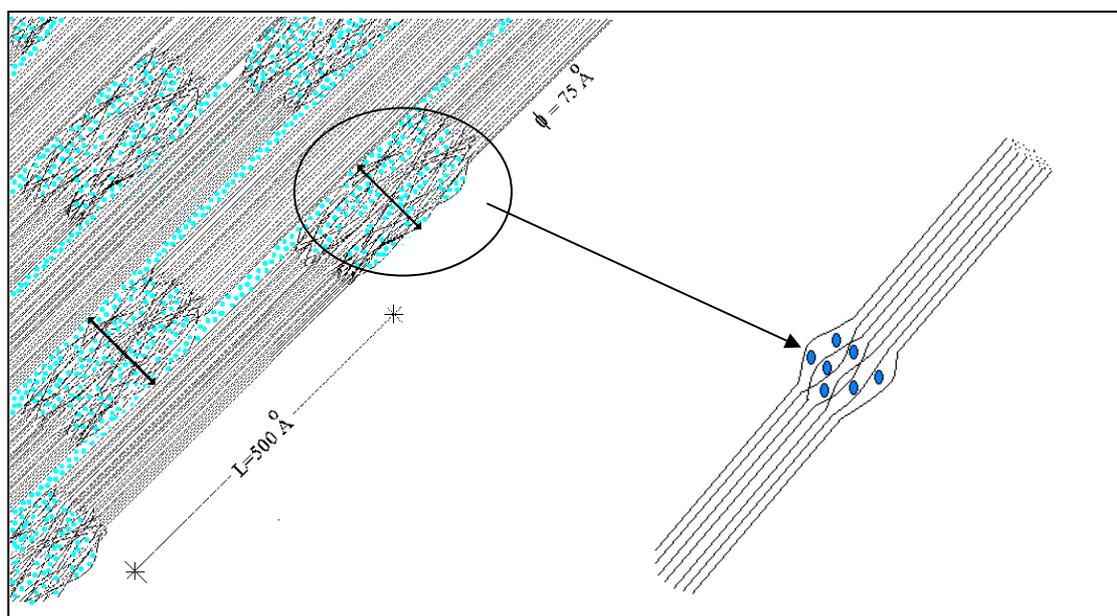


Figura 24: Moléculas de água (em cor mais clara) entre as regiões cristalinas e dentro das regiões amorfas das micelas.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Disto resulta que o aumento em volume é aproximadamente proporcional ao aumento do teor de umidade (entre 0 e 28%), e também proporcional à massa específica ( $\rho_0$ ) da madeira; por conseqüência, o fator de inchamento volumétrico pode ser calculado pela fórmula 13, apresentada a seguir.

$$\alpha_{vU} = U \cdot \rho_0 \quad (\%) \quad (13)$$

sendo:

$\alpha_{vU}$  (%) = fator de inchamento volumétrico de 0% a U% de umidade, baseado no volume da madeira a 0% U.

U = teor de umidade em massa, por massa de substância seca a 0% U.

$\rho_0$  = massa específica, em base à massa seca a 0% U.

O gráfico abaixo (fig. 25) mostra as relações entre o fator de inchamento volumétrico e o teor de umidade, para vários tipos de madeiras e com diferentes massas específicas.

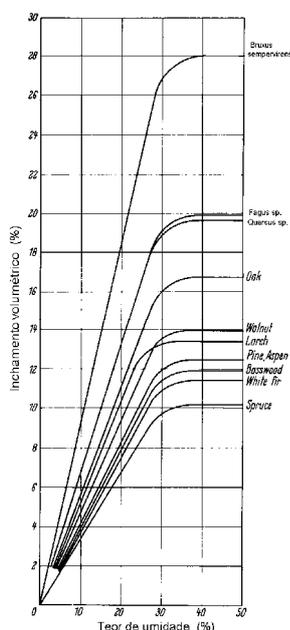


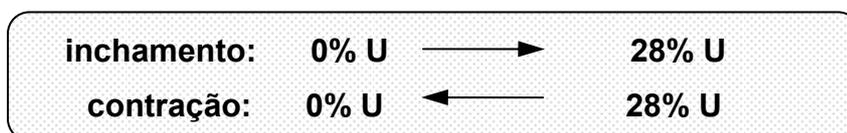
Figura 25: Relação entre o coeficiente de inchamento volumétrico ( $\alpha_v$ ) e o teor de umidade da madeira, para diferentes espécies florestais.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Note-se na figura acima que o inchamento e a contração da madeira se dá apenas dentro do seu intervalo higroscópico, ou seja, entre 0%U e o PSF.

Em geral, quanto mais alta a massa específica da madeira, maior é o  $\alpha_v$ . No entanto, o conteúdo de resina e de outros materiais de impregnação pode mascarar a verdadeira massa específica da madeira e causar exceções.

Como a alteração no volume da madeira (por contração ou inchamento) depende unicamente da água contida no interior dos espaços submicroscópicos da parede celular, ela só irá ocorrer a teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), ou seja, entre 0% e 28% U. Acima do PSF não ocorrem mudanças significativas em volume.



#### 4.1.1. Coeficiente de Inchamento Volumétrico Máximo

O coeficiente de inchamento volumétrico máximo de uma madeira é dado pela diferença entre os volumes da madeira no estado saturado de umidade ( $\geq$ PSF) e no estado absolutamente seco (0%U), relacionada ao volume a 0% U, como apresentado pela fórmula a seguir:

$$\alpha_{v_{\max}} = [ ( V_u - V_o ) / V_o ] \cdot 100 \quad (\%) \quad (14)$$

onde:

$\alpha_{v_{\max}}$  = coeficiente de inchamento volumétrico máximo

$V_u$  = Volume do corpo-de-prova no estado saturado de umidade

$V_o$  = Volume do corpo-de-prova no estado seco (0%).

Respectivamente, segundo a fórmula (13) temos:

$$\alpha_{V_{\max}} = U_{\text{PSF}} \cdot r_o \quad (\%) \quad (13a)$$

Com base em numerosas medições de diferentes madeiras, 28% foi adotado como teor de umidade médio, correspondente ao PSF. Assim, aplicando-o na fórmula 13a temos:

$$\alpha_{V_{\max}} = 28 \cdot r_o \quad (\%) \quad (13b)$$

Exemplo: Qual será o inchamento volumétrico máximo da madeira de *Araucaria angustifolia* ( $r_o = 0,55$ ) ?

Resposta:  $\alpha_{V_{\max}} = 28 \times 0,55 = 15,40\%$

Obviamente trata-se de um valor aproximado, pois se determinássemos este coeficiente usando o PSF específico para esta espécie, ou então pelo uso de seus volumes nos estados seco e saturado, ele seria um pouco diferente.

#### 4.1.2. Coeficiente de Contração Volumétrica Máxima

Analogamente, o coeficiente da contração volumétrica máxima de uma madeira é dada pela diferença entre os volumes no estado saturado de umidade e no estado absolutamente seco, em relação ao volume da madeira no estado saturado de umidade.

$$\beta_{V_{\max}} = [ ( V_u - V_o ) / V_u ] \cdot 100 \quad (\%) \quad (15)$$

Exemplos:

Uma peça de madeira tem um volume  $V_u = 100 \text{ cm}^3$  no estado verde, e um volume absolutamente seco  $V_o = 90 \text{ cm}^3$ . Qual é o coeficiente de contração volumétrica máxima ( $\beta_{V_{\max}}$ ) ?

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Resposta:

$$\beta_{V_{\max}} = [ (100 - 90) / 100 ] \cdot 100$$

$$\beta_{V_{\max}} = [ 10 / 100 ] \cdot 100 = 10\%$$

É importante observar que as fórmulas para a determinação dos coeficientes de inchamento e de contração volumétrica máxima não são iguais: Para o inchamento, a diferença entre o volume úmido e o volume seco é relacionada ao volume seco, enquanto que para a contração esta diferença é relacionada ao volume úmido.

Devido ao fato que os valores para a contração e para o inchamento são obtidos pelo relacionamento ao volume da madeira em diferentes estados (seco e saturado de umidade), eles nunca poderão ser iguais. Contudo, é possível a determinação do  $\beta_{V_{\max}}$  em base ao  $\alpha_{V_{\max}}$ , e vice-versa.

As seguintes são as relações entre o coeficiente de inchamento volumétrico máximo e o coeficiente de contração volumétrica máxima:

$$\beta_{V_{\max}} = [ \alpha_{V_{\max}} / (1 + \alpha_{V_{\max}}) ] \cdot 100 \quad (\%) \quad \textcircled{16}$$

$$\alpha_{V_{\max}} = [ \beta_{V_{\max}} / (1 - \beta_{V_{\max}}) ] \cdot 100 \quad (\%) \quad \textcircled{16a}$$

Para a aplicação das fórmulas acima, os coeficientes de contração e de inchamento são utilizados em porcentagem dividida por 100.

Exemplo:

- 1) O coeficiente de inchamento volumétrico máximo de uma madeira é 15%. Qual é o seu coeficiente de contração volumétrica máxima ?

$$\beta_{V_{\max}} = 0,15 / (1 + 0,15) \cdot 100$$

$$\beta_{V_{\max}} = 0,15 / 1,15 \cdot 100$$

$$\beta_{V_{\max}} = 13\%$$

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

2) Um cubo de madeira de Ipê, com dimensões de 10cmX10cmX10 cm, será secado de um teor de umidade acima do PSF até 0% de umidade. Qual será o seu volume após a secagem, se o seu coeficiente de contração volumétrica máxima é de 11% ?

$$\beta V_{\max} = [(V_u - V_o) / V_u] \cdot 100 \quad (\%) \quad (15)$$

$$V_u = 10 \times 10 \times 10 \text{ cm} = 1.000 \text{ cm}^3$$

$$V_o = ?$$

Resposta:  $V_o = V_u (1 - \beta_{V_{\max}})$

$$V_o = 1.000 (1 - 0,11)$$

$$V_o = 1.000 \times 0,89 = 890 \text{ cm}^3$$

Observação: Como a contração relaciona-se à dimensão úmida,  $1.000 \text{ cm}^3 = 100\%$ , por regra de três, também podemos calcular como:

$$1.000 \text{ cm}^3 \rightarrow 100 \%$$

$$x \text{ cm}^3 \rightarrow 11 \%$$

$$\therefore x = 1.000 \cdot 11 / 100 = 110 \text{ cm}^3 \text{ (de contração volumétrica)}$$

$$\text{Volume a } 0\% \text{ U} = 1.000 - 110 = 890 \text{ cm}^3 \text{ (volume a } 0\% \text{ U)}$$

Tratando-se de um cubo de madeira, cujos lados estejam bem orientados segundo seus eixos anatômicos principais, os coeficientes de contração ou o de inchamento volumétrico podem ser calculados pela soma dos coeficientes das retrações ou dos inchamentos lineares, dados em percentuais, nos sentidos tangencial, radial e longitudinal, ou seja:

$$\alpha_V = \alpha_{\text{tang.}} + \alpha_{\text{rad.}} + \alpha_{\text{long.}} \quad (17)$$

$$\beta_V = \beta_{\text{tang.}} + \beta_{\text{rad.}} + \beta_{\text{long.}} \quad (18)$$

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

As determinações de contração e inchamento lineares são apresentadas no item 4.2. a seguir.

A figura 26, a seguir, apresenta a contração volumétrica relacionada ao teor de umidade da madeira, para espécies de diferentes massas específicas.

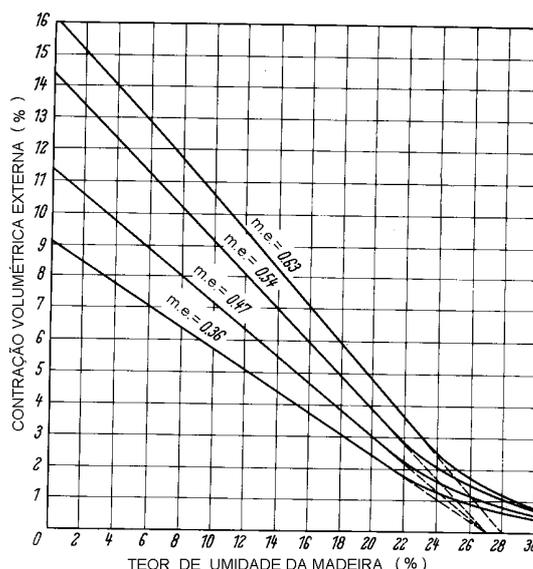


Figura 26. Relação entre a contração volumétrica e o teor de umidade da madeira, em função da sua massa específica (m.e.).

#### 4.2. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO LINEARES

Inchamento linear é a alteração da dimensão “l” em um sentido definido, durante o acréscimo do teor de umidade da madeira de U1 para U2, entre 0%U e o PSF, relacionada à dimensão no estado seco.

A fórmula geral, abaixo, expressa o coeficiente de inchamento linear da madeira como:

$$\alpha l = [ ( lu2 - lu1 ) / lo ] \cdot 100 \quad (\%) \quad (19)$$

Considerando que as dimensões da madeira só se alteram abaixo do PSF (28%U) e até 0%U, o **coeficiente de inchamento linear máximo** é, conseqüentemente:

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

$$\alpha l_{\max.} = [ ( l_{(28\%)} - l_0 ) / l_0 ] \cdot 100 \quad (\%) \quad (20)$$

Inversamente, a fórmula geral do coeficiente de contração é dada como

$$\beta l = [ ( l_{u2} - l_{u1} ) / l_{(28\%)} ] \cdot 100 \quad (\%) \quad (21)$$

e, o coeficiente de contração linear máximo é dado pela maior alteração da dimensão “l” durante a diminuição do teor de umidade de U2 para U1, relacionada à dimensão verde (PSF), ou seja:

$$\beta l_{\max.} = [ ( l_{(28\%)} - l_0 ) / l_{(28\%)} ] \cdot 100 \quad (\%) \quad (22)$$

Observação:  $l_{(28\%)}$  refere-se à situação em que a madeira está na sua dimensão máxima devido a influencia do teor de umidade, que em nível prático se aplica também a qualquer teor de umidade superior ao do PSF.

#### Exemplo:

- 1) Uma tábua de *Araucaria angustifolia* de 10 cm de dimensão tangencial e seca em estufa a 0%U, será molhada até atingir o PSF ou mais. Qual será a sua nova dimensão tangencial ao atingir este ponto, se o seu coeficiente de contração tangencial máximo é de 8% ?

Resposta:

Usando a formula (16a)  $\alpha_{t \max.} = [ \beta_{t \max.} / ( 1 - \beta_{t \max.} ) ] \cdot 100$ , teremos:

$$\alpha_{t \max.} = [ 0,08 / ( 1 - 0,08 ) ] 100 = 0,087 \cdot 100 = 8,7\%$$

**Nota:** 8,7 % = 8,7% da dimensão. Portanto  $8,7 \times 10 / 100 = 0,87$  cm de inchamento. Assim, a nova dimensão será:  $10 + 0,87 = 10,87$  cm.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

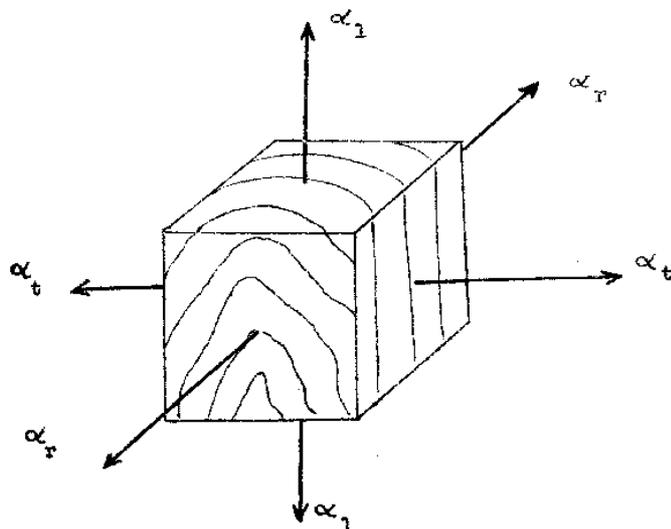


Figura 27: Diferentes sentidos anatômicos da madeira .

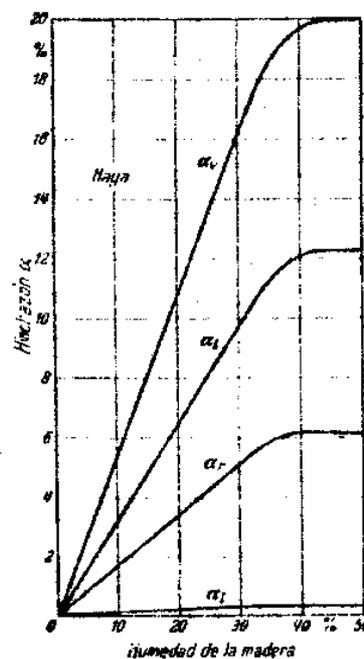


Figura 28: Relação entre o teor de umidade, o inchamento volumétrico da madeira e em seus diferentes sentidos

Como demonstrado na Figura 28, a maior alteração dimensional da madeira manifesta-se no seu sentido tangencial, depois no sentido radial e, finalmente, no sentido longitudinal. Este último sentido, por ter alteração dimensional muito baixa, normalmente é negligenciado para fins práticos.

Em termos médios, a relação de grandeza entre as contrações tangencial, radial e longitudinal da madeira é dada como:

$\beta_t$	:	$\beta_r$	:	$\beta_l$
1,6 - 2,0	:	1,0	:	0,1

A tabela 5, a seguir, apresenta valores de contração linear e volumétrica para algumas espécies de madeira, de forma ordenada pelas suas massas específicas.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

TABELA 5. VALORES DE CONTRAÇÃO LINEAR E VOLUMÉTRICA DE ALGUMAS ESPÉCIES, ORDENADAS SEGUNDO A MASSA ESPECÍFICA A 15% DE TEOR DE UMIDADE.

ESPÉCIE	$\beta_l$	$\beta_r$	$\beta_t$	$\beta_v$	m.e.	$\beta_t / \beta_r$
<i>Ochroma lagopus</i> (Balsa)	0,6	3,0	3,5	7,1	0,16	1,17
<i>Populus sp.</i>	0,7	3,0	7,1	11,8	0,39	2,37
<i>Cedrela sp.</i> (Cedro)	*	4,0	6,0	12,0	0,52	1,50
<i>Araucaria angustifolia</i>	*	4,0	8,0	13,0	0,54	2,0
<i>Pinus echinata</i>	0,4	4,4	7,7	12,5	0,58	1,75
<i>Ocotea porosa</i> (Imbuia)	*	2,7	6,3	9,8	0,67	2,33
<i>Tectona grandis</i> (Teca)	0,6	3,0	5,8	9,4	0,67	1,93
<i>Paratecoma peroba</i> (Ipê,Peroba)	*	4,0	7,0	11,0	0,70	1,75
<i>Aspidosperma sp.</i> (Peroba rosa)	*	4,0	7,5	13,0	0,80	1,87
<i>Bowdichia virgilioides</i> (sucupira)	*	5,3	8,4	15,5	0,90	1,58
<i>Guaiacum officinale</i> (guaiaco)	0,1	5,6	9,3	15,0	1,23	1,66

\* Valores negligenciados por serem extremamente pequenos

### 4.3. CONTRAÇÃO E INCHAMENTO LINEARES EM ÂNGULO

Ao se desdobrar uma tora, a maioria das peças de madeira obtidas não têm orientação anatômica adequada. Desta forma, elas contrairão / incharão de modo diferente ao das peças bem orientadas. Neste caso, a contração e o inchamento poderão ser determinados como:

$$\beta_{\varphi} = \beta_r \cdot \cos^2 \varphi + \beta_t \cdot \sin^2 \varphi \quad (23)$$

O gráfico a seguir (figura 29) ilustra a curva descrita pela equação 23, relacionando o coeficiente de contração linear ( $\beta_{\varphi}$ ) e o ângulo existente entre a direção medida na madeira ( $\varphi$ ) e a direção radial.

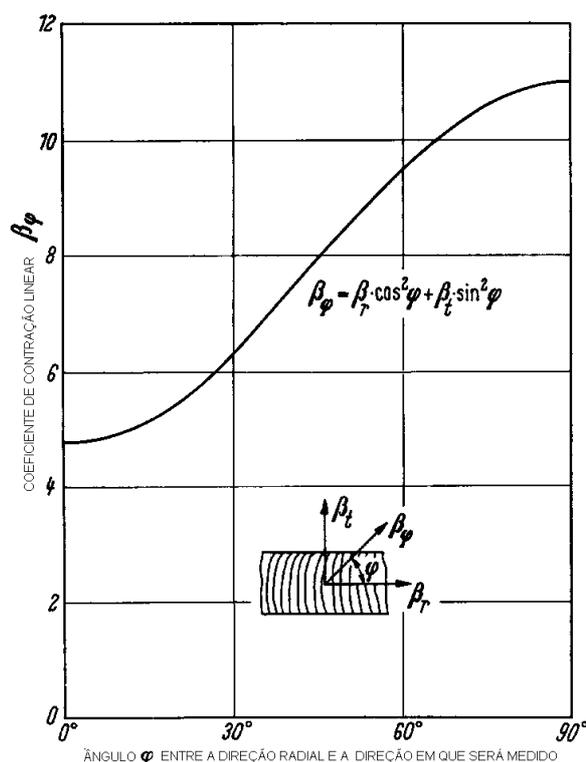


Figura 29. Contração linear em ângulo ( $\varphi$ ) da madeira, de uma peça de madeira anatômicamente bem orientada.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

#### 4.4. COEFICIENTE DE RETRATIBILIDADE (Q)

Infelizmente, os índices lineares máximos de contração ou de inchamento que podemos encontrar na literatura são de pouca utilidade na vida prática, porque nesta situação jamais se procede a secagem da madeira até 0% de teor de umidade. Normalmente ela é efetuada até 6-10% em estufa e até 11-15% ao ar. Portanto, é de grande interesse a determinação da porcentagem de contração ou de inchamento linear, para cada unidade porcentual de alteração no teor de umidade.

A determinação do coeficiente de contração / inchamento a cada 1% de teor de umidade na madeira é feita com a utilização do “coeficiente de retratibilidade” (Q), que permite o cálculo da contração ou de inchamento em qualquer situação entre 0%U e o PSF, determinado pela fórmula apresentada a seguir.

$$Q = \Delta\alpha / \Delta u \quad (\% / \%)$$

onde:

Q = Coeficiente de retratibilidade;

$\Delta\alpha$  = Diferença de inchamento;

$\Delta u$  = Diferença de teor de umidade.

Da relação  $(L_u - L_o / L_o) / (P_u - P_o / P_o)$ , determina-se Q como:

$$Q = (I_{12} - I_0) \cdot P_0 / (P_{12} - P_0) \cdot I_0 \quad (\% / \%)$$

24

onde:

$I_0$  e  $I_{12}$  = Dimensões do corpo-de-prova, a 0% e 12% de teor de umidade, usados para fins de determinação do coeficiente Q;

$P_0$  e  $P_{12}$  = Massas do corpo-de-prova a 0% e 12% de U, respectivamente.

**Obs.:** Por definição, o coeficiente de retratibilidade sempre é relacionado à, e somente à dimensão da madeira no estado seco, a 0%U.

A Tabela 6 a seguir apresenta valores de coeficientes de retratibilidade para algumas espécies de madeira.

TABELA 6. EXEMPLOS DE COEFICIENTES DE RETRATIBILIDADE PARA DIFERENTES ESPÉCIES DE MADEIRA

ESPÉCIE	$Q_{tang}$ (%/%)	$Q_{rad}$ (%/%)
<i>Lophira sp.</i> ( Bongossi )	0,40	0,31
<i>Fagus sp.</i>	0,44	0,19
<i>Pinus sp.</i>	0,26	0,15
<i>Tectona grandis</i> ( Teca )	0,24	0,13
<i>Ocotea porosa</i> ( Imbuia )	0,27	0,12

#### 4.4.1. Utilização do Coeficiente de Retrabilidade da Madeira

##### Exemplos:

1) Uma peça de Bongossi de 10 cm no sentido tangencial será secada de 14%U para 6%U. De que grandeza será a alteração de sua dimensão neste sentido, sendo  $Q_{tang} = 0,40$  %/ % ?

Obs.: (  $Q_{tang}$  de 0,40 é fornecido na Tabela 6 )

A estratégia do cálculo pode ser esquematizada como:  $L_{14\%U} \rightarrow L_{0\%U} \rightarrow L_{6\%U}$ .

Primeiramente calcula-se a largura que a peça teria a 0%U, ou seja:

##### Determinação da dimensão a 0%U ( X ):

$\Delta u$  : ≠ de 14%U a 0%U = 14%U

Contração até 0%U:  $14 \times 0,40 = 5,6\%$

$$L_u = L_o + L_o \times 0,056$$

$$L_{14\%} = L_{0\%} (1 + 0,056)$$

$$L_{0\%} = L_{14\%} / 1,056$$

$$L_{0\%} = 10 / 1,056 = 9,47 \text{ cm (dimensão da peça seca a 0\%U).}$$

De posse deste valor calcula-se a dimensão da peça a 6%U, como:

$$\Delta u : \neq \text{ de } 0 \% \text{ a } 6\%U = 6\% U$$

$$\text{inchamento até } 6\%U = 6 \times 0,40 = 2,4\%$$

$$L_u = L_o (1 + 0,024)$$

$$L_{6\%} = 9,47 \text{ cm } (1 + 0,024)$$

$$L_{6\%} = 9,47 \text{ cm } \times 1,024 = 9,698 \text{ cm (dimensão da peça seca a 6\%U)}$$

2) Uma tábua de Teca com dimensão tangencial de 25 cm e com 15% U apresenta, após a secagem, uma largura de 24,5 cm. Qual é o seu teor de umidade após este tratamento, sendo  $Q_{\text{tang}} = 0,24 \%/\%$  ?

$$\Delta u : \neq 15 \% \rightarrow 0\% = 15\%U$$

$$15 \times 0,24 = 3,6\%$$

$$L_u = L_o + L_o \times 0,036$$

$$L_u = L_o (1 + 0,036)$$

$$L_o = L_u / 1,036 = 25 \text{ cm } / 1,036$$

$$L_o = 24,13 \text{ cm (na dimensão a 0\%U)}$$

Então, em decorrência de uma secagem completa ocorreria uma contração adicional na ordem de:

$$24,5 \text{ cm} - 24,13 \text{ cm} = 0,37 \text{ cm}, \text{ valor que corresponde a } 1,533\% \text{ de } 24,13 \text{ cm.}$$

Assim, com um inchamento de 0,24 % para cada 1% de alteração no teor de umidade (valor de Q), há uma correspondência na alteração de dimensão de 1,533 / 0,24, o que resulta em 6,4%U após a secagem.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

3) Um armário será utilizado em um lugar com clima definido em 20°C e aproximadamente 55% de umidade relativa. De acordo com as curvas de umidade de equilíbrio apresentadas na figura 21, estas condições irão permitir que a madeira se equilibre a um teor de umidade de aproximadamente 10%.

Se fossemos produzir um móvel fino com uma peça de imbuia (*Ocotea porosa*) na Cidade de Curitiba (Umidade relativa de 80% e temperatura de 20°C), para termos nas condições de uso acima a dimensão exata de 20 cm de largura no sentido tangencial, qual deveria ser a dimensão no momento de seu dimensionamento?

Novamente, recorrendo às curvas da figura 21, temos a umidade de equilíbrio nas condições industriais de 16%, e sendo o coef.  $Q_{tang}$  para a imbuia de 0,27, a largura da peça deveria ter:

$$L_{0\%U} = 20 \text{ cm} : (1 + 0,0027 \times 10)$$

$$20 \text{ cm} / 1,027 = 19,47 \text{ cm na dimensão seca a } 0\%U; \text{ e}$$

$$L_{10\%U} = 19,47 \text{ cm} \times (1 + 0,0027 \times 16) = 19,47 \times 1,0432 = \mathbf{20,31 \text{ cm}}$$

#### 4.4.2. Determinação dos Coeficientes de Contração, Inchamento e de Retratibilidade

Para se determinar os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $Q$  nos diferentes sentidos anatômicos da madeira (tangencial, radial e longitudinal), normalmente usam-se métodos simples de medição, com o uso de paquímetros e micrômetros.

Segundo a COPANT 30:1-005, os corpos-de-prova devem ser bem orientados segundo os eixos anatômicos da madeira, e possuírem as dimensões de 2,5cm x 2,5cm x 10 cm, conforme figura 30, apresentada a seguir:

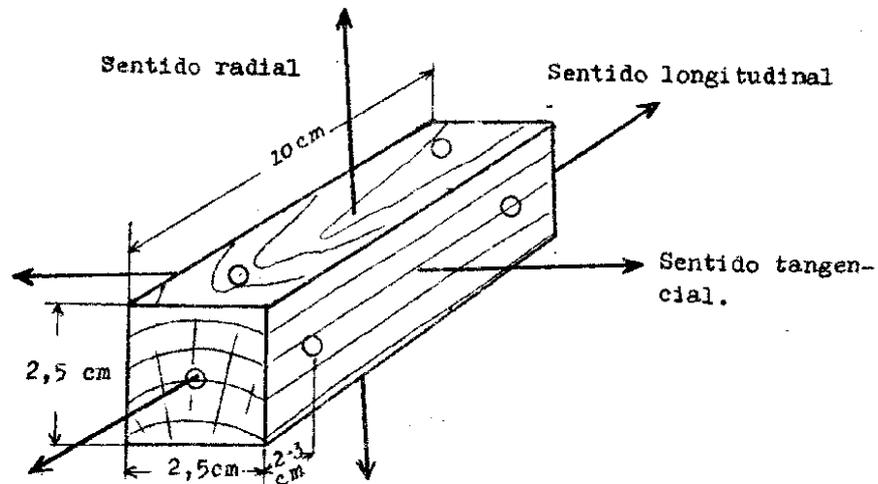


Figura 30. Corpo-de-prova segundo a COPANT 30:1-005, para a determinação dos coeficientes de contração, inchamento e de retratibilidade.

Usando o formulário 2, apresentado a seguir, as medições podem ser efetuadas segundo o seguinte roteiro:

- Determinação das dimensões no estado úmido ( $U\% > PSF$ );
- secagem em clima normatizado a  $20^{\circ}\text{C}$  e 65% de umidade relativa do ar, até atingir a umidade de equilíbrio (12% U);
- determinação das dimensões e da massa em 12%U (utilizada para o cálculo de Q);
- secagem em estufa a  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , até a madeira atingir 0%U;
- medição das dimensões e determinação da massa em 0%U;
- cálculo de  $\beta$ ,  $\alpha$  e Q nos diferentes sentidos anatômicos da madeira.



#### 4.5. ANISOTROPIA DIMENSIONAL

Como mostra a figura 31 a seguir, a madeira incha e contrai desigualmente segundo os sentidos anatômicos tangencial, radial e longitudinal. Denomina-se a este fenômeno, "anisotropia dimensional", o qual pode ser discriminado como:

- a) Anisotropia dimensional de contração ( $A_c$ ); ou
- b) anisotropia dimensional de inchamento ( $A_i$ ).

A ordem de grandeza da anisotropia dimensional da madeira é, invariavelmente dada como:

$$\alpha_t > \alpha_r \gg \alpha_l \quad \text{ou} \quad \beta_t > \beta_r \gg \beta_l$$

Devido ao fenômeno da anisotropia, ocorre o desenvolvimento de defeitos na madeira durante a fase de secagem ou de recondicionamento, tais como rachaduras, torções, empenamentos e abaulamentos.

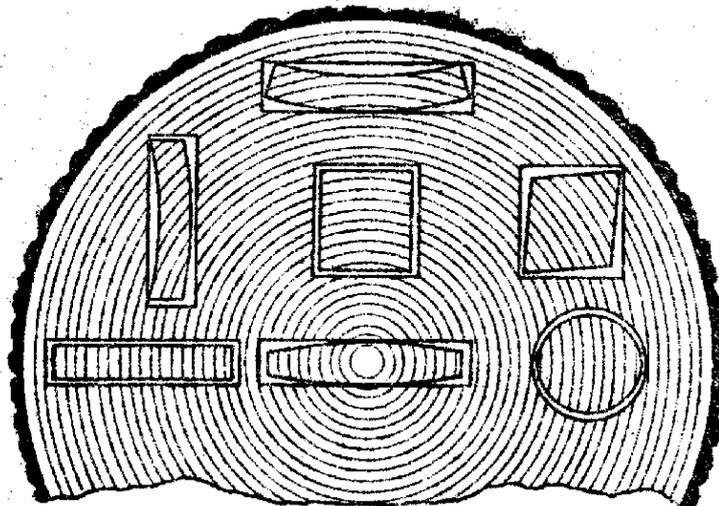


Figura 31: Visualização dos tipos de defeitos desenvolvidos durante a secagem da madeira, devidos ao fenômeno da anisotropia.

O fator de anisotropia dimensional ( A ), de contração ( A<sub>c</sub> ) ou de inchamento ( A<sub>i</sub> ), é expresso pela relação entre os movimentos lineares radial e tangencial, como:

$$A_c = \beta_t / \beta_r \quad (25) \quad \text{e} \quad A_i = \alpha_t / \alpha_r \quad (26)$$

O fator ideal de anisotropia de um material é igual a 1, o que indicaria inexistência de alteração nas suas dimensões, ou que as alterações nos seus diferentes seriam iguais. No entanto isto não pode ser observado para a madeira.

Para a madeira, quanto maior o desvio entre as variações dimensionais nos sentidos anatômicos tangencial e radial, maior será o fator de anisotropia e, conseqüentemente, pior será o seu comportamento durante a secagem ou durante a aquisição de umidade.

Em função do exposto acima, a tabela 7 a seguir apresenta valores empregados para a classificação de espécies de madeira, segundo o fator de anisotropia.

TABELA 7. FATORES DE ANISOTROPIA E RESPECTIVAS CLASSES DE QUALIDADE DA MADEIRA

FATOR A	QUALIDADE DA MADEIRA
1,2 a 1,5	- Madeiras consideradas excelentes - procuradas para usos que não permitem empenamentos, torções, etc. (janelas, móveis, instrumentos musicais, ... ).
1,6 a 1,9	- Madeiras consideradas normais.
≥ 2,0	- Madeiras de baixa qualidade - inapropriada para várias utilizações, mas algumas ainda de grande interesse comercial por reunirem outras propriedades desejadas.

Além do fator de anisotropia da madeira, também são de importância os valores absolutos das contrações lineares e volumétricas.

Exemplos: (Vide dados na tabela 5)

1) Quais seriam as madeiras consideradas ideais para a construção de móveis finos, entre as da tabela 5, que apresenta contrações lineares e volumétricas de algumas espécies ?

Resposta: *Cedrela sp.* e *Bowichia virgulinoides*.

2) Quais madeiras apresentarão, com grande probabilidade, defeitos durante a secagem como rachaduras, torções, etc. ?

Resposta: *Populus sp.*, *Ocotea porosa* e *Araucaria angustifolia*.

A grande diferença nas grandezas de contração e inchamento da madeira, nos seus três sentidos anatômicos, deve-se às estruturas microscópica e submicroscópica do próprio material. A razão da ínfima alteração da dimensão no sentido longitudinal em relação aos demais, explica-se pelo fato da maioria dos elementos que constituem a madeira estarem organizados verticalmente, fazendo com que o número de paredes celulares por unidade de distância seja bem menor neste sentido (figura 32).

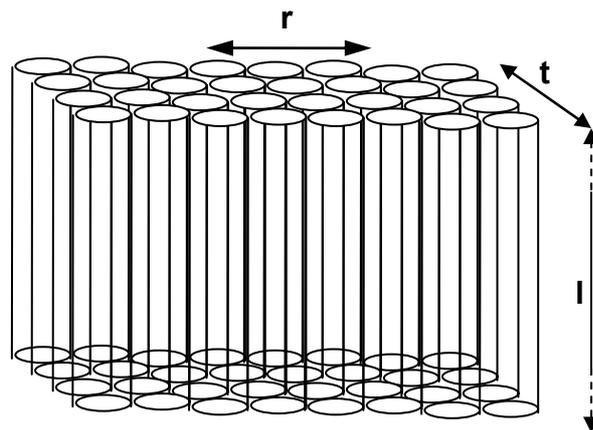


Figura 32 : Representação esquemática do maior número de paredes celulares por unidade de distância, entre os diferentes sentidos anatômicos da madeira.

Considerando que a contração e o inchamento são causados devido a desorção ou à adsorção de água pelas paredes celulares, o menor número de paredes celulares no sentido longitudinal por unidade de distância torna este fenômeno praticamente negligenciável na direção da grã da madeira.

Tenta-se explicar que as diferenças das anisotropias de contração e de inchamento entre os sentidos anatômicos radial e tangencial, são conseqüência dos seguintes fatos:

a) Estrutura microscópica da madeira

a.a) Restrição da contração e do inchamento no sentido radial, pelos raios da madeira, o único tecido orientado horizontalmente no fuste da árvore;

a.b) Presença de pontuações predominantemente na face tangencial das células da madeira, causadoras de desvio acentuado das microfibrilas que circundam as pontuações: O desvio das microfibrilas impede a contração linear no sentido radial de forma significativa;

b) Estrutura submicroscópica

Maior espessura da lamela média e da parede primária na face radial da célula: A lamela média, que contém elevado teor de pectina (substância altamente higroscópica), aumenta a contração ou o inchamento no sentido tangencial;

c) Estrutura macroscópica

Em madeiras com porosidade em anel acentuada, a contração ou o inchamento no sentido tangencial é maior, pois o movimento da madeira é mais facilmente transferido para o exterior pelo lenho tardio mais denso e mais rígido, enquanto o movimento radial é parcialmente absorvido pelo lenho inicial mais poroso e mais mole.

Em decorrência da variação em contração e inchamento nos três eixos anatômicos da madeira, antes do seu beneficiamento, é imprescindível que o seu teor de umidade esteja igual ou próximo àquele que ela irá entrar em equilíbrio, em função das variáveis do meio ambiente em que a madeira será utilizada: isto faz com que a madeira ou material confeccionado de madeira não seja afetado de forma significativa por futura contração ou inchamento e, conseqüentemente, não sejam danificados por empenamentos, torções, ou outros defeitos desenvolvidos até atingirem o novo teor de umidade de equilíbrio com o ambiente em que ele será utilizado.

Como é normalmente impraticável adaptar as condições ambientais exigidas para a utilização correta da madeira maciça, a indústria de produtos de madeira desenvolveu tecnologia e processos, com a principal finalidade de contornar os problemas gerados pela contração e inchamento da madeira, a saber: a) Aglomerados; b) compensados (contraplacados); c) compensados sarrafeados; e d) chapas de fibras, etc.

Por outro lado, com o uso do coeficiente de retratibilidade da madeira também poderemos prever o quanto esse material irá contrair ou inchar de uma umidade de equilíbrio para outra, com a finalidade de prevermos espaços entre peças componentes de móveis ou outros artigos de madeira, com a finalidade de evitar futuros problemas funcionais do produto industrializado.

## 5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MADEIRA

A madeira possui quatro propriedades térmicas de importância, sendo elas:

- a) **Condutividade térmica:** representa a medida da taxa de fluxo de calor através da madeira submetida a um gradiente de temperatura, expressa em Kcal/m.h.°C;

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

- b) **Calor específico:** representa a quantidade de energia térmica necessária para causar a troca de uma unidade de temperatura em uma unidade de massa do material, expressa em kcal/ kg .°C;
- c) **Transmissão térmica:** representa a medida do quão rápido um material pode absorver temperatura de suas imediações, expressa em  $m^2/h$ ; e
- d) **Coefficiente de expansão térmica:** representa a medida da troca de dimensão causada pela troca de temperatura, expressa em mm/ °C.

#### 5.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MADEIRA

A condutividade térmica é a medida da taxa de fluxo de calor através de materiais submetidos a um gradiente de temperatura.

A condutividade térmica de peças de madeira é normalmente responsável por apenas uma pequena parcela da condutividade térmica de peças de outros materiais que compõe uma edificação, o que a coloca numa posição de destaque para esta finalidade. Esta propriedade assume importância onde se pretende o isolamento de temperatura (calor ou frio) em edificações, e também na industrialização da madeira onde se utilizam os processos de aquecimento, vaporização ou cozimento (secagem artificial, fabricação de lâminas e moldagem, etc.).

O coeficiente de condutividade térmica (ou coeficiente de condutividade calorífica) indica a quantidade de calor conduzido através de um cubo de  $1 m^3$  ( $1m \times 1m \times 1m$ ), quando a este é submetido uma diferença de temperatura de  $1^{\circ}C$  entre seus lados opostos, em sentidos anatômicos definidos, como representado esquematicamente na figura 33, a seguir.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

No sistema métrico decimal, o coeficiente de condutividade térmica é calculado em Kcal/m.h.°C, indicando que quanto maior for o coeficiente, maior será a condução de calor pelo material ou, em outras palavras, quanto menor ele for, melhor será a sua qualidade como isolante térmico.

Em um estudos realizados para relacionar a massa específica a 12% de teor de umidade de algumas espécies de madeiras de coníferas e folhosas, a seguinte fórmula foi apresentada para determinar, com boa aproximação, o coeficiente de condutividade térmica da madeira:

$$\lambda_{12} = 0,168 \cdot r_{12} + 0,022 \quad (\text{Kcal} / \text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (27)$$

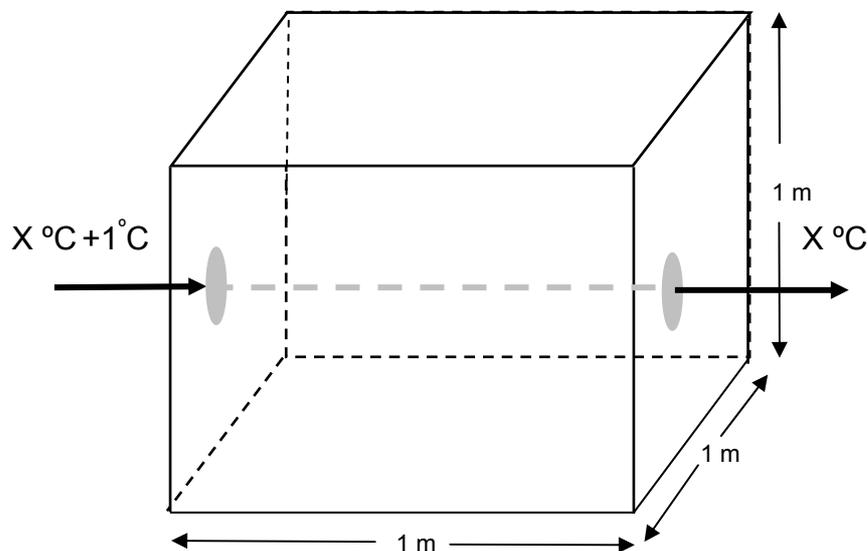


Figura 33. Representação esquemática da forma de determinação do coeficiente de condutividade térmica ( $\lambda$ ) da madeira.

De forma geral, a condução calorífica em um material resulta da transferência de vibrações de átomos e/ou moléculas, de um átomo e/ou de uma molécula para outros, sendo que a capacidade de condução do calor dependerá principalmente da composição química, da macroestrutura e da textura do material.

Devido a estrutura porosa da madeira, o seu coeficiente de condutividade térmica é relativamente baixo ( $\lambda = 0,12$ ), o que a caracteriza como um bom isolante de temperatura. Isto se deve à porção de ar existente no seu interior, este com um coeficiente  $\lambda = 0,0216$ , e ao fato da baixa condutividade térmica do próprio material lenhoso.

A condutividade térmica da madeira no sentido radial é 5 a 10% maior que no sentido tangencial. No entanto, no sentido da grã da madeira esta propriedade é 2,25 a 2,75 vezes maior que nos outros sentidos anatômicos.

Diferentemente de materiais homogêneos, o fluxo de calor pela madeira varia em cada direção anatômica, e também em função de irregularidades estruturais (fendas, nós, etc.) e de outras variáveis, como apresentadas a seguir:

- a) Quanto maior for a massa específica (menor é a proporção de ar por unidade de volume e maior a proporção de material lenhoso), maior será a sua condutividade térmica;
- b) Quanto maior for o teor de umidade, maior será a condutividade térmica (coeficiente de condutividade térmica da água = 0,5);
- c) Quanto maior for o teor de extrativos, maior será a condutividade térmica da madeira;
- e) Quanto maior for o aumento da temperatura, a partir da temperatura em que se determina um coeficiente de condutividade térmica de referência, maior será o fluxo de temperatura através da madeira.

A **variação da condutividade térmica** da madeira causada pela temperatura (t), entre -50 e +100 °C, pode ser calculada pela fórmula apresentada a seguir:

$$\lambda_2 = \lambda_1 [ 1 - ( 1,1 - 0,98 r_0 ) \cdot (t_1 - t_2) ] \cdot 100 \quad (28)$$

onde:

$\lambda_1$  = coef. de condutividade térmica inicial (na temperatura  $t_1$ );

$\lambda_2$  = coeficiente de condutividade térmica após o aumento da temperatura (de  $t_1$  para  $t_2$ ); e

$r_0$  = massa específica da madeira a 0% de teor de umidade;

$t_1$  e  $t_2$  = temperaturas consideradas.

Analogamente, a variação do coeficiente de condutividade da madeira, em função da variação em seu teor de umidade (u), é dada pela fórmula abaixo:

$$\lambda_2 = \lambda_1 [ 1 - 0,0125 ( u_1 - u_2 ) ] \quad (29)$$

A figura 34 apresenta curvas que permitem avaliar a condutividade térmica da madeira pelo seu teor de umidade e massa específica; a Tabela 8 apresenta vários materiais com seus respectivos coeficientes de condutividade térmica.

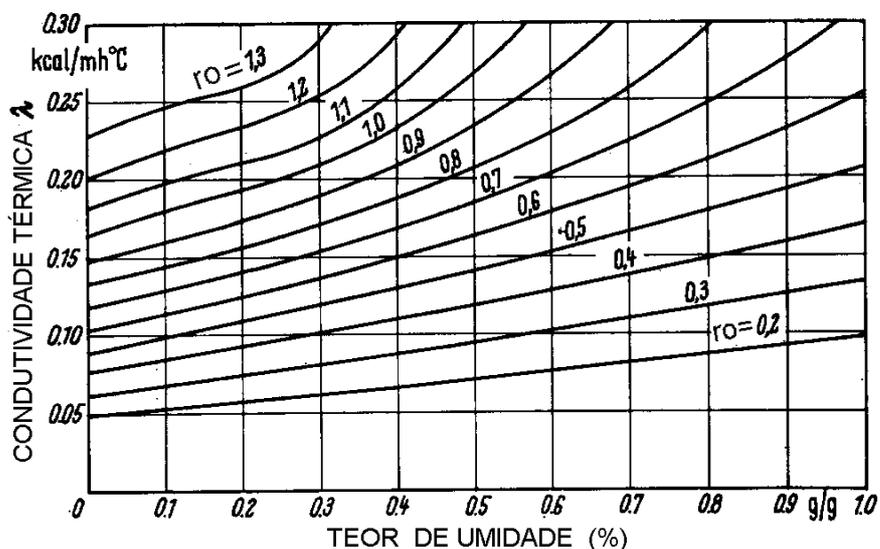


Figura 34. Relacionamento entre a condutividade térmica e o teor de umidade, para madeiras com diferentes massas específicas.

TABELA 8. EXEMPLOS DE ALGUNS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

MATERIAL	Kcal / m.h.°C
Vácuo	0,00
Ar	0,0216
Poliestireno expandido (isopor)	0,035
Lã de vidro (20 kg/m <sup>3</sup> ) seca	0,05
Balsa ( <i>Ochroma lagopus</i> )	0,054
Chapa aglomerada	0,07 - 0,12
Pinheiro do PR. ( <i>Araucaria angustifolia</i> )	0,12
Tijolo	0,4
Água	0,5
Concreto armado	1,75
Cobre	50,0
Alumínio	230,0
Ferro	330,0

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Na prática, o coeficiente de condutividade térmica ( $\lambda$ ) é utilizado para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica (K), e/ou do coeficiente de resistência à transmissão térmica (1/K), com a finalidade de satisfazer as exigências térmicas de uma edificação. Para que isto seja possível, também há necessidade de conhecermos a quantidade de calor transmitida entre diferentes materiais.

A troca de temperatura entre diferentes materiais (líquidos e gases, gases e sólidos, etc.) pode ser determinada pela fórmula:

$$Q = K \cdot A (t_1 - t_2) \quad (\text{Kcal / h}) \quad (30)$$

onde:

Q = Quantidade de calor transmitida, expressa em Kcal / h;

K = Coeficiente de transmissão térmica, expressa em Kcal / m<sup>2</sup>.h . °C;

A = área de transmissão, expressa em m<sup>2</sup>; e

t<sub>1</sub> e t<sub>2</sub> = Temperaturas dos lados quente e frio da parede, respectivamente.

Para atender as necessidades de uma edificação, no que concerne ao isolamento térmico e suas conseqüentes vantagens econômicas e de conforto ambiental ao usuário, o coeficiente de resistência à transmissão térmica de uma parede é determinado como:

$$1/K = 1/Q_i + d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + \dots + d_n/\lambda_n + 1/Q_e \quad (31)$$

onde:

1/K = Coef. de resistência à transmissão térmica, ou de calor/frio;

Q<sub>i</sub> = Coef. de transmissão térmica entre o ar do ambiente interior e a superfície interior da parede considerada;

d = Espessura individual da camada da parede que está sendo considerada;

$\lambda$  = Coeficiente de condutividade térmica do material que constitui a camada considerada;

Q<sub>e</sub> = Coeficiente de transmissão térmica entre o ar do ambiente exterior e a superfície exterior da parede considerada.

As normas técnicas de construção normalmente trazem valores mínimos de  $1/k$ , para atender as exigências térmicas de ambientes construídos. Como exemplos de especificações, pode-se citar os seguintes valores:

$1/k = 0,55$  para lajes entre apartamentos;

$1/K = 0,75$  para teto de porões ou pisos, etc.

**Exemplo:** Para satisfazer a exigência da norma técnica, no sentido de obter um coeficiente de resistência à transmissão térmica de  $1/K = 1,20$ , quando o  $Q_i = 7$  e o  $Q_e = 20$ , será suficiente uma parede construída de:

tijolos, com 0,10 m de espessura (camada externa);

poliestireno expandido, com 0,02 m de espessura (camada central); e

tábua de *Araucaria angustifolia*, com 0,024 m de espessura (forro).

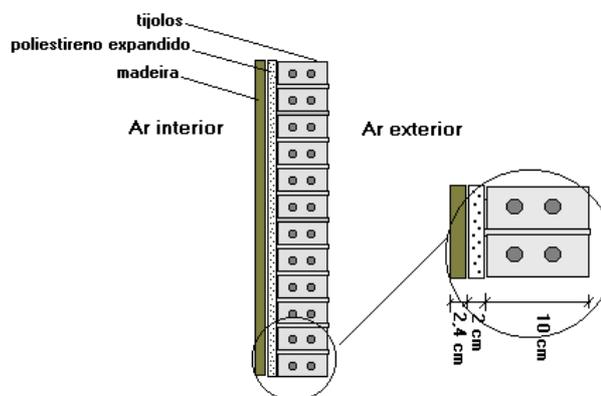


Figura 35. Parede construída para obter um isolamento térmico de  $1/K = 1,20$

$$1/k = 1/7 + 0,024/0,12 + 0,02/0,035 + 0,10/0,4 + 1/20$$

$$1/K = 0,14 + 0,20 + 0,57 + 0,25 + 0,05 = 1,21$$

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

No caso deste exemplo, a diferença de temperatura entre os lados externo e interno é de 20,15°C, ou seja, a cada  $1/k = 0,06$ , corresponde 1°C. Assim, temos a seguinte variação de temperatura no interior da parede: (obs.:  $0,06 \approx 1,21/20,15$ )

TABELA 9. DIFERENÇA DE TEMPERTURA ENTRE OS LADOS INTERNO E EXTERNO DE UMA PAREDE EM FUNÇÃO DO MATERIAL E ESPESSURA DAS CAMADA UTILIZADAS

Camada	1/k	Temp. °C	≠ Temp. acumulada
Qi -->	0,14 =	2,33	→ 2,33 °C
tábua	0,20 =	3,33	→ 5,66 °C
poliestir.	0,57 =	9,50	→ 15,16 °C
tijolos	0,25 =	4,16	→ 19,32 °C
Qe -->	0,05 =	0,83	→ 20,15 °C
Σ =	1,21 =	20,15	-----

## 5.2. CALOR ESPECÍFICO DA MADEIRA

O Calor específico de um material é dado pela relação entre a capacidade de aquecimento deste material e a capacidade de aquecimento da água.

A capacidade de aquecimento de um material representa a quantidade de energia térmica, necessária para causar a troca de uma unidade de temperatura em uma unidade de massa deste material. No sistema métrico decimal, para aquecer a água é necessário 1 kcal / kg .°C.

A tabela 10, a seguir, apresenta exemplos de calor específico para alguns materiais.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

O calor específico da madeira depende da temperatura e do teor de umidade do material. Contudo, esta propriedade independe da densidade ou da espécie florestal.

Segundo a literatura, o calor específico da madeira seca é aproximadamente relacionado com a temperatura, como:

$$\text{Calor específico} = 0,2692 + 0,00108 t \text{ (em } ^\circ\text{C)} \quad \textcircled{32} \quad [\text{kcal/ kg } ^\circ\text{C}]$$

Pelos valores médios apresentados na tabela 10, abaixo, observa-se que a madeira tem um calor específico relativamente alto em relação a outros materiais. Isto significa que, ao se aplicar uma determinada quantidade de calor à madeira, ela se aquecerá muito menos que os materiais possuidores de menor calor específico, como metais, concreto, tijolos, etc.

O calor específico da madeira caracteriza este material como adequado para várias utilizações práticas, como colheres de pau, palitos de fósforo, etc. No entanto, quando a madeira contém água, o seu calor específico é aumentado devido ao fato do calor específico da água ser mais alto.

O aparente calor específico da madeira úmida, por outro lado, é maior que a simples soma de efeitos da madeira e da água separados: Neste caso haverá um calor específico adicional, devido a absorção de energia térmica adicional pela existência das ligações químicas madeira-água.

TABELA 10. ALGUNS VALORES MÉDIOS DE CALOR ESPECÍFICO

MATERIAL	Kcal/ Kg °C
Metais (ferro, aço, alumínio)	0,1
Concreto, tijolos, pedras	0,18 - 0,20
Ar ( 0°C )	0,240
Madeira ( 0% U )	0,324
água	1,0

Pelo exposto acima, e tendo a água um calor específico igual a 1, o calor específico da **madeira úmida** é dado pela fórmula:

$$\text{Calor específico} = U + C_0 + A / 1 + U \quad (\text{Kcal/ Kg } ^\circ\text{C}) \quad \textcircled{33}$$

onde:

U = Teor de umidade da madeira;

C<sub>0</sub> = Calor específico da madeira seca;

A = Calor específico adicional, devido a energia de ligação madeira-água.

Um calor específico adicional **A** para madeira seca a 10%U, varia de 0,002 a 0,04, entre 29,5 °C e 60 °C, respectivamente. Para madeira com 30% U a variação observada é de 0,04 a 0,09 com a mesma variação de temperatura.

### 5.3. TRANSMISSÃO TÉRMICA

Transmissão térmica é a medida do quão rápido um material pode absorver calor de suas imediações. Ela é representada pelo fator dado pela relação entre a condutividade térmica e o produto do calor específico com a massa específica da madeira.

$$a = \lambda / C.r \quad (\text{m}^2/\text{h}) \quad \textcircled{34}$$

onde:

a = fator de transmissão de calor;

λ = Coef. de condutividade térmica;

C = calor específico; e

r = massa específica

Este fator é normalmente utilizado em cálculos para a solução de problemas nas áreas de secagem, de preservação e de laminação de madeiras.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Devido à baixa condutividade, moderadas densidades e o calor específico da madeira, a difusividade deste material é muito menor que a de outros materiais, como por exemplo dos metais, pedras e tijolos.

Um valor normal para a madeira é 0,0016 centímetros quadrados/ segundo, ao passo que para o aço este valor é de 0,129 cm<sup>2</sup>/seg e, para a lã de rocha, de 0,0064 cm<sup>2</sup>/seg. Por esta razão, não se sente ao tato que a madeira seja extremamente fria ou quente, como se observa para outros materiais.

A transmissão térmica é ligeiramente e inversamente influenciada por ambos, densidade e teor de umidade da madeira.

#### 5.4. EXPANSÃO TÉRMICA DA MADEIRA

Grande vantagem desta característica da madeira (baixa expansão térmica) verifica-se no caso de incêndios, tendo-se em vista que peças estruturais de madeira se expandem menos que outros materiais de construção, diminuindo os riscos de desabamento.

A baixa expansão térmica também tem certa importância na fabricação de compensados, chapas aglomeradas, chapas de fibras, etc. Isto se explica pelo fato que durante o aquecimento da madeira, as alterações dimensionais causadas pela variação da temperatura são quase anuladas pelas alterações dimensionais provocadas pela alteração do seu teor de umidade.

**Coefficiente de expansão térmica**, ou mais simplesmente **coeficiente de dilatação**, é a medida da troca de dimensão causada pela troca de temperatura. Para a madeira este coeficiente é positivo em todos os seus sentidos anatômicos, significando que ela se expande por efeito do aquecimento e se contrai com o seu resfriamento.

O coeficiente de expansão linear da madeira seca a 0% U, determinado na direção paralela às fibras, parece independer de sua massa específica e da espécie florestal (todos os valores se encontram entre 3 a 5 X 10<sup>-6</sup> /° C ).

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Testes efetuados com madeiras de coníferas e de folhosas, mostram que os coeficientes na direção paralela às fibras são extremamente baixos. No entanto, quando eles se referem às direções radial e tangencial da madeira, verifica-se uma proporcionalidade à massa específica do material. Estes coeficientes variam na ordem de 5 a mais de 10 vezes o determinado na direção das fibras.

Os coeficientes de expansão térmica podem ser considerados como independentes da temperatura fora da faixa de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$ , mas dentro desta, de forma geral eles podem ser calculados pelas seguintes fórmulas:

**Para coníferas e folhosas mais leves:**

$$C_r = 56 r_o \times 10^{-6} \text{ por } ^{\circ}\text{C} \quad (35)$$

$$C_t = 81 r_o \times 10^{-6} \text{ por } ^{\circ}\text{C} \quad (36)$$

onde:

$C_r$  = coeficiente linear de expansão radial;

$C_t$  = coeficiente linear de expansão tangencial; e

$r_o$  = massa específica a 0% de umidade.

**Para folhosas mais pesadas:**

$$C_r = 45 r_o \times 10^{-6} \text{ por } ^{\circ}\text{C} \quad (37)$$

$$C_t = 58 r_o \times 10^{-6} \text{ por } ^{\circ}\text{C} \quad (38)$$

Para a madeira de Balsa (*Ochroma lagopus*), por ter sua estrutura da parede celular diferente e constituir uma exceção, as seguintes fórmulas são utilizadas:

$$C_r = 100 r_o \times 10^{-6} \text{ por } ^{\circ}\text{C} \quad (39)$$

$$C_t = 140 r_o \times 10^{-6} \text{ por } ^{\circ}\text{C} \quad (40)$$

Quando comparada à madeira no estado seco, madeira que contém umidade se comporta de forma diferente com a variação da temperatura: se for aquecida, ela tende a se expandir por efeito térmico, e a se contrair devido à perda de umidade.

A menos que a madeira esteja com um teor de umidade inicial muito baixo (menor que 3 ou 4% U), a contração em decorrência da perda de umidade será maior que a expansão térmica, de forma que a mudança dimensional resultante passa a ser negativa.

Quando a madeira está em níveis de teor de umidade intermediários, com cerca de 8 a 20% U, e é aquecida, ela inicialmente irá se expandir, para então contrair gradualmente até um volume menor que o volume inicial, a medida que ocorre a perda de umidade por efeito do aquecimento. Mesmo na direção paralela às fibras, onde ocorre uma mudança de dimensão pela perda de umidade considerada não significativa, a contração causada pela sua desidratação ocorrerá em maior proporção que a expansão por temperatura, exceto se o teor de umidade inicial da madeira for extremamente baixo.

## 6. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DA MADEIRA

As propriedades elétricas da madeira mais importantes são: a) Condutividade elétrica; b) constante dielétrica; e c) fator de potência dielétrica.

Exemplos de processos industriais e aplicações, onde as propriedades elétricas da madeira são importantes, incluem a cura térmica de adesivos em produtos de madeira por campos elétricos de alta frequência, postes e cruzetas para a transmissão de energia elétrica, entre outros. Além destas aplicações, medidores de umidade funcionam utilizando a relação entre as propriedades elétricas e a quantidade de umidade existente na madeira, para estimar o teor de umidade deste material em percentuais.

A condutividade de um material determina a corrente elétrica que irá passar quando ele é colocado sob um gradiente de voltagem.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Para a madeira, a condutividade varia pouco com a aplicação de voltagem, mas praticamente dobra a cada elevação de 10°C.

A condutividade elétrica da madeira, ou o seu valor recíproco (**resistência elétrica**), varia muito com o teor de umidade, especialmente abaixo do ponto de saturação das fibras: A medida que o teor de umidade aumenta de 0% U até o PSF, a condutividade elétrica cresce (e a resistência elétrica decresce) de  $10^{10}$  a  $10^{13}$  vezes.

Com a elevação do teor de umidade acima do PSF, até completo preenchimento dos espaços existentes na estrutura da madeira, o aumento de condutividade é pequeno e muito variável.

Dentro do intervalo higroscópico da madeira a condutividade é maior no sentido das fibras que no seu sentido perpendicular, mas ligeiramente maior no sentido radial que no sentido tangencial.

As condutividades longitudinal, radial e tangencial são dadas dentro da seguinte relação aproximada:

<b>Long.</b>	<b>:</b>	<b>Rad.</b>	<b>:</b>	<b>Tang.</b>
<b>1,00</b>	<b>:</b>	<b>0,55</b>	<b>:</b>	<b>0,50</b>

Quando a madeira contém quantidades de sais solúveis anormais, ou outras substâncias eletrolíticas, tais como preservativos salinos ou sais adquiridos da água do mar impregnados na madeira, a condutividade elétrica pode aumentar substancialmente.

O aumento da condutividade é pequeno quando o teor de umidade da madeira é menor que 8%, no entanto torna-se rapidamente alto quando o teor de umidade excede 10% ou 12% .

Quando a madeira está seca ela possui uma **resistência elétrica específica ( R )** relativamente alta ( resistência à passagem de corrente elétrica contínua, em  $\Omega$ , dada por um cubo de madeira seca de  $1 \text{ cm}^3$  ) e, nestas condições, ela pode ser considerada um bom isolante elétrico. Esta dependência pode ser observada na figura 36, apresentada a seguir.

Como dentro do limite higroscópico da madeira há uma dependência inversamente proporcional entre a resistência elétrica específica (  $R$  ) e o teor de umidade, ela pode ser utilizada para a determinação do teor de umidade na madeira, por meio de aparelhos elétricos. Estes aparelhos determinam diretamente teores de umidade compreendidos entre 6%U e 25%U, com precisão de aproximadamente 1,5% .

Além do teor de umidade, a resistência elétrica da madeira é influenciada pela temperatura. Em geral, quanto mais alta for a temperatura do lenho, mais baixa será a sua resistência elétrica. Dentro do limite higroscópico, normalmente considera-se uma variação de 0,15% para cada grau Celsius.

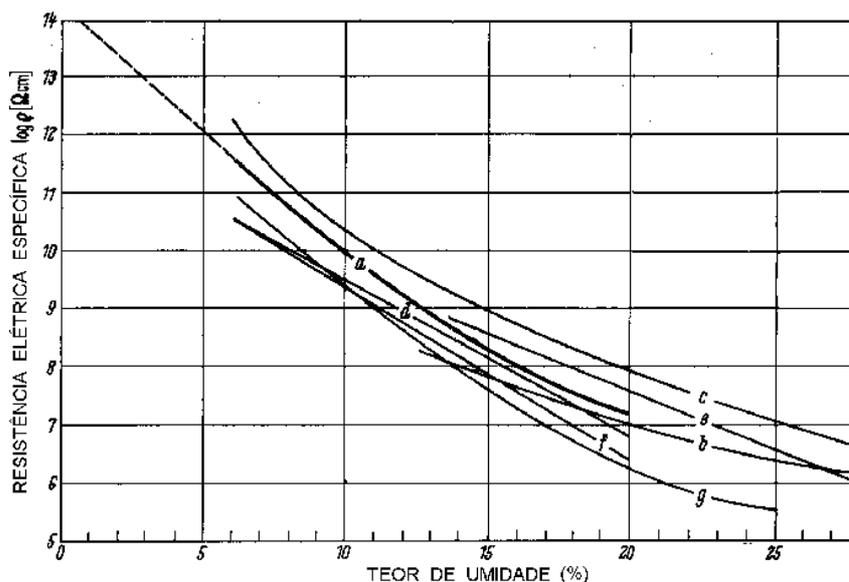


Figura 36. Relação existente entre a resistência elétrica específica da madeira e o seu teor de umidade

A tabela 11, a seguir, apresenta a resistência elétrica de alguns materiais, considerados bons isolantes elétricos:

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

TABELA 11. RESISTENCIA ELÉTRICA ESPECÍFICA (R) DE  
ALGUNS MATERIAIS ISOLANTES

MATERIAL	R ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
Vidro	$5,0 \cdot 10^{13}$
Madeira seca a 0% U	$1,6 \cdot 10^{14}$
Porcelana	$3,0 \cdot 10^{14}$
Borracha	$2,0 \cdot 10^{15}$
Quartzo	$5,0 \cdot 10^{18}$
$r = \text{resistência em } \Omega$ $R = (r \cdot a) / d$ , onde: $a = \text{área em cm}^2$ $d = \text{distância entre eletrodos}$	

Constante dielétrica (  $\epsilon$  ) de um material não condutivo, determina a quantidade de energia elétrica potencial na forma de polarização induzida, a qual é armazenada num dado volume de material, quando este é colocado num campo elétrico.

Para a madeira, a constante dielétrica é maior para polarização no sentido paralelo às fibras que em seu sentido perpendicular.

A constante dielétrica da madeira seca varia de aproximadamente 2 a 5 na temperatura ambiente. O seu valor aumenta se houver um aumento da temperatura ou do teor de umidade da madeira, com uma interação positiva moderada entre estes dois fatores, já que a constante dielétrica da água é aproximadamente 81. Por tal razão, variações no teor de umidade têm um efeito maior sobre a constante dielétrica que a densidade da madeira.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Ocorre uma grande interação negativa entre o teor de umidade da madeira e a frequência: Em 20 Hz a constante dielétrica pode variar de aproximadamente 1.000.000 para madeira úmida, para 4 em madeira no estado seco; já a 1 KHz, esta variação pode ser de 5.000 no estado úmido para 4 no estado seco.

Utilizando-se o bom correlacionamento entre a umidade e a constante dielétrica, acima de aproximadamente 5% U, desenvolveram-se aparelhos baseados no princípio de medição da capacidade elétrica, para a determinação do teor de umidade da madeira.

Por causa da polarização, ou seja, da rápida e contínua mudança de cargas elétricas dentro do material, causada pela corrente elétrica alternada de alta frequência ( $10^6$  a  $10^8$  Hz), ocorre o aquecimento da matéria. Este tipo de aquecimento é utilizado nas práticas de secagem e de colagem da madeira, com as vantagens e desvantagens apresentadas na tabela 12, a seguir:

TABELA 12. FORMAS DE UTILIZAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA ALTERNADA DE ALTA FREQUÊNCIA, SUAS VANTAGENS E DESVANTAGENS

FORMA DE UTILIZAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>Colagem da madeira por aquecimento da linha de cola</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento rápido e seletivo devido a diferença entre o teor de umidade e a constante dielétrica <math>\epsilon</math></li> <li>- Ótimo aproveitamento da energia elétrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aparelhagem muito cara;</li> <li>- A alta frequência pode interferir em outros aparelhos eletrônicos;</li> <li>- Preço da energia elétrica elevado.</li> </ul>
<b>Secagem da madeira</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapidez;</li> <li>- Ausência de defeitos para a maioria das espécies de madeira;</li> <li>- Método adequado para madeiras bem dimensionadas.</li> <li>- Secagem de dentro para fora (segundo a dependência <math>\epsilon/U</math>);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custos de energia elétrica e aparelhagem elevados;</li> <li>- Propensão ao aparecimento de rachaduras e colapso em madeiras de baixa condutividade de vapor (poros pequenos, tilos, etc.)</li> </ul>

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

**Fator de potência dielétrica** é uma medida da porção da energia armazenada, convertida em calor.

Observações de importância:

- Quando um material não condutor é colocado num campo elétrico, ele absorve e armazena energia potencial. A quantidade de energia armazenada por unidade de volume dependerá da constante dielétrica e da magnitude do campo elétrico aplicado.
- Os valores do fator de potência estão sempre situados entre 0 e 1.
- Para a madeira, o fator de potência varia entre 0,01, quando ela é de baixa densidade e está seca, a 0,95 para madeiras densas e com altos teores de umidade. Este fator é, usualmente, mas não necessariamente, maior no sentido das fibras que no sentido perpendicular a este.

O fator de potência dielétrica da madeira é afetado por várias variáveis, incluindo a frequência, teor de umidade e temperatura. Estas variáveis se combinam e interagem de forma complexa para resultar em valores de fatores de potência máximos e mínimos.

## **7. PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA**

Uma vez que a madeira é utilizada na fabricação de instrumentos musicais, e revestimento de paredes e assoalhos (casas, auditórios, escolas, etc.), algumas de suas propriedades acústicas são de elevada importância. Para entendê-las de forma mais aprofundada, se faz indispensável o conhecimento dos conceitos teóricos dessa área de conhecimento específica.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

### Os principais conceitos teóricos da acústica são:

**Som:** O som é a impressão fisiológica produzida por vibrações de corpos e que chegam a nossos ouvidos por meio de ondas mecânicas, necessitando de um meio material para se propagar (ondas longitudinais).

Na construção civil, o som propagado pelo ar é diferenciado do som propagado por materiais sólidos, como os que constituem as paredes e pisos de edificações.

**Freqüência:** A freqüência  $F$  (Hz) de uma onda sonora depende do emissor. Ondas mecânicas com freqüências inferiores a 20 Hz (infra-sonoras) e superiores a 20.000 Hz (ultra-sonoras) não provocam qualquer sensação no aparelho auditivo humano.

**Velocidade do som:** A velocidade do som depende das características elásticas do meio em que ele se propaga e é dada por:

$$C = \sqrt{980665 \cdot E / r} \quad (\text{cm / seg}) \quad (41)$$

onde:

C = velocidade do som;

E = módulo de elasticidade do material;

r = massa específica do material.

**Exemplo:** Utilizando-se uma madeira a 12%U com módulo de elasticidade igual a 160.000 kg/ cm<sup>2</sup>, paralelo às fibras, e uma massa específica de 0,67 g/ cm<sup>3</sup>, obteremos uma velocidade de propagação de som de:

$$C = \sqrt{980.665 \times 160.000 / 0,67}$$

C ≈ 483.930 cm/seg ou ≈ 4.900 m/seg, no sentido paralelo às fibras, quando a madeira estiver com 12%U.

Exemplos de velocidade de propagação do som em diferentes materiais:

ar.....340 m/seg	água.....1.450 m/seg
cortiça.....500 m/seg	cimento.....4.000 m/seg
borracha.....500 m/seg	aço.....5.000 m/seg

**Intensidade de som:** Intensidade de som é a intensidade sonora física mensurável, dada pelo quociente entre a energia transportada pela onda sonora e a área de uma superfície perpendicular à direção de propagação da onda, em unidade de tempo. Portanto, ela indica a potência da onda por unidade de área ( $I = P/A$ ), dada em  $\text{erg/seg.} \times \text{cm}^2 = 10^{-7} \text{ W/ cm}^2 = 1 \text{ dB}$  (decibel).

#### **Isolamento do som:**

Para conseguirmos adequado isolamento do som, devemos diferenciar os dois casos supracitados, ou seja: **Propagação do som pelo ar** e propagação do som **por materiais sólidos**, levando-se em conta as seguintes considerações:

**a) Propagação sonora no ar:** a acústica de recintos depende da relação entre o som refletido e/ou absorvido pelos seus diferentes materiais de construção. Além disso, ela é influenciada pela geometria das peças, a qual repercute na freqüência e no ângulo de reflexão do som (figura 37);

O grau de absorção do som “A” depende do valor da freqüência. Por tal razão a madeira tem um grau de absorção favorável em relação a outros materiais, por absorver mais as freqüências baixas que as altas, resultando num efeito agradável para a audição, importantes na qualidade de som para salas de aula, auditórios, etc.

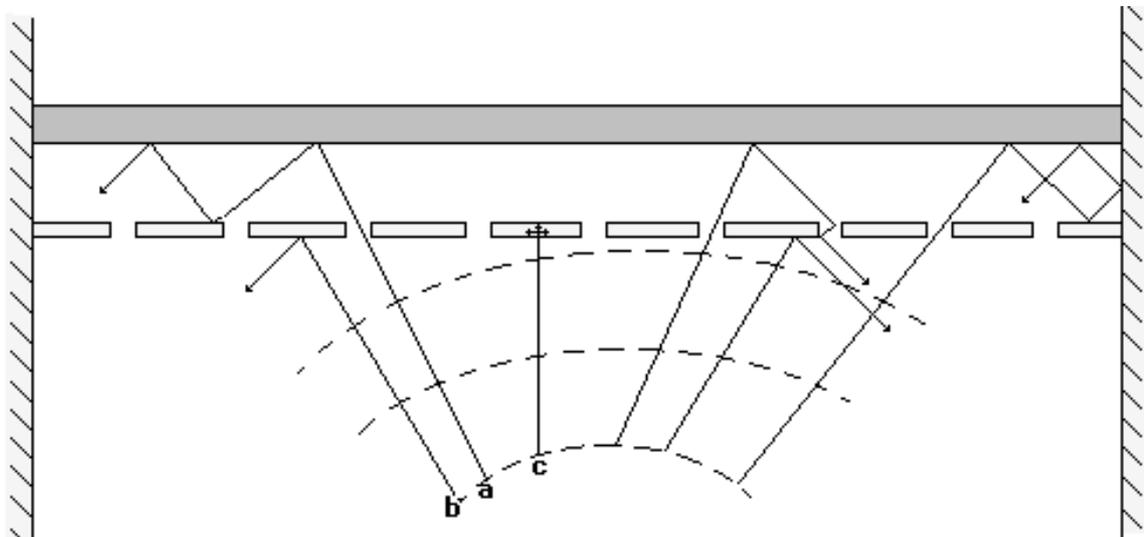


Figura 37: Efeito de um forro acústico confeccionado de chapa de fibras de madeira perfuradas: a) penetração das ondas sonoras pelos buracos, e perda de energia por efeito da reflexão sucessiva nas paredes do espaço vazio entre o teto e o forro aplicado; b) reflexão de parte da onda sonora incidente na superfície da chapa de fibras; e c) absorção da onda sonora pela chapa de fibras.

A tabela 13, a seguir, apresenta comparações efetuadas sobre o grau de absorção do som, causado por alguns materiais de construção.

TABELA 13. EXEMPLOS DE GRAUS DE ABSORÇÃO SONORA DE ALGUNS MATERIAIS

MATERIAL	GRAU DE ABSORÇÃO (A)	
	120 Hz	2.000Hz
Janela aberta *	1,00	1,00
Telhas, cimento, água e vidro	0,10	0,02
Madeira	0,10	0,08
Chapa compensada	0,20	0,10
Chapas isolantes	0,12 – 0,30	0,20 – 0,75
* referência para fins comparativos com os demais materiais – não há absorção de som em janela aberta, mas o som sai do ambiente e não retorna.		

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

**b) Propagação do som de um ambiente para outro, pelas paredes:** O choque de ondas sonoras que se propagam no ar, incidentes sobre uma parede, faz com que a parede entre em vibração e as propagem do outro lado da parede.

A figura 38 abaixo apresenta, esquematicamente, a forma do som se propagar de um ambiente para outro.

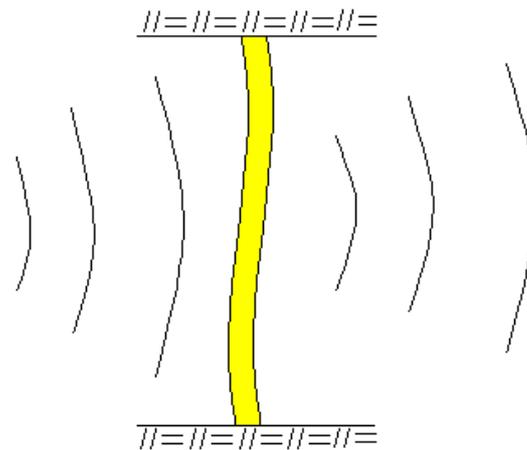


Figura 38. Propagação do som pela vibração de uma parede, por efeito de choque de ondas sonoras.

Assim, desejando-se um bom isolamento do som que se propaga pelo ar, devemos reduzir as oscilações dos componentes da construção por meio de um aumento da massa desses componentes.

O isolamento do som propagado pelo ar “R”, através de uma parede de camada única, constituída com apenas um material, pode ser representado graficamente ou determinado pela fórmula abaixo:

$$R = 20 \text{ Log } (0,004 \cdot m \cdot f) \quad (\text{dB}) \quad (42)$$

onde:

m = massa; e

f = frequência do som.

Para dar melhor idéia sobre variação entre o isolamento acústico de paredes simples, a tabela 14 apresenta relações aproximadas entre o coeficiente de absorção de ruídos, as suas espessuras e as massas dos materiais empregados para cada metro quadrado de parede.

TABELA 14. RELAÇÃO APROXIMADA ENTRE O COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE RUIDOS (ISOLAMENTO ACÚSTICO) DE PAREDES SIMPLES, EM DIFERENTES ESPES-SURAS E MASSAS DO MATERIAL POR METRO QUADRADO.

<b>MATERIAL</b>	<b>COEF. DE ABSORÇÃO DE RUIDOS (dB)</b>	<b>MASSA DO MATERIAL (kg/ m<sup>2</sup>)</b>
Compensado 5 mm	18	2,3
Vidro de 3 a 4 mm	17	12,0
Vidro de 7 a 8 mm	30	27,0
Palha caiada prensada	37	70,0
Pedra-pome caiada 12 cm	38	125,0
¼ muro de tijolos caiado 27 cm	42	175,0
¼ muro de tijolos não caiado 27 cm	32	120,0
¼ muro chapa metálica de ferro 2mm	33	160,0

A eficiência deste isolamento depende ainda da freqüência “f” do som: Melhores resultados são obtidos mediante altas freqüências, pois as oscilações rápidas são acompanhadas pelos materiais de construção com maior dificuldade.

A figura 39, a seguir, apresenta as variações supracitadas, considerando o tipo de material, a espessura e a freqüência do som emitido.



Figura 39. Dependência do isolamento acústico versus a frequência do som, de um compensado de madeira (1) e de uma parede de alvenaria (2).

Devido a pouca massa constituinte da madeira, paredes simples construídas desse material apresentam isolamento acústico deficiente. Mesmo paredes duplas, preenchidas com tábuas ou chapas de madeira atingem uma massa de 50 a 100 kg/ m<sup>2</sup>, o que corresponde a um índice de isolamento de apenas 37 a 44 dB.

Paredes compostas de várias camadas, contendo ar entre elas, diminuem consideravelmente as oscilações das partes sólidas constituintes. O isolamento acústico pode ainda ser melhorado pela incorporação de materiais absorventes de som, moles e porosos, como apresentado na figura 40.

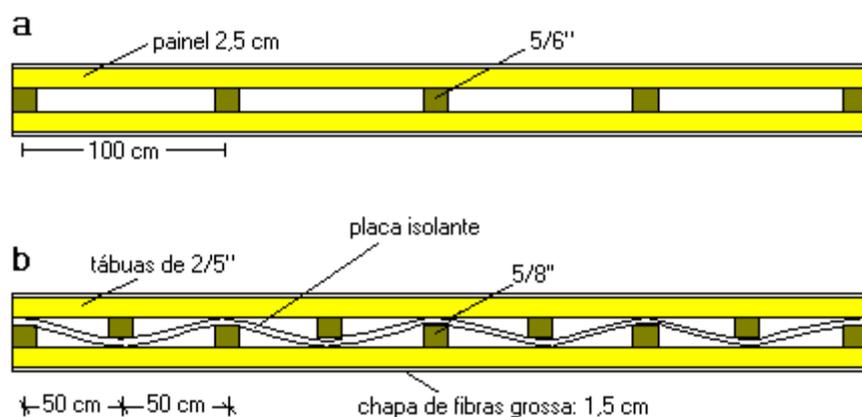


Figura 40. Tipos de paredes de madeira e qualificação quanto ao isolamento acústico: a) Parede múltipla com isolamento deficiente com pontes sonoras; b) parede múltipla com elevado poder de isolamento acústico.

A capacidade de isolamento acústico deste tipo de partes construtivas não pode ser calculada, mas pode ser determinada empiricamente com aparelhos especiais. De forma geral calcula-se como:

$$R = 10 \text{ Log } I_1 / I_2 \quad \text{e} \quad R = D + 10 \text{ Log } F / A \quad (\text{dB}) \quad (43)$$

onde:

$I_1$  = intensidade sonora no local de emissão;

$I_2$  = intensidade sonora no local de recepção;

D = diferença de pressão sonora entre o local de emissão e o local de recepção;

F = área da parte da construção em questão; e

A = área total do recinto receptor.

**a) Propagação sonora por material sólido:** Este tipo de som normalmente é produzido pelo pisar, sobre pisos e recintos em andares superiores, ou por batidas, vibrações ou outras formas similares, propagando-se por intermédio do material de construção.

Uma redução acústica satisfatória só pode ser conseguida com a incorporação à parte construída, de materiais absorventes sonoros, moles e porosos (figura 41). Como exemplo de materiais absorvente de som, podem ser citadas as chapas moles de fibras, lãs de vidro e de rocha, entre outros.

A camada isolante não deve ter nenhuma interrupção para evitar a existência de “pontes sonoras”, as quais propagam o som sem qualquer impedimento. Exemplo dessa situação é a necessidade de isolamento de pinos ou parafusos utilizados na fixação de alguma máquina ou motor em paredes ou pisos.

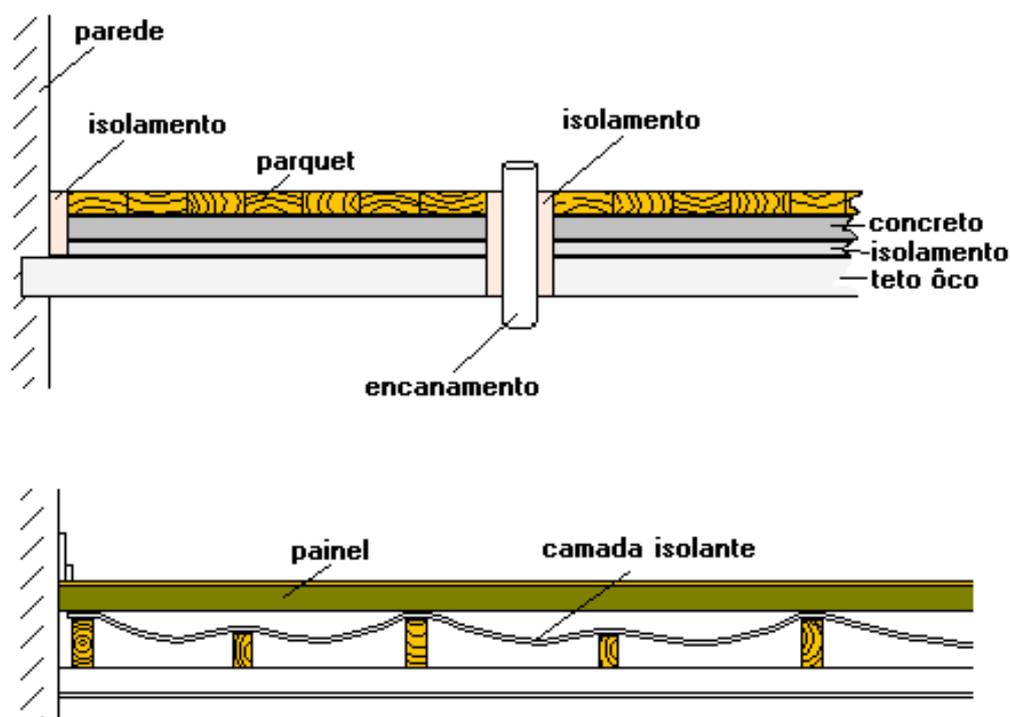


Figura 41. Formas práticas de isolamento do som por materiais sólidos: a) em um teto de laje de concreto, acima; e b) em teto com vigamento de madeira, abaixo.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

## 8. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

O esforço que uma peça de madeira pode suportar é afetado de forma expressiva pela direção da carga aplicada em relação à direção das fibras ou traqueóides, à duração da carga, massa específica, teor de umidade e temperatura da madeira.

### 8.1. ELASTICIDADE E PLASTICIDADE

Elasticidade é a propriedade da madeira sólida que a possibilita retomar a sua forma original, após a remoção da carga aplicada que causou certa deformação. As propriedades elásticas são características de corpos sólidos, observadas quando uma carga aplicada se situa abaixo do limite proporcional de elasticidade; quando se situa cima deste limite ocorrerão também deformações plásticas (irreversíveis), seguidas pela ruptura do material.

Na madeira, o teor de umidade é importante, pois com altos teores pequenas deformações elásticas, efetuadas por dado período de tempo, poderão se tornar deformações plásticas.

Aparentemente, o limite elástico pode ser considerado um conceito arbitrário: De acordo com Bach e Baumann (1923), para a madeira, a relação entre a carga aplicada e as deformações elásticas até o limite de elasticidade é expressa pela seguinte equação (Lei de Hooke):

$$\varepsilon = \alpha D \cdot \sigma$$

44

onde:

- $\varepsilon$  = Deformação relativa =  $\Delta l / l_0$  [ cm ]; (44)  
 $\Delta l$  = alteração da dimensão de um corpo, por ação de uma carga (tração, compressão, etc.);  
 $l_0$  = dimensão inicial do corpo submetido ao esforço;  
 $\alpha_D$  = coeficiente de deformação =  $\varepsilon / \sigma$ ; (46)  
 $\sigma$  = resistência ou tensão =  $P / A$  [ Kp / cm<sup>2</sup>, Kgf / cm<sup>2</sup>, ou N / cm<sup>2</sup> ] (47)  
 $P$  = Carga aplicada [ k<sub>p</sub> ou Kgf ]  
 $A$  = área sujeita ao esforço [ cm<sup>2</sup> ]

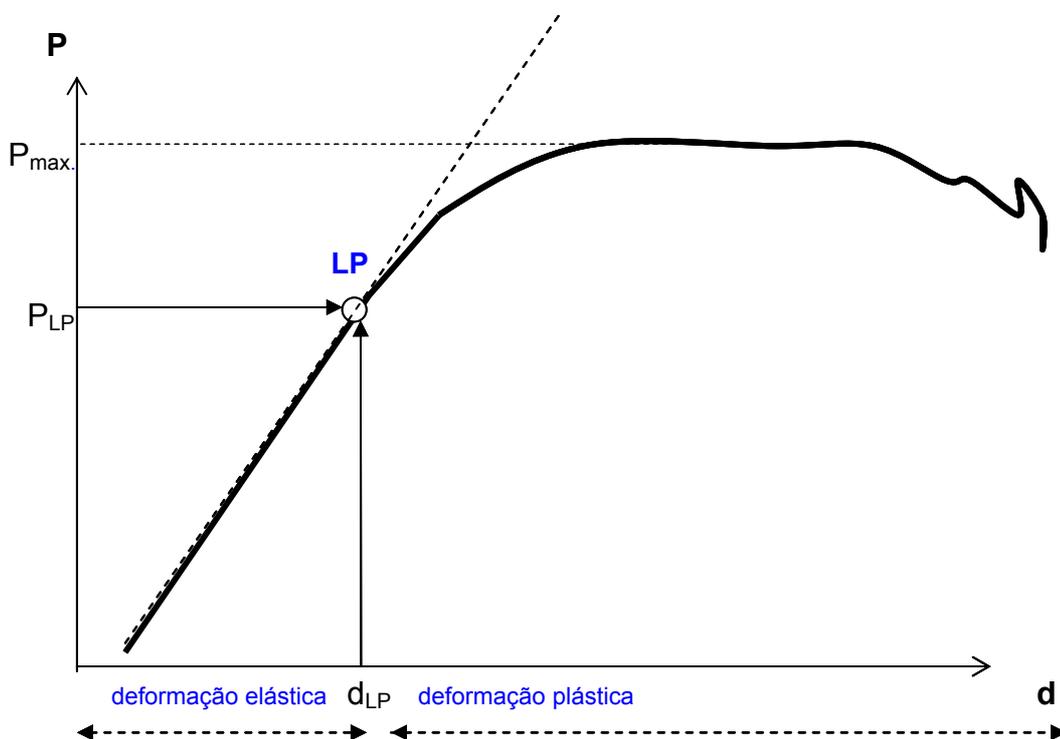


Figura 42: Típica relação carga / deformação para testes de flexão, tração e compressão, e informações de interesse para cálculos de  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{LP}$  e  $E$ .

Segundo a equação dada pela Lei de Hooke e a figura acima, a deformação relativa é diretamente proporcional ao esforço até o limite de elasticidade (ponto tangente), na parte reta do gráfico descrito pela relação carga / deformação. Este ponto, onde deixa de existir proporcionalidade entre a carga aplicada e a deformação do corpo a que o esforço é submetido, denomina-se "limite proporcional" (LP).

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

### 8.1.1. Módulo de Elasticidade

Na prática, o fator  $\alpha D$  (coeficiente de deformação) é substituído pelo seu valor recíproco, e denominado **Módulo de elasticidade (E)**.

$$E = 1 / \alpha D \quad (48)$$

O **Módulo de elasticidade (E)** expressa a carga necessária para distender um corpo de 1 cm<sup>2</sup> de área transversal, a uma distância igual ao seu próprio comprimento.

Como é impossível distender a madeira nestas proporções, sem que antes ela chegue à ruptura, o módulo de elasticidade é apenas um valor teórico, utilizado para obter facilidade em cálculos e classificação de peças deste material.

Embora o **E** não ofereça informações reais sobre o comportamento do material madeira, em geral pode-se dizer que:

- a) Quanto mais alto o **E**, mais alta é a resistência do material;
- b) Quanto mais alto o **E**, mais baixa será a deformabilidade do material;
- b) Quanto mais baixo o **E**, piores serão as qualidades do material para fins de construções civis.

Na prática pode-se utilizar o módulo de elasticidade para a classificação de madeira para construções, determinado por meio de aparelhos especiais dotados de dispositivos para avaliar esta propriedade, como demonstrado esquematicamente pela figura a seguir.

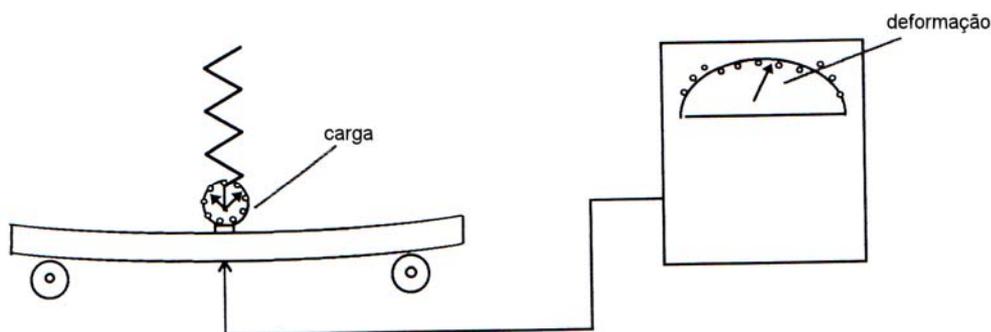


Figura 43: Esquema simplificado do sistema de classificação de madeiras, baseado no módulo de elasticidade **E** exigido para fins contrutivos.

Determinação do Módulo de Elasticidade:

Desenvolvendo a equação dada pela Lei de Hooke  $\epsilon = \alpha_D \cdot \sigma$ , temos:

$$\alpha_D = \epsilon / \sigma \quad \text{e} \quad \alpha_D = 1 / E \quad (49)$$

$$\therefore 1 / E = \epsilon / \sigma$$

$$\text{e} \quad E = \sigma / \epsilon \quad [ \text{Kp} / \text{cm}^2 \text{ ou } \text{Kgf} / \text{cm}^2 ] \quad (50)$$

onde:  $\alpha_D$  = coef. de deformação e

$\epsilon$  = deformação relativa

O **E** é determinado como o valor recíproco da relação entre a deformação elástica total (obtida no limite proporcional **LP**) e a carga aplicada através de ensaios de flexão estática, tração ou compressão.

Os valores a serem utilizados em cálculos podem ser diretamente obtidos nos gráficos baseados na relação carga/ deformação, confeccionados automaticamente pela máquina de ensaios, ou traçados com os dados adquiridos por leituras efetuadas em relógio deflectômetro registrador, das deformações da peça de madeira ensaiada e das cargas correspondentes aplicadas.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Máquinas de ensaio também poderão ser dotadas de elementos eletrônicos que possibilitam a confecção imediata de gráficos, a partir da carga aplicada e da deformação correspondente causada ao corpo de prova ensaiado.

O módulo de elasticidade também pode ser determinado com base na deformação de corpos-de-prova apoiados em apenas uma das extremidades, tendo a seguinte fórmula para o cálculo da flexão estática:

$$E_f = P \cdot L^3 / 3 \cdot I \cdot f \quad [Kp / cm^2] \quad (51)$$

onde:

$E_f$  = Módulo de elasticidade à flexão estática;

$P$  = Carga aplicada;

$L$  = distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga;

$f$  = deformação ou flecha ( mm );

$I$  = Momento de inércia calculado  $\rightarrow I = b \cdot h^3 / 12$ , para seções transversais retangulares.

#### Módulo de elasticidade dinâmico:

O  $E$  dinâmico é obtido pelo teste de pequenas varetas de madeira, submetidas a vibrações de ondas ultra-sonoras. Com o conhecimento da distância entre duas ondas sonoras ( $\Delta t$ ) e do tamanho da peça de madeira, determina-se a velocidade do som  $V$ , como:

$$V = l / t \quad [cm / seg.] \quad (52)$$

Posteriormente calcula-se o módulo de elasticidade dinâmico  $E_d$  :

$$E_d = r \cdot V^2 \quad [Kg / cm^2] \quad (53)$$

onde:

$V$  = velocidade do som e;

$r$  = massa específica da madeira.

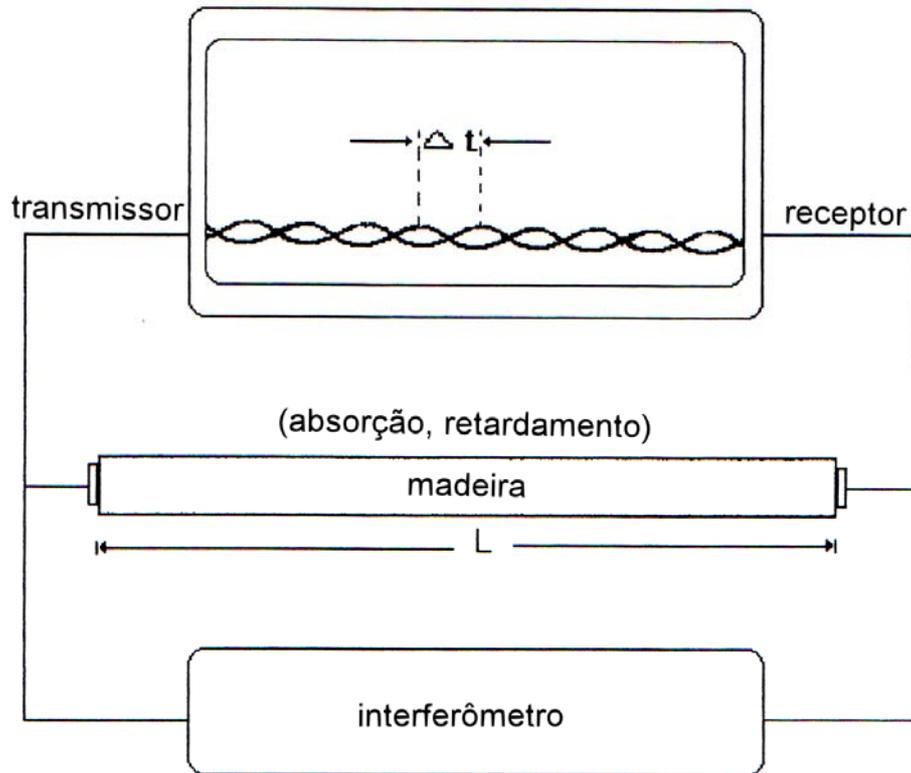


Figura 44: Esquema simplificado da determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Os módulos de elasticidade determinados pelos diferentes métodos, estático (por flexão, compressão ou tração da madeira) e dinâmico, apresentam variações causadas por influências específicas das condições dos testes (velocidade, tipo de teste, tipo de corpo-de-prova, tensões sobrepostas, etc.). Por este motivo deve-se sempre indicar com que tipo de teste o módulo de elasticidade foi determinado.

Em geral:

$$E_d > E_c, E_t > E_f$$

onde:  $E_d$  = Módulo dinâmico de elasticidade;  $E_c$  = Módulo de elasticidade obtido através do ensaio de compressão;  $E_t$  = Idem, por meio do ensaio de tração; e  $E_f$  = Idem, por meio do ensaio de flexão.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Enquanto a celulose pura teoricamente alcançaria um módulo de elasticidade aproximado de 1.200.000 Kg/cm<sup>2</sup>, a madeira jamais alcançaria tais valores devido aos defeitos e irregularidades de suas macro e micro estruturas. Desta forma, as madeiras das diferentes espécies florestais, com mais ou menos defeitos e irregularidades estruturais, além de outros fatores importantes como a massa específica, etc., terão módulos de elasticidade muito variáveis.

A tabela 15 a seguir apresenta esta propriedade para algumas espécies de madeira, para podermos visualizar as diferenças que ocorrem entre si. Desta forma, podemos compará-las e observarmos que, embora algumas espécies tenham massas específicas mais altas, outros fatores afetam o seu módulo de elasticidade, como no caso da imbuia em relação à maioria das outras espécies.

TABELA 15: RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS DE ALGUMAS MADEIRAS BRASILEIRAS

<b>NOME COMUM</b>	<b>NOME BOTÂNICO</b>	<b>P<sub>f</sub> max (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>f</sub> (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>c</sub> (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Pau marfim	<i>Balfarodendrum riedelianium</i>	1.450	118.000	140.000
Ipê	<i>Tecoma spp.</i>	1.300	130.000	160.000
Peroba rosa	<i>Aspidosperma sp</i>	1.050	95.000	115.000
Bracatinga	<i>Mimosa scabrella</i>	1.000	130.000	140.000
Virola	<i>Virola bicuyba</i>	800	95.000	125.000
Imbuia	<i>Ocotea porosa</i>	900	80.000	90.000
Pinheiro	<i>Araucaria angustifolia</i>	850	110.000	130.000
Cedro	<i>Cedrella fissilis</i>	800	80.000	100.000
Baguaçu	<i>Talauma ovata</i>	600	80.000	100.000
Guapuruvu	<i>Schizolobium parahybum</i>	430	50.000	57.000

P<sub>f</sub> max : carga máxima aplicada no ensaio de flexão estática; E<sub>f</sub> : módulo de elasticidade determinado por meio de ensaio de flexão estática; E<sub>c</sub> : módulo de elasticidade determinado por meio de ensaio de compressão axial.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

## 8.2. DEPENDÊNCIAS GERAIS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÁSTICAS DA MADEIRA

As variações observadas nos resultados dos testes efetuados em laboratório decorrem por causa de diferentes fatores, atribuídos a:

- Condições do ensaio efetuado (relacionadas ao método empregado);
- Influências internas (características e propriedades internas da madeira);
- Influências externas (relacionadas às condições ambientais, etc.).

### 8.2.1. Condições do Ensaio

#### - Dimensões e forma do corpo de prova

Como exemplo de variações causadas pelas dimensões e forma do corpo-de-prova (c.p.) sobre as propriedades de resistência da madeira, pode-se citar a relação comprimento / aresta da seção transversal ( $L/a$ ) dos corpos-de-prova para o ensaio de compressão paralela às fibras, ou seja :

- a) Quanto maior o comprimento do corpo-de-prova (maior relação  $L/a$ ), menor será a resistência à compressão paralela às fibras;
- b) Quanto maior a seção transversal do corpo-de-prova (menor relação  $L/a$ ), maior será sua resistência à compressão paralela às fibras.

Enquanto a relação  $L/a$  ideal para teste de compressão paralela às fibras é aproximadamente igual a 4, em ensaios de flexão estática a relação  $L/h$  ideal deve ser superior a 20, pois só a partir deste ponto é atribuída uma resistência máxima e constante à madeira. Na flexão dinâmica, no entanto, a relação  $L/h$  deve estar entre 10 e 20, intervalo este que corresponde a valores mínimos na curva gráfica, pois fora

deste intervalo haveria a necessidade de equipamentos para a determinação desta resistência mais robustos e custosos.

Para que a ruptura no teste de tração axial se de no meio dos corpos-de-prova, como é esperado, estes devem apresentar forma adequada, conforme estabelecido pelas normas técnicas para este teste, como por exemplo a Norma COPANT 30:1-015

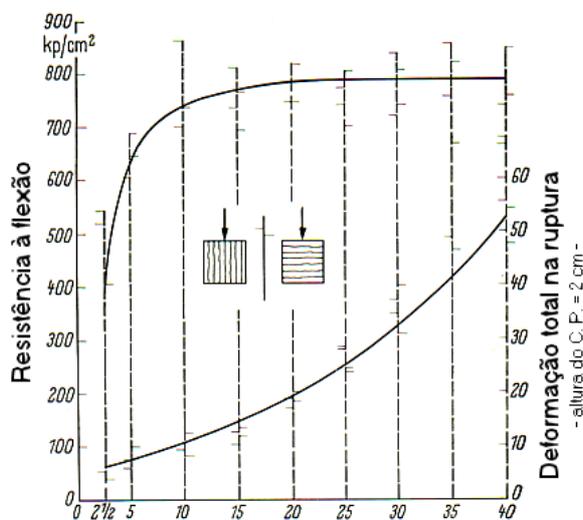


Figura 45. Dependência da resistência à flexão estática e da deformação total sobre a relação L/h dos corpos-de-prova

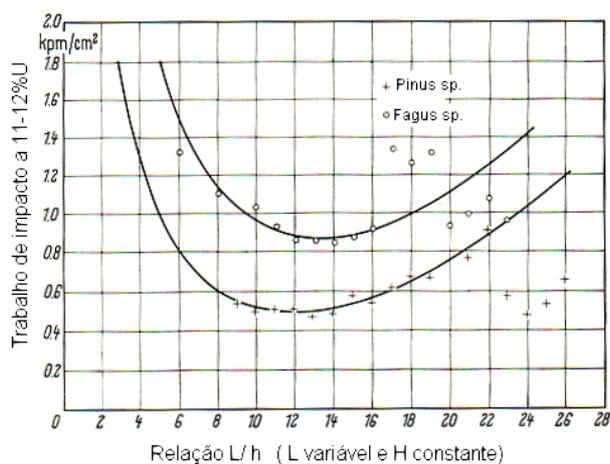


Figura 46. Relação da energia absorvida por volume, como uma função da relação L/h – note-se que o valor mínimo do trabalho de impacto corresponde a  $L/h = 12$ .

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

### - Tipos de corpos-de-prova (formas)

Para os testes de cisalhamento existem inúmeros tipos de corpos-de-prova. Conseqüentemente entre eles existirão diferentes distribuições de tensões no interior do material durante a realização do teste, responsáveis por grandes variações nos resultados.

### - Velocidade do ensaio

Em geral, quanto maior for a velocidade de teste utilizada, maior será a resistência observada. Isto ocorre porque as fibras e moléculas que constituem o material apresentam certa inércia para reagir ao esforço aplicado.

### - Método de ensaio adotado

O método de ensaio utilizado representa uma grande fonte de variação nos resultados obtidos. Como exemplo podem-se citar as diferentes formas de determinar os módulos de elasticidade da madeira, não permitindo a comparação direta dos valores obtidos. Como exemplo podemos citar os módulos de elasticidade usualmente determinados, onde:

$$E_f < E_c \cong E_t < E_d$$

Pela mesma razão, não são diretamente comparáveis os valores obtidos pelos diferentes ensaios de cisalhamento ou de dureza (Janka, Brinnell, Rokwell, etc.)

A aplicação de diferentes cargas durante o teste de flexão estática também resulta em momentos de distribuição das tensões desiguais dentro dos corpos-de-prova, dando diferentes resultados.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Todas estas influências supracitadas mostram que:

- É indispensável a utilização de normas;
- Nunca se pode comparar resultados obtidos por testes diferentes (exceto em casos onde há um relacionamento entre os resultados muito alto);
- Sempre há necessidade de se indicar e descrever detalhadamente os processos ou testes empregados na avaliação efetuada;

### 8.2.2. Influências Internas da Madeira

A propriedade mais importante da madeira é sua massa específica. Em geral, quanto maior for a massa específica da madeira, maiores serão suas propriedades mecânicas e elásticas, a exemplo das flexões estática e dinâmica, compressões paralela e perpendicular às fibras, etc , e os módulos de elasticidade.

Apesar da massa específica representar a quantidade de material lenhoso por unidade de volume da madeira, e por tal razão estar bem relacionada com a maioria de suas propriedades mecânicas, esta relação pode não existir em decorrência de defeitos ou variações anatômicas expressivas deste material.

#### - Ângulo das fibras

O ângulo das fibras, entre a direção longitudinal da peça de madeira e a direção em que as fibras estão orientadas nessa peça, pode ser responsável por queda acentuada da resistência da madeira.

Nas propriedades mecânicas e elásticas da madeira, também se manifesta o fenômeno da anisotropia (desigualdade entre os diferentes eixos de crescimento da madeira). Porém, neste caso, as grandes influências da anisotropia são, principalmente, determinadas pelas direções paralela ou perpendicular às fibras,

quase não sendo observadas quando se leva em conta os sentidos tangencial, radial e longitudinal da madeira, como no caso da contração e do inchamento.

Já há muitos anos Baumann (1922) demonstrou o efeito do ângulo das fibras sobre a resistência da madeira. A figura 47 apresenta um dos gráficos desenvolvidos pelo autor, mostrando que o ângulo das fibras afeta com mais ênfase a resistência à tração, depois à flexão e, por último, a resistência à compressão.

Para fins práticos, considera-se madeira industrialmente prejudicada aquelas que possuem grã espiralada, cujas fibras dão uma volta completa em menos de 10 metros de comprimento de uma tora.

Madeira com excessiva inclinação das fibras se torcerão por ocasião da sua secagem, e se tornam de difícil trabalhabilidade. Além disto, devido a descontinuidade das fibras ao longo do seu comprimento, têm suas propriedades de resistência diminuídas.

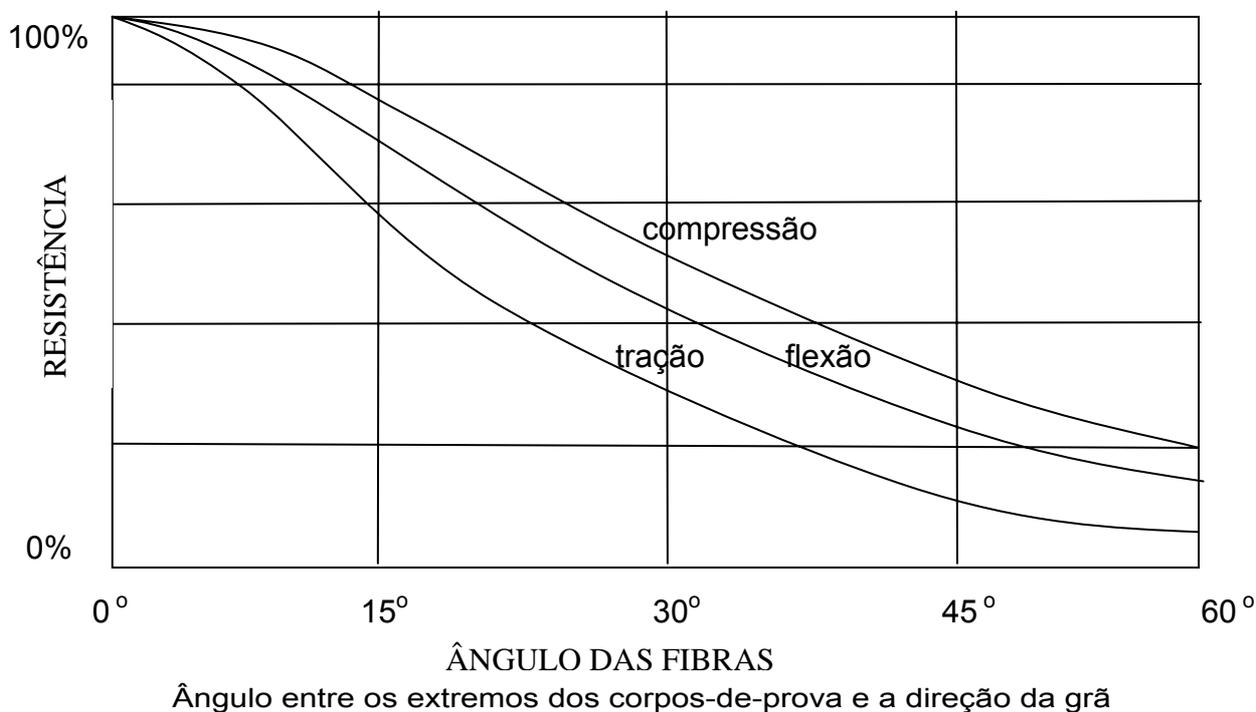


Figura 47. Dependência das propriedades de resistência em função do ângulo da grã, em relação à direção axial do corpo-de-prova.

#### - Posição no tronco

As variações da massa específica da madeira dentro do tronco de uma árvore, em função da altura e da distância a partir da medula, normalmente são assim observadas (coníferas e folhosas com porosidade difusa):

- Quanto mais alta for a altura de obtenção da madeira no fuste de uma árvore, a partir da sua base, menor será a massa específica de sua seção transversal;
- Quanto mais próxima da medula da árvore for obtida a madeira numa mesma altura em relação ao solo, menor será a sua massa específica ( madeira sem cerne).
- Em folhosas com porosidade em anel as afirmações dos itens anteriores não são verdadeiras. Ao contrário, conforme o exposto em 2.1.4.2, à página 21 desta apostila, o maior volume de lenho inicial existente nos anéis da madeira juvenil próximos à medula, e a maior proporção de madeira juvenil com o aumento da altura da árvore, redundam no aumento da massa específica da madeira nas posições consideradas. Este fato é resultante do menor percentual de poros na madeira de lenho inicial à medida que a porção lenho inicial aumenta em volume dentro do anel de crescimento.

#### - Grau de polimerização da celulose

IFJU (1964) ao analisar a influência do comprimento da cadeia de celulose no comportamento mecânico da madeira, demonstrou que a resistência à tração paralela não era apenas mais alta para o lenho tardio, mas que também entre os dois tipos de lenho havia diferença em grau de polimerização da celulose e em teor de umidade: A resistência da madeira com baixo grau de polimerização da celulose foi observada como mais sensível a trocas de umidade, que a com estruturas de cadeias mais longas.

- Porcentagem de lenho tardio e lenho inicial

A influência do percentual das madeiras de lenho inicial e lenho tardio em uma peça de madeira, diz respeito às diferenças existentes em consistência e massa específica dos lenhos individuais que os forma: O lenho inicial, em relação ao lenho tardio, é formado por elementos com grandes diâmetros, de paredes finas e mais curtos, características estas que lhe conferem baixas resistências. Ao contrário o lenho tardio é formado por elementos mais longos, com diâmetros pequenos e paredes espessas e, como consequência, formam madeira relativamente mais densas e de maior resistência.

Em função do exposto acima, é razoável esperar que quanto menor for o percentual de lenho inicial em uma madeira, melhores serão suas propriedades de resistência. Contudo, considerações diferenciadas deverão ser feitas para a madeira de folhosas com porosidade em anel.

- Largura irregular dos anéis de crescimento

A madeira de uma árvore que apresenta irregularidade na largura dos anéis de crescimento terá propriedades desiguais. Como consequência, ao secar a madeira serrada ela se torcerá, além de estar sujeita a se abrir em duas seções em alguma zona de maior fragilidade.

As causas deste problema normalmente são os tratos silviculturais e as condições abruptas de crescimento da árvore (por adubação, alteração drástica do espaçamento por desbaste, etc.).

A grande diferença existente entre a largura dos anéis do lenho juvenil e a largura dos anéis de lenho adulto também afetam a qualidade da madeira. Contudo, a formação do lenho juvenil é uma resposta do espaçamento inicial do povoamento florestal e da madeira desenvolvida a partir da medula na região da copa da árvore,

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

de forma quase homogênea até que ocorra competição entre as árvores, enquanto o lenho adulto só é formado no fuste longe da medula e da copa das árvores, depois de estabelecida certa competição entre indivíduos do povoamento florestal.

A pobre qualidade do lenho juvenil também pode ser verificada no interior da madeira adulta (entre anéis do lenho adulto), particularmente como anéis de crescimento largos com grande percentual de lenho inicial, formados no fuste após o povoamento florestal sofrer desbaste drástico e/ou adubação.

#### - Excentricidade dos anéis de crescimento

O crescimento excêntrico dos anéis, de forma acentuada, é outra causa de variação nas propriedades da madeira. Uma das razões é a alta diferença em consistência do material formado em lados opostos do fuste; outra é a formação de lenho de reação em diferentes posições para o caso das coníferas ou de folhosas.

#### - Defeitos da madeira

A influência de defeitos da madeira é acentuada em madeiras com altos teores de umidade.

A "defeitos da madeira" podemos nos referir a todo tipo de anomalias estruturais, irregularidades, modificação química ou de coloração observadas neste material, que prejudiquem a sua utilização ou reduzam o seu valor comercial.

Um defeito deve sempre ser considerado em relação à utilização final da madeira, pois o que pode ser considerado indesejado em um caso poderá ser almejado em outro. A exemplo disto, pode-se citar a madeira com grã reversa: Ela é de difícil trabalhabilidade, mas poderá ser valorizada no ponto de vista

ornamental, pelos desenhos e variações na reflexão da luz incidente neste material.

Entre os defeitos mais comuns, relacionados às propriedades mecânicas e elásticas da madeira, temos:

a) Nós – se trata da porção basal de um ramo que provoca desvios no tecido lenhoso de sua vizinhança. Quanto a sua aderência na madeira, eles podem ser considerados como:

a.1) Nós vivos - Os nós que correspondem à porção basal de ramos vivos, havendo perfeita continuidade dos tecidos lenhosos entre esta porção com a madeira dos entrenós. Esta íntima ligação lhe confere estabilidade na peça de madeira; e

a.2) Nós mortos - Os nós que correspondem à porção basal de um ramo sem vida, que deixou de participar do desenvolvimento do fuste da árvore. Assim, deixa de existir continuidade da estrutura, ficando preso à madeira apenas pela compressão periférica exercida pelo crescimento diametral do fuste.

A importância de como os nós se apresentam (inclusive, transverso ou repassado), é justificada pelo fato que seus tamanhos, concentrações ou agrupamentos, etc, influem de forma significativa na classificação e no valor comercial da madeira serrada.

Os nós depreciam as peças de madeira, principalmente devido à presença do veio irregular que, no caso de um esforço de compressão paralelo às fibras, fará que a madeira se comporte com instabilidade.

A grã irregular também pode afetar a resistência das peças sujeitas à flexão, além de dificultar a sua trabalhabilidade e causar prejuízo às ferramentas.

b ) Grã irregular ou reversa

Esta grã é típica em madeira de árvores que apresentam fibras orientadas em mais de um sentido. Geralmente trata-se de uma característica genética, própria da espécie, sendo muito comum em espécies tropicais.

Grã irregular também pode ser causada pelo crescimento irregular ou muito rápido da madeira, pela existência de um tecido de cicatrização no fuste, etc.

Este tipo de defeito é responsável pela variação do ângulo das fibras, pela alta dilatação e desenvolvimento de tensões internas da madeira, tendo como consequência baixas propriedades de resistência.

- Tensões internas/ rachaduras microscópicas

As tensões internas existentes no fuste de uma árvore são consideradas muito problemáticas pois, uma vez que este seja cortado, elas são liberadas e normalmente rompem as fibras ao longo dos raios causando rachaduras, empenamentos, etc., e consideráveis prejuízos às propriedades de resistência da madeira.

Além da grã irregular, o crescimento rápido da madeira é responsável pelo desenvolvimento de madeira com baixa massa específica e elevadas tensões internas, ocasionando rachaduras internas neste material, como ilustrado na figura 48, abaixo.

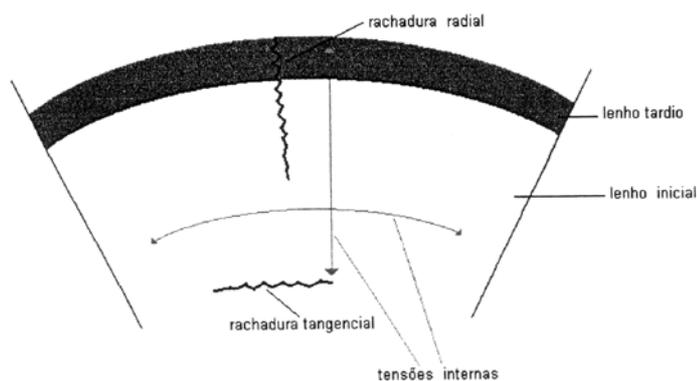


Figura 48. Representação de tensões internas e de rachaduras microscópicas dentro de um anel de crescimento.

- b) Lenho de reação - Árvores com fustes que se desviam da direção normal de crescimento, desenvolvem lenhos especiais para compensarem o esforço que lhes é submetido em decorrência de qualquer ação externa, em intensidade, tempo e sentido constantes.

De forma genérica este tipo particular de lenho é denominado de lenho de reação; isoladamente ele poderá ser denominado como lenho de compressão ou lenho de tração, dependendo da sua posição ao longo do fuste da árvore.

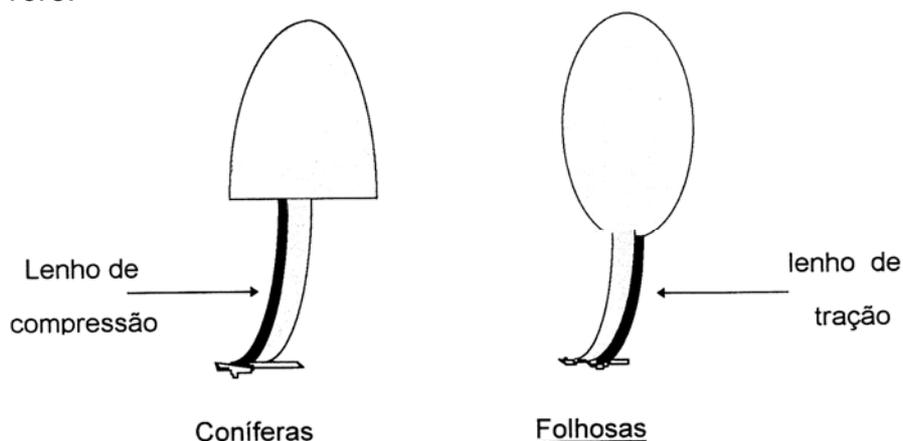


Figura 49. Representação da posição dos lenhos de compressão e de tração no fuste de árvores.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Estes tipos de lenho têm propriedades bem diferentes do lenho normal e afetam consideravelmente as propriedades tecnológicas da madeira.

O **lenho de compressão** é facilmente observado macroscopicamente pelo crescimento excêntrico do fuste, com transição quase indistinta entre o lenho inicial e o lenho tardio, cor mais intensa que o lenho normal e ausência de brilho.

Microscopicamente as células do lenho inicial apresentam paredes mais espessas que a normal e um contorno arredondado, com espaços intercelulares entre elas, presença de rachaduras oblíquas quando observadas em seção longitudinal e estrutura microfibrilar espiralada.

Quimicamente o lenho de compressão tem alto teor de lignina e baixo teor de celulose.

As principais conseqüências da presença de lenho de compressão na madeira são:

- comportamento desigual da madeira;
- madeira quebradiça, suscetível à ocorrência de rachaduras longitudinais irregulares durante a secagem;
- maior resistência à compressão axial e perpendicular às fibras;
- coloração típica, normalmente depreciando o material.

O **lenho de tração**, da mesma forma que o lenho de compressão, normalmente é associado ao crescimento excêntrico do fuste da árvore, causado por ventos dominantes, curvaturas geotrópicas e iluminação desigual que originam copas assimétricas, fazendo com que haja má distribuição de esforços no fuste.

Macroscopicamente ele pode ser identificado por sua coloração distinta, mais clara ou escura que o lenho normal. Microscopicamente ele é caracterizado pela presença de fibras com espessamento nas paredes internas anormais (gelatinosas), que conferem brilho diferenciado. As paredes das células da madeira têm elevado teor de celulose e lignina quase ausente.

O lenho de tração causa sérios problemas durante a secagem da madeira, promovendo o seu colapso e rachaduras longitudinais.

Na fabricação de papel, apesar de se obter maior rendimento de polpa com o lenho de tração, ele oferece maior resistência à polpação e origina produtos de baixa resistência.

Além do desenvolvimento de colapso na madeira maciça e da má qualidade dos produtos de polpa, as principais conseqüências da existência do lenho de tração na madeira são:

- Difícil trabalhabilidade;
- difícil acabamento superficial;
- comportamento desigual da madeira;
- maior resistência à tração; e
- depreciação do material pela coloração.

b) Bolsas de resina - Este efeito ocorre somente em coníferas, porém, em folhosas, pode ocorrer aspectos análogos, denominados bolsas de goma. Trata-se de um espaço localizado dentro de um anel de crescimento contendo resina no estado líquido ou sólido, algumas vezes com casca inclusa.

Bolsas de resina afetam não somente o aspecto da superfície das peças, mas também suas propriedades mecânicas. Além disso o fluxo anormal de resinas origina zonas de lenho translúcido em tábuas de pouca espessura, onde a

resina pode se liquefazer quando são aquecidas, mesmo que a superfície das peças já tenha recebido acabamento superficial como, por exemplo, envernizamento.

c) Fissuras de compressão - Este tipo de defeito constitui sério dano na madeira, pelo fato dele muitas vezes não ser aparente, mas torná-la friável e quebradiça.

A fissura de compressão apresenta-se como uma desorganização do tecido lenhoso, como linhas quebradas, visíveis em peças de madeira serrada, de cor clara e dispostas perpendicularmente à grã na face de corte. Algumas vezes observa-se uma marca de tonalidade mais escura contornando o tecido lesionado, como resultado de um fluxo anormal de goma nesta região.

Esta fissura provoca um calo cicatricial que acaba cobrindo a zona lesionada. Sendo ela muito extensa, há condições de observá-la pelo lado externo do fuste pela superfície rugosa deste ou pela presença de pequenos mamilos.

Este defeito é resultado de traumatismos causados à madeira ainda na árvore em pé, pelo esforço causado pelo seu peso próprio ser superior ao que o fuste poderia suportar, ou por outras razões como excessivo esforço causado pelo vento, peso de neve, queda de árvores vizinhas por ocasião da exploração florestal, entre outros que provoquem curvaturas excessivas sem, contudo, que o fuste se rompa integralmente.

### **Considerações gerais em relação às influências internas da madeira**

As seguintes considerações deverão ser levadas em conta, em relação à representatividade dos ensaios mecânicos a serem realizados com a madeira:

- a) Há grande variação das propriedades mecânicas da madeira, segundo a variação em massa específica do material ensaiado;

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

- b) Não é possível determinar as propriedades mecânicas de uma espécie baseando-se apenas em pedaço de madeira, como um disco ou uma única tora. Para haver representatividade, é necessário que se utilize um número de amostras representativo à população de indivíduos que se pretende avaliar, tomados por um sistema de amostragem cientificamente correto;
- c) Para termos resultados comparáveis aos obtidos por outras avaliações, devemos sempre utilizar corpos-de-prova e técnicas de amostragem e de determinação das propriedades de interesse descritos em alguma norma técnica em uso atual - corpos de prova sem defeitos, velocidade do ensaio, etc.; todos eles são detalhes para que se garanta que os resultados obtidos não tenham seus valores afetados por variáveis que não as de interesse, ou seja, alheias às da própria madeira.

### 8.2.3. Influências Externas da Madeira

a) Temperatura – De forma geral, altas temperaturas ocasionam baixas resistências à madeira, como consequência da dilatação e da movimentação térmica das moléculas de seus constituintes.

Acima de aproximadamente 100 °C, mesmo que de forma acanhada, já começa ocorrer a degradação térmica da madeira.

A figura 50, a seguir, apresenta curvas obtidas pelo relacionamento da temperatura da madeira e sua respectiva resistência à compressão, para algumas espécies florestais.

Kollmann (1940), por meio de uma série de experimentos conduzidos em temperaturas entre 119°C e 200°C (abaixo da faixa de temperatura que teoricamente inicia a degradação térmica), determinou a seguinte equação para estimar a resistência à compressão, em madeira seca em estufa:

$$\sigma_2 = \sigma_1 - n \cdot (t_2 - t_1) \quad (54)$$

onde:

$\sigma_1$  = resistência à compressão, a uma temperatura  $t_1$ ;

$\sigma_2$  = Resistência à compressão, a uma temperatura  $t_2$ , mais elevada que  $t_1$ ;

$n = 4,76 \times r_0$ ; e

$r_0$  = massa específica da madeira a 0% de umidade;

$t_1$  = temperatura inferior considerada; e

$t_2$  = temperatura superior considerada.

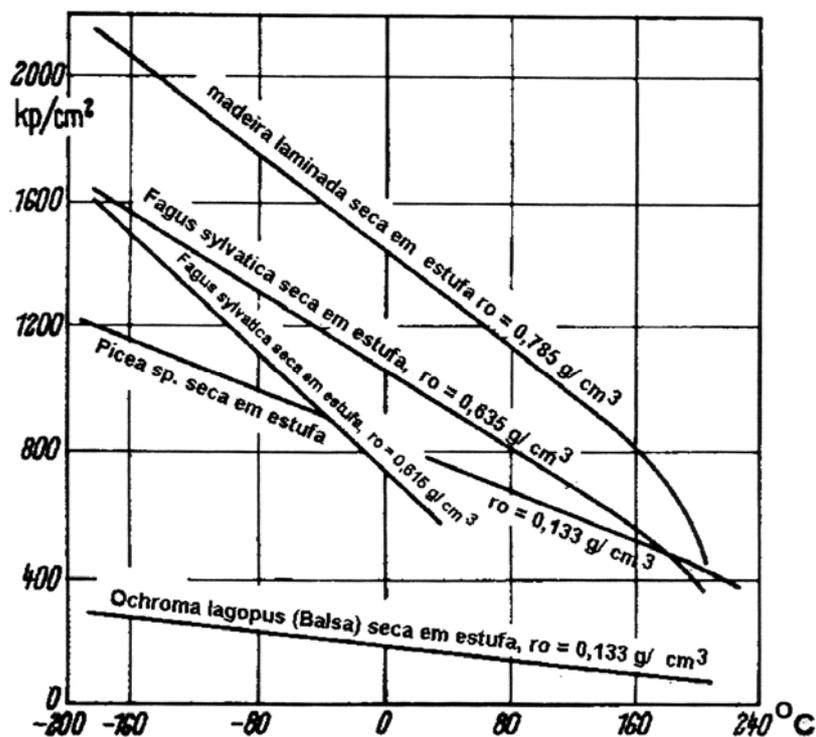


Figura 50. Influência da temperatura sobre a resistência à compressão.

b) Teor de umidade - Sendo o teor de umidade da madeira dependente da temperatura e da umidade relativa do ar em que ela se encontra, ele é considerado uma variável dependente de fatores externos da madeira.

Com exceção da melhor trabalhabilidade e da resistência ao choque em madeira com maior teor de umidade, este material fica mais fraco com o aumento de seu teor de umidade, de 0%U a aproximadamente 28 %U (PSF).

À medida que ocorre entrada de moléculas de água nos espaços submicroscópicos da parede celular, a madeira se torna gradativamente inchada e plasticizada, até atingir o PSF. Como conseqüência, normalmente suas propriedades mecânicas são bem correlacionadas com o teor de umidade.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Acima do PSF a resistência permanece constante, em virtude do acréscimo de umidade a partir deste ponto se referir tão somente ao preenchimento dos espaços vazios existentes na madeira (lumens dos vasos, canais resiníferos, fibras e traqueóides, e espaços intercelulares).

Como exemplo do alto correlacionamento supracitado, pode-se determinar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade entre 8%U e 20%U, pelas seguintes equações:

$$\sigma_{c2} = \sigma_{c1} (32 - U_2 / 32 - U_1) \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (55)$$

$$E_{c2} = E_{c1} (48 - U_2 / 48 - U_1) \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (56)$$

Com a utilização das equações como as representadas acima, pode-se concluir que entre 8% e 20% de teor de umidade, a madeira tem variações em suas propriedades mecânicas nas proporções apresentadas na tabela 16 abaixo:

Tabela 16. PROPORÇÕES DE ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA, POR PERCENTUAL DE ALTERAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE

<b>Propriedades</b>	<b>Alterações aproximadas a cada 1% de variação no teor de umidade (% / %)</b>
Tração longitudinal	3,0
Tração perpendicular	1,5
Dureza longitudinal	4,0
Dureza lateral	2,5
Módulo de elasticidade	2,0

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Embora valores como os apresentados na tabela 16 possam ilustrar o efeito do teor de umidade sobre as propriedades de resistência da madeira, equações, gráficos e tabelas obtidos para espécies e condições em particular, não dispensam a necessidade de execução de novos ensaios, para haver representatividade sobre o material que se pretende avaliar.

### **Considerações gerais em função das influências externas da madeira**

As seguintes considerações devem ser feitas quanto às influências externas que podem afetar os resultados de ensaios, na avaliação das propriedades da madeira e sua utilização:

- a) Só ocorrem alterações das propriedades de resistência da madeira (mecânicas e elásticas) entre 0%U e o PSF. Acima desse intervalo as propriedades de resistência são estáveis;
- b) Não se deve utilizar madeira verde em construções, com teores de umidade acima de 20%, pois ela teria que se desidratar muito até atingir seu equilíbrio higroscópico com o ambiente em que seria colocada e, com isso, desenvolveria defeitos de secagem pronunciados. Além disso, até que esta desidratação ocorresse, suas propriedades de resistência estariam reduzidas e sua suscetibilidade a agentes deterioradores aumentada;
- c) Com a finalidade de se obter valores compatíveis/ comparáveis aos de outras avaliações, os ensaios de laboratório devem ser realizados com corpos-de-prova a teores de umidade padronizados e constantes (0%U; 12%U ou acima do PSF), condição esta que deverá ser sempre relatada;

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

- d) As condições de temperatura e de umidade relativa do ar, na sala onde as máquinas se encontram, devem ser constantes e normatizadas para a finalidade do ensaio (20°C e 65% UR para a obtenção de  $U_{eq}=12\%$ , etc.);
- e) Com o cozimento/ vaporização da madeira se consegue o seu amolecimento artificial (plasticização), o que facilita as práticas industriais de laminação e moldagem de peças de madeira maciça.

## 9. ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

### 9.1. FLEXÃO ESTÁTICA

#### 9.1.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio

Basicamente, o ensaio para a determinação da resistência à flexão estática da madeira consiste na aplicação de uma carga a um corpo-de-prova que repousa sobre dois apoios, na metade de seu comprimento, para causar tensões e deformações mensuráveis até sua ruptura, conforme esquema apresentado na figura 51, a seguir:

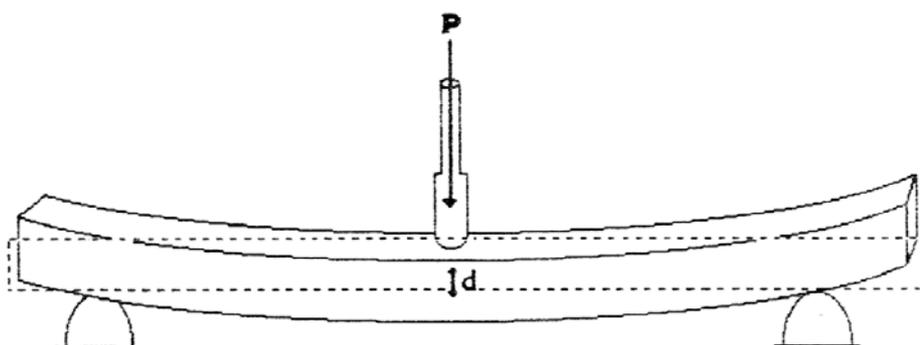


Figura 51. Esquema do ensaio de flexão estática ( $P$ = carga;  $d$ = deformação).

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Este ensaio deve ser realizado atendendo à forma, dimensões do corpo-de-prova e direção da carga em relação ao sentido anatômico da madeira, determinadas por norma técnica específica, como apresentadas na fig. 52 a seguir:

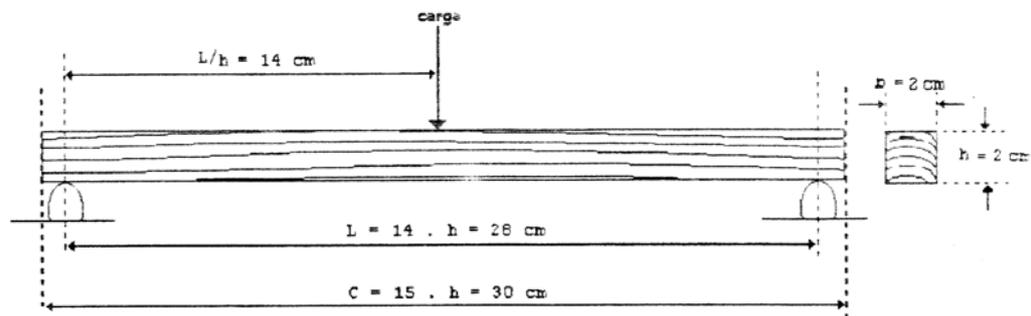


Figura 52. Forma, dimensões do corpo-de-prova e direção da carga utilizadas no ensaio de flexão estática, segundo a Norma COPANT 30:1-006.

Segundo a Norma COPANT 30:1-006, as medidas do corpo-de-prova são de 30 cm x 2 cm x 2 cm, embora também se utilizem corpos-de-prova 7,5 cm x 5 cm x 5 cm, adaptados para ensaios com madeira contendo grã irregular e/ou com anéis de crescimento largos.

A distribuição das tensões dentro de um corpo-de-prova durante a realização do ensaio de flexão estática com a aplicação de uma carga central, é demonstrada graficamente pela fig.53 abaixo:

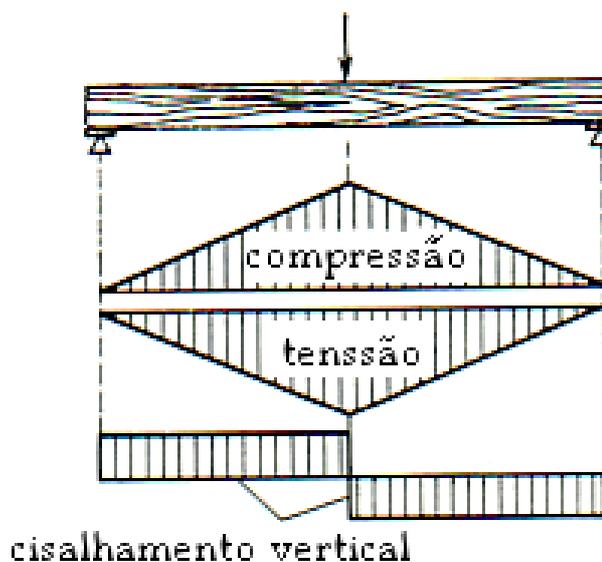


Figura 53. Distribuição das tensões dentro do corpo-de-prova durante o ensaio de flexão estática.

Além das tensões desenvolvidas em situações de ensaio ou de uso da madeira, com a carga aplicada em um único ponto e na posição central dos pontos de apoio que sustentam a peça de madeira, a distribuição das tensões em situações normais de uso da madeira normalmente é diferente.

A figura 54, a seguir, apresenta duas outras situações, onde cargas e tensões são distribuídas simetricamente.

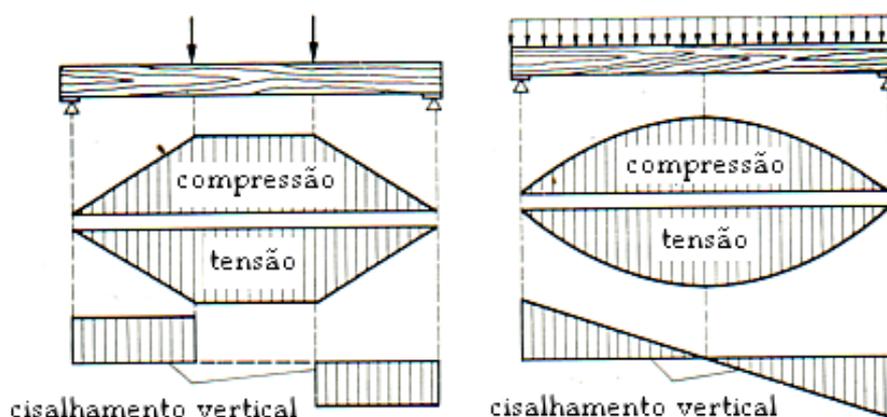


Figura 54. Distribuição das tensões de compressão, tração e cisalhamento em peças submetidas à flexão estática, com cargas simétricas.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Como apresentado graficamente nas figuras 53 e 54, o ensaio de flexão estática inclui, principalmente, as tensões de compressão e de tração. As tensões de cisalhamento atuam em função da relação  $L/h$  do corpo-de-prova, como mostrado graficamente na figura 51, a seguir:

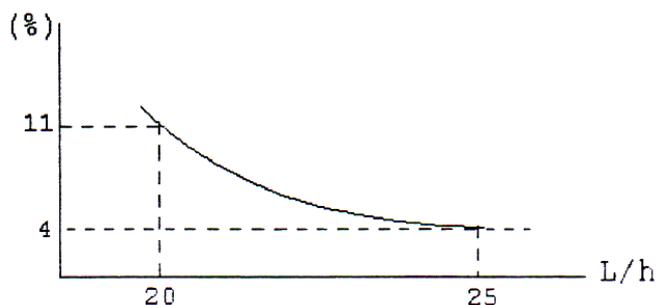


Figura 55: Percentual de deformação causada pelas tensões de cisalhamento no teste de flexão estática.

Acima da relação comprimento / altura ( $L/h$ ) igual a 20, não há mais influência significativa sobre a resistência à flexão, como demonstrado por Baumann (1920), conforme demonstrado graficamente pela figura 45, às páginas 98 e 99.

A distribuição das tensões dentro do corpo-de-prova durante a realização do ensaio à flexão estática é variável, alterando-se à medida que ocorrem deformações, com o avanço do êmbolo da máquina de ensaios. A figura 56 apresenta estas situações em três momentos diferentes da execução de um ensaio

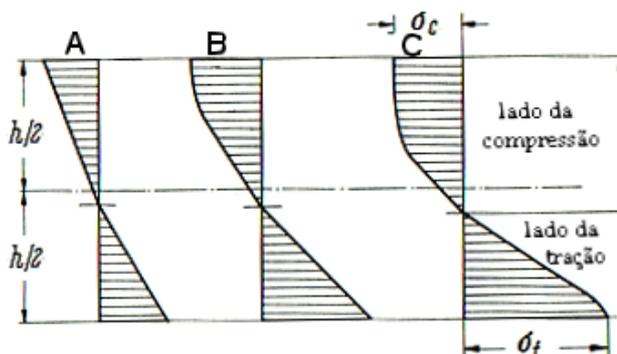


Figura 56. Distribuição das tensões durante o ensaio de flexão estática (as situações A, B e C são descritas a seguir).

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Conforme a descrição gráfica apresentada na figura 56, as tensões durante o ensaio de flexão são assim observadas:

- a) A zona neutra começa a ser deslocada para o lado da tração. Nesta fase as tensões de compressão e de tração ainda são iguais (áreas chuleadas iguais);
- b) A tensão do lado da compressão para de crescer (zona neutra estável), em decorrência das deformações plásticas que começaram a ocorrer neste lado. Enquanto isto o lado da tração continua a resistir sem que ocorra deformação plástica, em até aproximadamente o dobro da resistência alcançada pela compressão ( $\sigma_t = 1,7$  a  $2,0 \times \sigma_c$ );
- c) O esforço à tração progride, até que se iniciem as deformações plásticas e em seguida se atinja a resistência máxima da madeira a este tipo de esforço, ocorrendo então a sua ruptura ( $\sigma_t \text{ atual} = \sigma_c \text{ máxima}$ );

A ruptura típica provocada no corpo-de-prova apresenta-se com rompimento no lado oposto ao da aplicação da carga (lado sujeito à tração), normalmente com uma rachadura longa acompanhando a linha neutra; o lado em que a carga é aplicada (sujeito a compressão) só apresenta deformação plástica (amassamento). Ambas as situações são representadas na figura 57, a seguir.

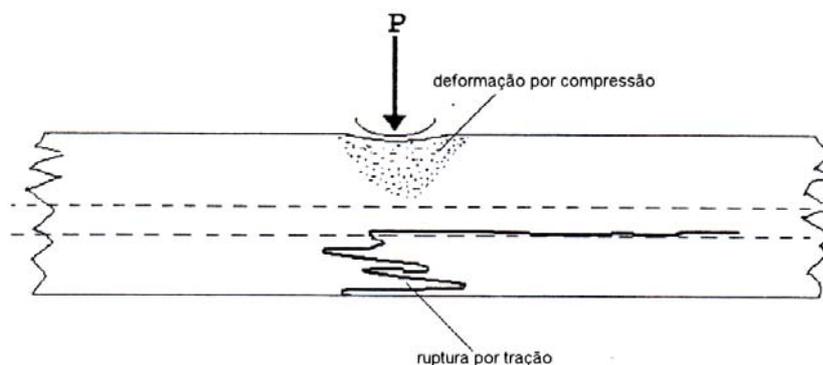


Figura 57. Representação da ruptura e da deformação plástica em um corpo-de-prova submetida ao ensaio de flexão estática.

Segundo Navier, a resistência máxima à flexão ( $\sigma_f$  max.) é calculada como:

$$\sigma_f \text{ max} = M \text{ max} / W \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (57)$$

onde:

M max = momento máximo no meio do corpo-de-prova;

M max = P max . L / 4 (kg/ cm);

W = momento de resistência da seção transversal do corpo-de-prova;

P max = carga máxima aplicada, no momento da ruptura;

L = distância entre apoios; e

b, h = largura e altura (espessura) do corpo-de-prova, respectivamente.

Conseqüentemente:

$$\sigma_f \text{ max} = 3/2 . P \text{ max} . L / b.h \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (58)$$

Como o ensaio de flexão estática também é utilizado para a determinação do módulo de elasticidade, além da avaliação da carga máxima, usada para o cálculo da resistência máxima do corpo-de-prova testado, é necessário que se determinem a carga e a deformação correspondente no limite elástico (ver item 8.1, pag. 90).

A figura 58 apresenta, esquematicamente, uma das formas utilizadas para a determinação da carga e da deformação correspondente.

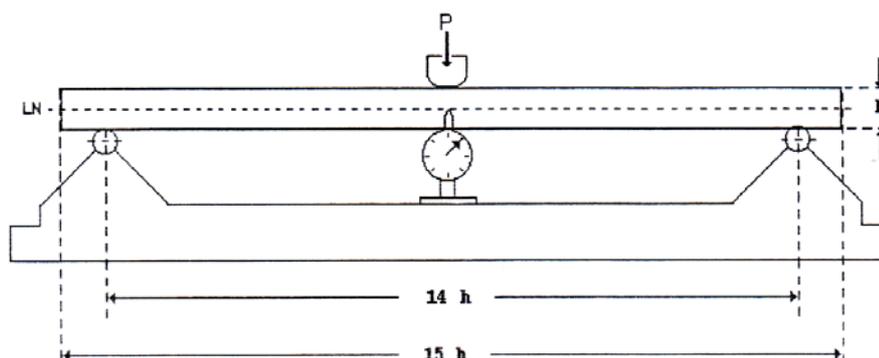


Figura 58. Posição de tomada dos dados de deformação durante o ensaio de flexão estática.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Como exemplo, a tabela 17 apresenta dados registrados durante um ensaio de flexão estática, bem como a diferença da deformação avaliada a cada intervalo de carga atingida, em intervalos iguais, necessária para a determinação gráfica do **limite elástico ou limite proporcional (LP)**.

Os valores observados durante os ensaios mecânicos deverão ser devidamente registrados, com informações adicionais no sentido de esclarecer qualquer dúvida sobre as variações nos resultados. Para tanto, sugere-se a utilização do formulário apresentado a seguir, com possíveis modificações que possibilitem dar mais subsídios à interpretação dos dados levantados.

O limite elástico da madeira, também denominado de limite de proporcionalidade ou limite proporcional (PL), é observado no momento em que deixa de existir proporcionalidade entre a carga aplicada sobre o corpo-de-prova e a deformação resultante – graficamente deixa de existir linearidade na relação carga/deformação. A sua avaliação é efetuada, portanto, pelo acompanhamento e registro destas variáveis no decorrer do ensaio, para posterior relacionamento.

Com base na diferença das deformações por intervalos das cargas aplicadas, determina-se graficamente o limite de proporcionalidade (LP). A figura 59, a seguir, demonstra a forma de determinação gráfica do LP com a utilização dos dados da tabela 15.

TABELA 17. DADOS REGISTRADOS DURANTE UM ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA.

<b>Carga P (kg)</b>	<b>Deformação (cm)</b>	<b>Diferença de deformação (mm)</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
2	0	---	<
5	0,015	0,15	< início do ensaio
10	0,044	0,29	<
15	0,081	0,37	
20	0,113	0,32	
25	0,146	0,33	
30	0,180	0,34	
35	0,214	0,34	< limite de elasticidade
40	0,255	0,41	
45	0,295	0,40	
50	0,340	0,45	
55	0,386	0,46	
60	0,458	0,72	< carga máxima - ruptura
65	0,538	---	- ruptura padrão -

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

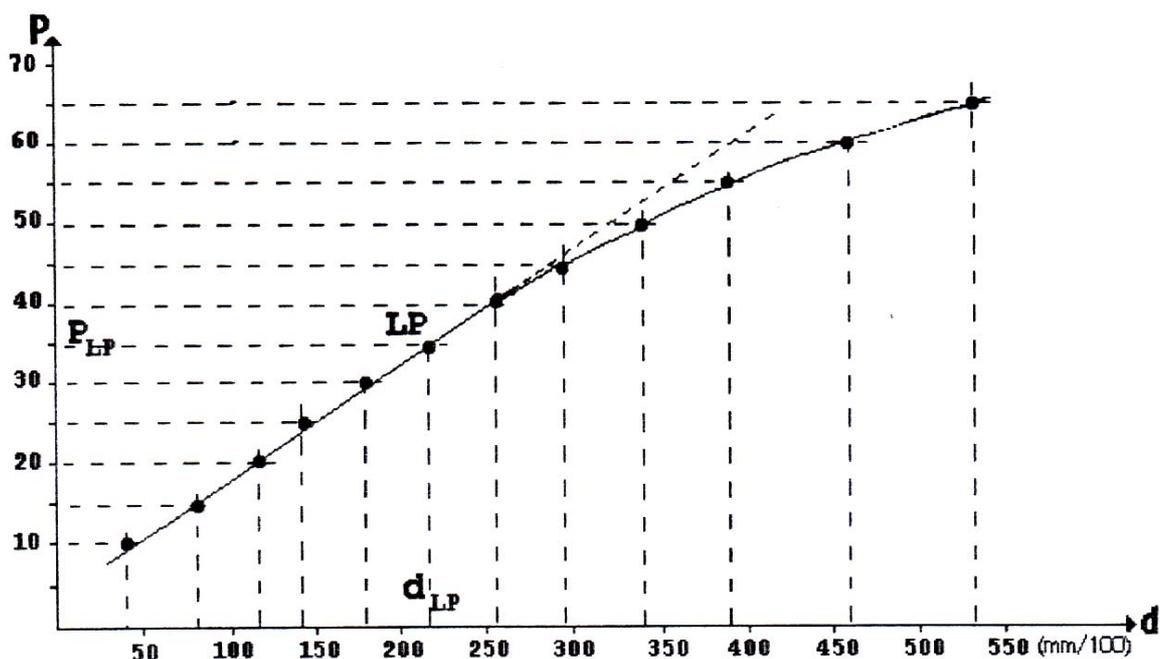


Figura 59. Exemplo de determinação gráfica do limite proporcional (LP) entre as cargas e as deformações correspondentes, registradas durante o ensaio de laboratório.

Normalmente, ao se tomar o diagrama carga-deformação para a determinação do módulo de elasticidade, assume-se que toda deformação resultante da carga aplicada no ensaio seja elástica. No entanto esta não é uma realidade, pois parte da deformação ocorrida tem característica plástica. Desta forma, para um cálculo correto seria necessário que o que se referisse à deformação plástica fosse deduzida da deformação total.

O ponto que indica o fim da proporcionalidade, denominado "limite de elasticidade" ou "limite de proporcionalidade" (**LP**) entre a carga (**P**) e a deformação correspondente (**d**), é determinado pelo ponto de tangência na continuidade de uma linha traçada sobre a parte linear do gráfico com o início da parte curva, onde deixa de ter linearidade.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Com a identificação deste ponto, determina-se então as variáveis carga no limite proporcional ( $P_{LP}$ ) e a deformação no limite proporcional ( $d_{LP}$ ), ambas necessárias para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E$ ), bem como para o cálculo da tensão no limite proporcional.

A tensão no limite proporcional ( $\sigma_{LP}$ ) para a flexão estática é calculada com a utilização da carga relacionada a este ponto, segundo a seguinte fórmula:

$$\sigma_{fLP} = 3/2 \cdot P_{LP} \cdot L / b \cdot h \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (59)$$

No cálculo do módulo de elasticidade à flexão estática ( $E_f$ ), da mesma forma, empregam-se os valores da carga aplicada e da deformação **relacionadas ao LP**, pela fórmula abaixo:

$$E_f = 1/4 \cdot P_{LP} \cdot L / d_{LP} \cdot b \cdot h^3 \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (60)$$

onde:

$P_{LP}$  = carga em quilogramas, correspondente ao limite proporcional; e

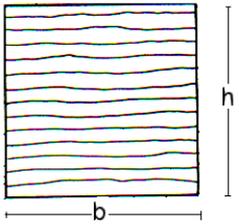
$d_{LP}$  = deformação do corpo-de-prova em centímetros, observada quando o limite proporcional é atingido.

Para a determinação correta da resistência, ou da tensão à flexão estática e do módulo de elasticidade, recomendam-se os seguintes cuidados:

- a) Medir a distância entre apoios, a largura e a espessura do corpo-de-prova;
- b) Efetuar a leitura da carga aplicada normalmente a cada 5 kg (na máquina de ensaios) e da deformação do corpo-de-prova correspondente (no deflectômetro). Entretanto, se a resistência máxima esperada do corpo-de-prova for alta, o intervalo de cargas aplicadas a ser utilizado poderá ser maior, reduzindo o número de pontos de medições, mas este número ainda deverá ser suficiente para descrever a relação carga/ deformação adequadamente, com um número de pontos de intercessão entre estas variáveis que possibilitem definir o LP com precisão;

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

- c) Registrar a carga máxima, no momento da ruptura, e examinar e anotar qualquer irregularidade na forma de ruptura;
- d) Calcular a resistência máxima ( $\sigma_{\max}$ ) segundo a fórmula 58;
- e) Confeccionar o gráfico carga-deformação com os valores obtidos no passo b, acima referido;
- f) Determinar o limite de proporcionalidade, identificado pelo ponto tangente da linha traçada sobre a parte linear do gráfico e no início da sua parte curva;
- g) No gráfico, determinar a carga ( $P_{LP}$ ) e a deformação( $d_{LP}$ ) definidos pelo limite de proporcionalidade;
- h) Calcular o módulo de elasticidade (E) com os valores obtidos com a execução do passo g, empregando a fórmula 60.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UFPR CENTRO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA <b>Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal</b>				<b>FLEXÃO ESTÁTICA</b>		Responsável:		
Clima da sala -		Temperatura:		°C;		Umidade relativa: %		
<b>Máquina de ensaio:</b>								
<b>Espécie:</b>								
Anel de crescimento - largura do anel:				mm				
Porcentagem de lenho tardio:				%				
Massa específica <b>ru</b> :				g/ cm <sup>3</sup>				
Teor de umidade no momento do ensaio:				%				
Porcentagem de alburno:				%				
Inclinação das fibras:				°				
Defeitos:								
Kg	d	Kg	d		Comprimento:		cm	
					Vão:		cm	
					b (largura):		cm	
					h (altura):		cm	
					Carga máx.:		kg	
					Carga no LP:		kg	
					Deformação no LP:		cm	
					Peso ensaio:	g	$\sigma_{f \max.} (u)$ :	kg/ cm <sup>2</sup>
					Peso 0%:	g	$\sigma_{f LP.} (u)$ :	kg/ cm <sup>2</sup>
					U% =		ME:	kg/ cm <sup>2</sup>
				$\sigma_{f \max.} (12) = \sigma_{\max.} (u)^{(0,4 + 0,04 \times u)}$ , caso u esteja entre 8 e 18% $\sigma_{f \max.} (12) =$ <b>kg/ cm<sup>2</sup></b>				
				Desenho do tipo de ruptura:				

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

### **Exemplos de cálculo:**

Utilizando-se a fórmula 58, calcula-se a resistência máxima à flexão como:

$$\sigma_{f \max} = 3/2 \times 65 \times 28 / 2 \times 2^2 = 341 \text{ kg/ cm}^2$$

Utilizando-se os dados da tabela 15 e a fórmula 59, calcula-se a tensão no limite proporcional  $\sigma_{LP}$  como:

$$\sigma_{f LP} = 3/2 \times 35 \times 28 / 2 \times 2^2 = 184 \text{ kg/ cm}^2$$

Utilizando-se os valores de carga e de deformação correspondentes ao limite proporcional, da tabela 15 ou do gráfico da figura 55, e a fórmula 60, temos

$$E_f = 1/4 \times 35 \times 28^3 / 0,214 \times 2 \times 2^3 = 56.098 \text{ kg/ cm}^2$$

## 9.2. FLEXÃO DINÂMICA

O ensaio de flexão dinâmica determina a capacidade da madeira resistir ao choque. A resistência ao choque de um corpo sólido, por sua vez, depende diretamente de sua habilidade em absorver energia e dissipá-la por meio de deformações.

O comportamento da madeira contra a força de impacto, que age por apenas uma pequena fração de tempo, por exemplo por alguns micro-segundos, é denominada "**resistência ao choque**".

A resistência da madeira ao choque tem grande importância na vida prática, porque ela se rompe com maior frequência sob a influência do impacto que por sobrecarga na situação estática. A sua resistência ao choque tem importância na

vida prática, especialmente quando a utilizamos como cabos de ferramentas, mastros, na construção de escadas, carrocerias, aeronaves, artigos esportivos, etc.

### 9.2.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio

Existe uma grande variação nas opiniões sobre o método mais adequado para a determinação dessa propriedade da madeira. Entre eles, os mais usuais são os descritos pelas normas DIN, AFNOR-IPT e ASTM, apresentados nos itens subseqüentes.

#### 9.2.1.1. Testes de flexão dinâmica segundo as Normas DIN e AFNOR-IPT

Segundo as normas supracitadas, os corpos-de-prova devem ser confeccionados para que o teste seja efetuado dentro de uma relação entre o comprimento (L) e a altura (h) predeterminada, ou seja, de  $L/h = 12$ . Para tanto, estas normas determinam que os corpos-de-prova devem possuir as dimensões de 2 x 2 x 30 cm, e o vão da máquina de ensaio para a execução do teste, de 24 cm.

A relação L/h especificada se justifica pela alta relação existente entre as dimensões do corpo-de-prova com o coeficiente de resiliência "a" e por alcançar o menor valor de "a" com esta relação. A figura 60 ilustra graficamente a influência da relação L/h sobre o coeficiente de resiliência da madeira.

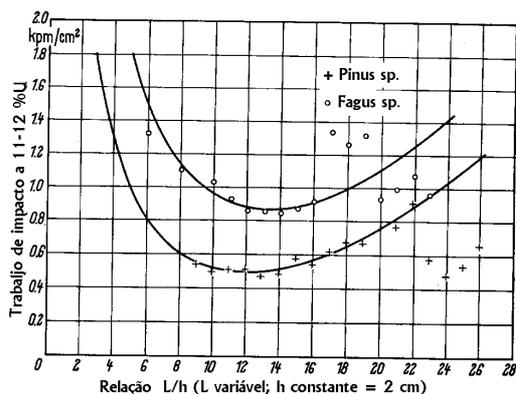


Figura 60. Influência da relação L/h sobre o coeficiente de resiliência da madeira

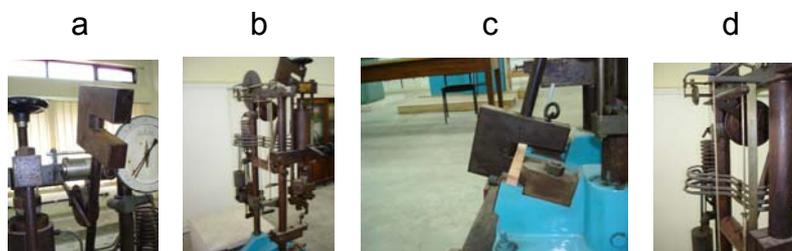
A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

### Execução do ensaio:

A figura 61 a seguir ilustra o tipo de equipamento empregado para avaliar o coeficiente de resiliência da madeira à flexão dinâmica, pelas Normas DIN e AFNOR-IPT.



Figura 61. Equipamento adotado para a avaliação da resistência à flexão dinâmica, pelas normas DIN e AFNOR-IPT



A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Para a preparação da máquina de ensaio, o martelo deve estar suspenso e devidamente preso pela trava do equipamento (a; b). Em seguida o cursor existente junto à escala graduada deve ser baixado (d) até a posição da escala coincidente à marca zero (0 kgm) para, no decorrer do ensaio, ele ser levado pelo martelo durante sua trajetória ascendente e registrar o valor do trabalho (W), utilizado para romper o corpo-de-prova .

Posteriormente o corpo-de-prova deve ser colocado em repouso sobre os dois apoios para esta finalidade, encostados nos cilíndricos de 15 mm de raio, de forma a ser atingido pelo martelo da máquina exatamente na metade de seu comprimento (vão de 24 cm), e posicionado corretamente para que o impacto ocorra tangencialmente aos anéis de crescimento.

Uma vez que o ensaio tenha sido preparado, o martelo (a) deve ser liberado para ocorrer o impacto (c) com o corpo-de-prova.

No decorrer do ensaio, depois de ocorrida a ruptura do corpo-de-prova, a altura atingida pelo martelo (d) é inversamente proporcional ao trabalho absorvido (W) para romper o corpo-de-prova.

Com o valor da leitura, efetuada na escala graduada em kgm, calcula-se o **coeficiente de resiliência (a)** para fins práticos, segundo a Norma DIN, pela fórmula:

$$a = W / b.h \quad ( \text{kgm} / \text{cm}^2 ) \quad \textcircled{61}$$

onde:

a : coeficiente de resiliência;

W: trabalho absorvido para romper o corpo-de-prova;

b e h: arestas da seção transversal do corpo-de-prova, referentes a largura e altura, respectivamente.

No entanto, pela Norma AFNOR calcula-se este coeficiente pela fórmula apresentada a seguir:

$$K = W/ b \cdot h^{10/16} \quad (\text{kgm/ cm}^2) \quad \textcircled{62}$$

Entre os dois coeficientes calculados por estas normas distintas, existe uma relação de  $a = 1,59K$ , a qual pode ser utilizada para fins práticos na transformação de "a" para "K", ou vice-versa.

De forma geral, quanto maior o valor **a** ou de **K**, maior é a resistência da madeira ao choque.

**Cota dinâmica** é outro valor calculado segundo a Norma AFNOR, com a finalidade de comparar diferentes madeiras, mas com correção para que a influência causada pela variação em massa específica entre espécies seja eliminada. Para este propósito, a seguinte fórmula é empregada:

$$CD = K/ r_o^2 \quad \textcircled{63}$$

Como resultado do ensaio, além dos valores avaliados e calculados, também se observam os tipos de rompimentos sofridos pelos corpos-de-prova como um indicador da qualidade da madeira (maior ou menor superfície de ruptura). Assim, mesmo que de forma subjetiva, a madeira poderá ser classificada quanto à resistência ao choque, como representado na figura 62 a seguir:

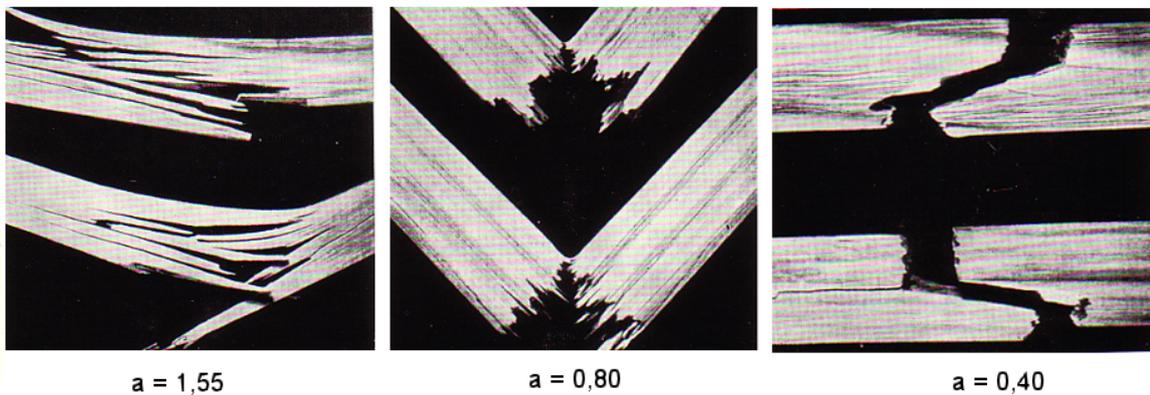


Figura 62. Relacionamento do tipo de ruptura ocorrida no ensaio de flexão dinâmica com a qualidade da madeira: da esquerda para a direita, madeiras com alta, media e baixa resistência ao choque.

### Fatores que Influenciam a Resistência ao Choque

- Formas e dimensões das peças:

Neste tipo de ensaio a maior parte dos corpos-de-prova são confeccionados com seção transversal quadrada.

Pelas normas DIN e AFNOR-IPT, o volume de madeira entre os dois suportes da máquina de ensaio é de  $96 \text{ cm}^3$ . No entanto outros testes usam corpos-de-prova com seções transversais e comprimentos diferentes, causando diferenças em volume de madeira submetida ao teste e, conseqüentemente, nas resistências obtidas.

Baseando-se em considerações gerais, Ylinen (1944) demonstrou que a energia absorvida deveria ser proporcional ao volume de madeira existente no vão entre os apoios da máquina de ensaios.

- Direção do impacto

Geralmente a resistência à flexão dinâmica de madeira de coníferas é mais alta no sentido radial que no sentido tangencial.

- Ângulo das fibras:

A inclinação da grã reduz a resistência ao choque de forma pronunciada: Um ângulo de apenas 5° causa um decréscimo na resistência de 10%, e um ângulo de 10° um decréscimo de 50% nessa resistência da madeira.

- Densidade:

Em testes onde se mede a altura máxima de queda de um martelo para romper o corpo-de-prova, observa-se que a resistência ao choque é proporcional à massa específica aparente da madeira.

No ano de 1932 MONNIN já havia determinado o coeficiente **K** da resistência ao choque e estabeleceu a relação  $K/ r_{15}^2$  como adequada para qualificar as propriedades mecânicas da madeira. Esta relação foi denominada "**fator dinâmico de qualidade**".

- Teor de umidade:

Nos capítulos anteriores sempre se comentou que a resistência estática da madeira aumenta com o decréscimo em seu teor de umidade, entre 0%U e o PSF. Contudo isto **não se aplica**

**para a resistência ao choque**, pois madeira seca não é tão flexível quanto a madeira verde.

Várias pesquisas efetuadas para avaliar a influência do teor de umidade sobre a resistência da madeira ao choque, demonstraram que esta propriedade não é influenciada de forma significativa no intervalo de 10 a 20%U, e que um aumento no teor de umidade resulta apenas em um aumento da flexão da madeira.

- Temperatura:

O efeito da temperatura é maior com madeiras mais pesadas que com madeiras mais leves.

Pesquisas realizadas com o propósito de avaliar o efeito da temperatura sobre a resistência ao choque da madeira, tornaram evidente que a influência se dá de forma diferente entre espécies de madeira, ou entre as madeiras de cerne e de alburno de uma mesma espécie. Além disto, os resultados de pesquisas efetuadas entre -40°C e +70°C, mostraram que entre -20°C e +20°C a influência da temperatura é praticamente negligenciável sobre esta propriedade.

- Propriedades Anatômicas, Constituintes Químicos e Deterioração

A largura dos anéis de crescimento permite algumas conclusões sobre a resistência à flexão estática. No entanto o mesmo não é possível para a resistência à flexão dinâmica, devido ao tipo de esforço exigido no ensaio e a existência de inúmeras variações no material lenhoso.

Aparentemente a principal variável que faz com que a madeira se torne fraca ou forte à resistência ao choque é a estrutura da madeira, ou seja:

- Como para o caso da resistência à tração, a resistência ao choque é maior quanto menor for o ângulo das microfibrilas, em relação ao sentido longitudinal das fibras;
- A condição da lamela média, que cimenta uma fibra à outra é importante, pois consiste principalmente de lignina, um material mais fraco que a celulose;
- A deterioração por agentes biológicos, mesmo que em estágio incipiente, reduz a resistência ao choque de forma marcante.



### 9.3. COMPRESSÃO AXIAL OU PARALELA ÀS FIBRAS

#### 9.3.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio

Como o próprio nome do ensaio sugere, a compressão paralela às fibras ou compressão axial é avaliada com a aplicação de uma carga que efetua pressão na seção transversal axial do corpo-de-prova, ou no sentido paralelo das fibras da madeira, com velocidade controlada, até a sua ruptura.

Da mesma forma que nos ensaios para a flexão estática, na avaliação das propriedades à compressão axial, é usual a determinação do limite de elasticidade para os cálculos do módulo de elasticidade e da resistência no limite de elasticidade.

A figura 63, abaixo, ilustra de forma esquemática o ensaio de compressão axial de um corpo-de-prova.

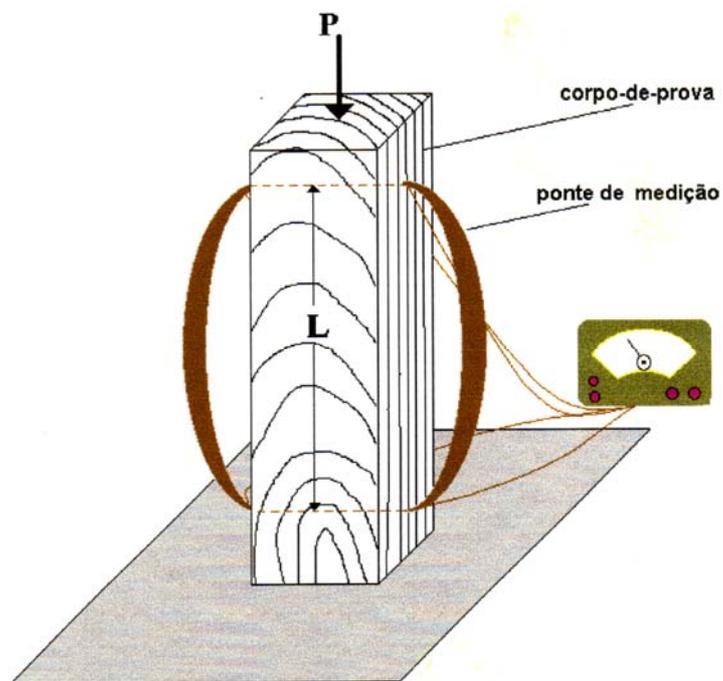


Figura 63. Esquema do ensaio de compressão axial (corpo-de-prova, ponte e registrador de deformações).

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Para este ensaio, as dimensões do corpo-de-prova é motivo de controvérsia: Enquanto nos Estados Unidos e a COPANT 30:1-008 se adotam corpos-de-prova com dimensões de seção transversal de 5 cm x 5 cm; na Europa as medidas em vigor são de 2 cm x 2cm. Por outro lado comprovou-se que nesse tipo de ensaio a seção transversal do corpo-de-prova não causa diferença significativa nos resultados.

A tabela 18 apresenta alguns valores obtidos em ensaio de compressão axial, com corpos-de-prova confeccionados com diferentes seções transversais.

TABELA 18. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL MÉDIA, OBTIDA EM VÁRIOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS-DE-PROVA COM DIFERENTES SEÇÕES TRANSVERSAIS.

ESPÉCIE	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (kg/ cm <sup>2</sup> ) E DIMENSÕES DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS (cm)		
	2,0 x 2,0	2,5 x 2,5	5,0 x 5,0
Pinus spp. a 12%U	338	330	335
Terminalia spp. (U% não especificado)	579	572	547

Logicamente, existem vantagens a serem consideradas na escolha das seções transversais de corpos-de-prova a serem testados, a saber:

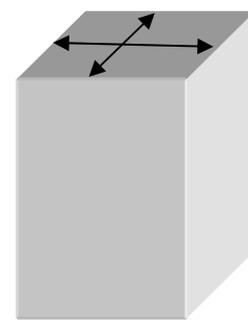
- **Vantagem do uso de seção transversal com 5cm x 5 cm:**
  - Dimensões mais apropriadas para madeiras com anéis de crescimento largos e/ ou irregulares.

- **Vantagens do uso de seções transversais com seções transversais de 2cm x 2cm ou 2,5cm x 2,5cm:**

- menor quantidade de madeira é necessária;
- execução do ensaio com maior rapidez;
- carga a ser aplicada relativamente menor;
- máquinas de ensaio menos robustas e de menores custos; e
- alta precisão.

As dimensões do corpo-de-prova apresentam as seguintes influências sobre a resistência à compressão axial da madeira:

- a. Quanto maior for a seção transversal do corpo-de-prova, maior será o impedimento da expansão transversal da madeira (dilatação) durante o ensaio, resultando numa resistência à compressão axial mais alta;
- b. Quanto maior o comprimento do corpo-de-prova, maior será a tendência dele quebrar, rachar e flexionar por ocasião do ensaio, apresentando, em consequência, menor resistência aparente à compressão axial.



Uma relação  $L/a \simeq 4$  (comprimento/ aresta) é considerada boa e recomendada.

A exemplo da relação acima, temos os corpos-de-prova descritos pela Norma COPANT com dimensões de 5cm x 5cm x 20cm utilizados no Laboratório de ensaios da UFPR.

A ruptura neste ensaio normalmente ocorre em um plano mais ou menos inclinado dentro da madeira. O tipo de ruptura mais freqüente é representado pela figura 64 onde, para fins ilustrativos, a deformação típica foi provocada de forma exagerada para melhor visualização.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

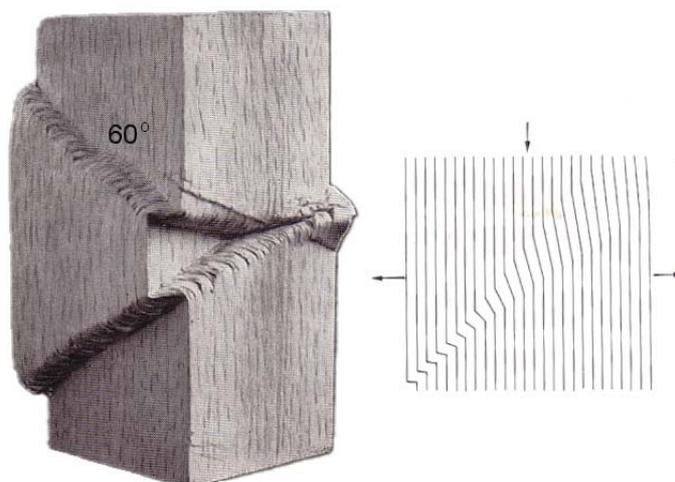


Figura 64. Ruptura típica apresentada em corpos-de-prova testados para avaliar a compressão axial, e representação gráfica do deslizamento das fibras por efeito da deformação.

Na face radial (sentido tangencial), a madeira é mais fraca que na face tangencial (sentido radial). Como consequência ocorre o deslizamento das fibras no sentido tangencial, com o avanço da deformação em um ângulo, de aproximadamente  $60^\circ$  em relação à direção das fibras da madeira.

Na figura 65, abaixo, são representadas possíveis formas de ruptura que poderão acontecer na madeira durante o ensaio de compressão axial, de acordo com a Norma ASTM, recomendada para esta finalidade.

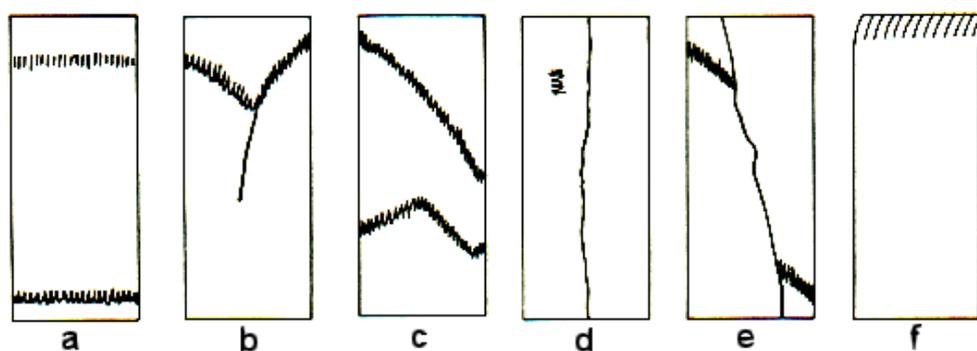


Figura 65. Tipos de rupturas que poderão ocorrer com a realização do ensaio de compressão axial: a) amassamento; b) rachadura lateral; c) cisalhamento; d) rachadura longitudinal; e) amassamento e cisalhamento paralelo à grã e; f) deslizamento na forma de vassoura.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

### 9.3.2. Cálculo do Módulo de Elasticidade e da Resistência Máxima à Compressão Axial

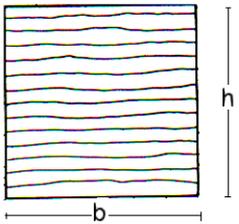
Para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E_{c//}$ ) à compressão axial, utilizam-se os valores de carga ( $P$ ) e deformação ( $d$ ) no limite proporcional, definidos graficamente pelo LP determinado no ponto tangente onde finda a parte linear dada pela deformação proporcional à carga aplicada, em kg e cm, respectivamente.

Outra opção em relação aos valores determinados graficamente é a determinação de  $P_{LP}$  e  $d_{LP}$  por interpretação dos dados na tabela carga-deformação, até quando ocorre proporcionalidade entre **P** e **d**;

Para a determinação da resistência à compressão axial no limite de elasticidade também se utiliza a carga no LP ( $P_{LP}$ ), determinada graficamente pelo LP ou por interpretação tabelar, enquanto a resistência máxima a essa propriedade da madeira é determinada com a carga verificada onde ocorreu a ruptura do corpo-de-prova submetido ao esforço.

Para o cálculo da resistência no limite de elasticidade os valores de carga e de deformação no limite proporcional, são então empregados na fórmula 64, apresentada a seguir.

Para o registro dos dados levantados durante o ensaio mecânico, sugere-se a utilização do seguinte formulário:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UFPR CENTRO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA <b>Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal</b>				<b>COMPRESSÃO AXIAL</b>		Responsável:	
<b>Clima da sala -</b>		Temperatura:		°C;		Umidade relativa: %	
<b>Máquina de ensaio:</b>							
<b>Espécie:</b>							
Anel de crescimento - largura do anel:				mm			
Porcentagem de lenho tardio:				%			
Massa específica ru:				g/ cm <sup>3</sup>			
Teor de umidade no momento do ensaio:				%			
Porcentagem de alburno:				%			
Inclinação das fibras:				°			
<b>Defeitos:</b>							
Kg	d	Kg	d		Comprimento:		cm
					h (altura - rad.):		cm
					b (largura - tang.):		cm
					L (dist. Entre apoios):		cm
					E:		kg/ cm <sup>2</sup>
					Carga Max.:		kg
					Carga no LP:		kg
					Peso ensaio:		g
					Deformação no L.P.:		cm
					Peso 0%:		g
				U =		%	
				$\sigma_{c \text{ max.}} (u):$		kg/ cm <sup>2</sup>	
				$\sigma_{c \text{ LP.}} (u):$		kg/ cm <sup>2</sup>	
				$\sigma_{c// \text{ max.}} (12) = \text{carga max.} / \text{área} \quad (\text{kg/ cm}^2)$ $E_{c//} = \text{carga no L.P.} \times L / h \times b \times d_{LP} \quad (\text{kg/ cm}^2)$			
				<b>Desenho do tipo e do lugar da ruptura:</b>			

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

$$E_{c//} = P_{LP} \cdot L / h \cdot b \cdot d_{LP} \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad \textcircled{64}$$

onde:

$P_{LP}$  = carga no limite de proporcionalidade (kg);

L = distância entre apoios, do registrador de deformações ( $\text{cm}^2$ ) e;

$d_{LP}$  = deformação da madeira no limite proporcional (cm).

A resistência no LP à compressão axial é calculada pela fórmula apresentada a seguir:

$$\sigma_{c//LP} = P_{LP} / A \quad (\text{kg/ cm}^2)$$

onde:

$P_{LP}$  = carga no LP resistida pelo corpo-de-prova (kg) e;

A = área (b x h) do corpo-de-prova submetida ao esforço ( $\text{cm}^2$ ).

Por sua vez, a resistência máxima à compressão axial é determinada com o uso de  $P_{max}$ , pela fórmula:

$$\sigma_{c//max} = P_{max} / A \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad \textcircled{65}$$

## 9.4. COMPRESSÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

### 9.4.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio

O ensaio a compressão perpendicular às fibras tem a finalidade de avaliar a resistência da madeira para usos específicos, em alguns casos como dormentes, tacos e assoalhos, pallets, ou na construção civil e carpintaria, onde o esforço efetuado sobre a peça de madeira seja similar a destes exemplos, ou seja, de esforço estático onde a madeira corre o risco de sofrer esmagamento quando ocorre deformação plástica.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

A figura 62, apresentada a seguir, dá uma idéia real do tipo de esforço exercido sobre a madeira: Nas condições de ensaio aplica-se pressão sobre a peça metálica (aço), a qual comprime a madeira perpendicularmente às fibras que repousa sobre a plataforma da máquina de ensaios, com resistência muito superior à da madeira sendo ensaiada. Desta forma a madeira tende a amassar, o que efetivamente ocorre quando se ultrapassa o seu limite de elasticidade.

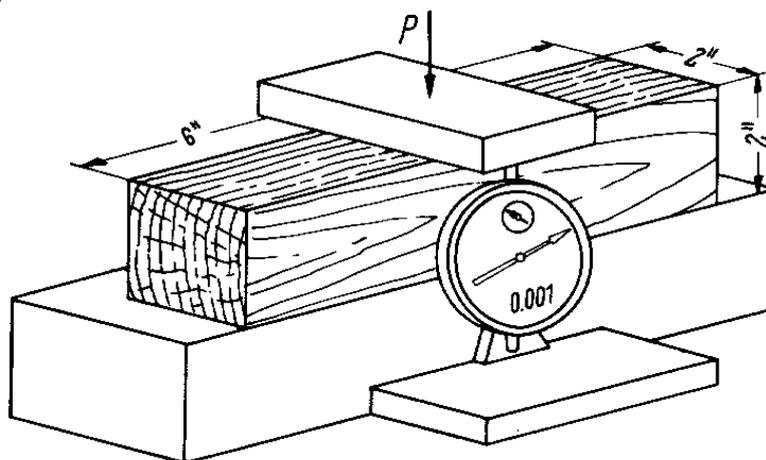


Figura 66. Esquema do ensaio para a determinação da resistência à compressão perpendicular às fibras, segundo a Norma COPANT 30:1-011

Por não existir uma resistência máxima mensurável a ser avaliada neste sentido, a carga aplicada só é exercida até que se alcance o limite de elasticidade da madeira ( $P_{LP}$ ) pois, a partir deste ponto, o registro de valores se refere tão somente à resistência da combinação entre a deformação plástica residual do material e do esforço contrário exercido pela base onde repousa o corpo-de-prova.

A figura 67 ilustra, de forma esquemática, o tipo de gráfico resultante do ensaio de compressão perpendicular às fibras.

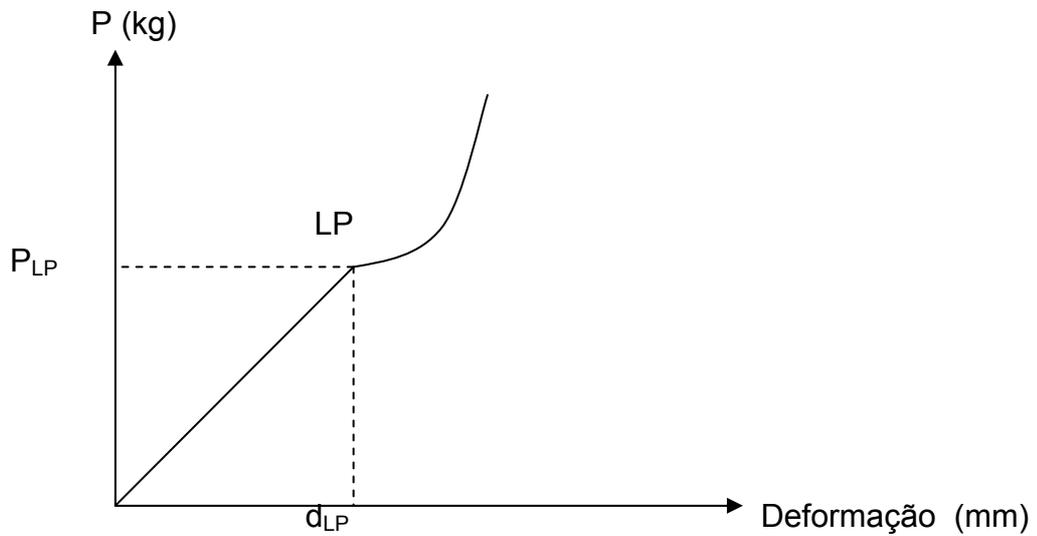


Figura 67. Gráfico típico relacionando a carga e a deformação registradas no ensaio de compressão perpendicular às fibras.



#### 6.4.2. Cálculo da Resistência à Compressão Perpendicular às Fibras

Como o ensaio para a determinação desta resistência só é efetuado até a carga correspondente ao limite de elasticidade da madeira, a resistência à compressão perpendicular às fibras é calculada pela seguinte fórmula:

$$\sigma_{\perp LP} = P_{LP} / A \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad \text{66}$$

onde:

$\sigma_{\perp LP}$  = Resistência da madeira à compressão perpendicular às fibras, expressa em kg/ cm<sup>2</sup>, no limite proporcional;

$P_{LP}$  = Carga no limite proporcional, expressa em kg e;

$A$  = área sujeita ao esforço (5 cm x 5 cm = 25 cm<sup>2</sup>)

### 9.5. TRAÇÃO AXIAL OU PARALELA ÀS FIBRAS

#### 9.5.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio

Em geral, distingue-se entre resistência à tração, tração axial ou paralela às fibras e tração perpendicular às fibras, usando-se a simbologia  $\sigma_t$ ,  $\sigma_{t//}$  e  $\sigma_{t\perp}$ , respectivamente.

A figura 68, abaixo, ilustra de forma esquemática o sentido do esforço a que a madeira é submetida para a realização dos diferentes ensaios de tração.

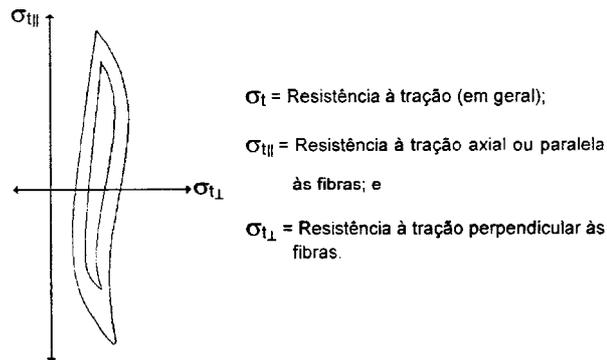


Figura 68. Sentido dos esforços empregados no ensaio de tração axial.

Normalmente a resistência da madeira à tração não é muito empregada em pesquisas tecnológicas, devido à complexidade de sua determinação. Sua importância e significância são bem menores que as outras propriedades de resistência, uma vez que a tração determinada em corpos-de-prova, livres de defeitos, praticamente não é correlacionada com a tração real de peças dimensionadas para uso normal.

Como exemplo da falta de representatividade dos resultados do ensaio de tração axial em situações de uso da madeira, podem-se citar as vigas para construção civil, com a existência de nós, desvio de grã e outros defeitos que afetam sobremaneira a qualidade do material, mas são evitados na confecção dos corpos-de-prova.

Em função do exposto acima e de eventualmente precisarmos saber sobre a resistência à tração axial, existem metodologias para se determinar esta resistência com peças nas dimensões reais, especificadas para uso.

Teoricamente a resistência à tração axial da madeira é muito alta (de 280 a 2.800 kg/ cm<sup>2</sup>) em relação às demais resistências deste material. Da mesma forma, as resistências das fibras e dos componentes da parede celular da madeira são muito elevadas, como apresentadas na tabela 19 abaixo:

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

TABELA 19. VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA PARA ALGUNS COMPONENTES DA MADEIRA.

COMPONENTE	$\sigma_{t//}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Fibra de madeira	4.900 a 6.900
Microfibrila de celulose	20.000
Macromolécula de celulose	80.000

Uma variável interessante, relacionada a resistência à tração axial da madeira, é a sua **porosidade**: Se levarmos em consideração somente área da seção transversal do material lenhoso (desconsiderando-se a área dos poros), a resistência aproximada para todas as espécies será de aproximadamente 4.900 kg/cm<sup>2</sup>.

#### Ensaio:

O ensaio para a determinação da resistência à tração axial da madeira é descrito pela Norma COPANT 30:1-015.

Os corpos-de-prova utilizados para este propósito, como é o caso em outros tipos de ensaios efetuados, são confeccionados para não permitir que ocorra ruptura junto às garras da máquina de ensaio. Como representado na figura 69, seus extremos são reforçados, para resistir altas tensões de cisalhamento desenvolvidas durante a execução do ensaio, fazendo com que a ruptura ocorra na metade de seu comprimento (posição de menor seção transversal).

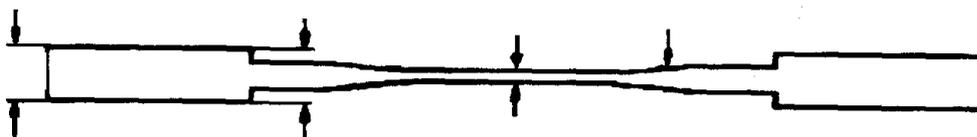


Figura 69. Forma observada em um corpo-de-prova para a avaliação da resistência à tração axial da madeira.

Após a fixação do corpo-de-prova na máquina de ensaios, aplica-se carga de forma contínua, com deslocamento das garras na velocidade de 1 mm/ minuto, até ocorrer a sua ruptura para a determinação da carga máxima ( $P_{max}$ ).

A figura 70, abaixo, apresenta o esquema de um ensaio para a determinação da resistência da madeira à tração axial.

Durante a realização do ensaio é necessário que se registrem as cargas e deformações em intervalos de carga predeterminados, distribuídos em função da resistência máxima prevista e de um número de pontos desejados para elaboração de um diagrama, para determinação do LP e respectivos  $P_{LP}$  e  $d_{LP}$ , para posterior cálculo do módulo de elasticidade à tração axial ( $E_{tr}$ ).

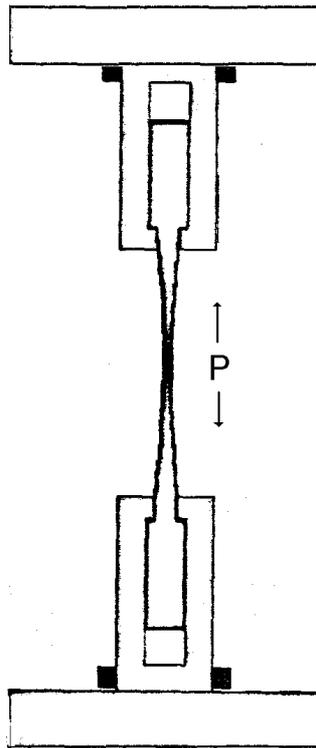


Figura 70. Esquema do ensaio para a determinação da resistência à tração axial. Velocidade: 1mm por minuto.

Para que isto seja possível, há necessidade de se instalar um extensômetro na parte intermediária do corpo-de-prova, com o vão especificado para esta avaliação.

O diagrama carga-deformação para a determinação do limite proporcional (LP), e da carga e deformação correspondentes, pode ser elaborado como o descrito no ensaio para determinar o módulo de elasticidade à flexão estática.

9.5.2. Cálculo para determinar as resistências à tração - axial máxima ( $\sigma_{t//max}$ ) e no limite proporcional ( $\sigma_{t//LP}$ ), e ao módulo de elasticidade à tração axial ( $E_{t//}$ ).

Utilizando-se dos valores levantados por meio do ensaio, as resistências à tração axial e o módulo de elasticidade, respectivamente, são assim calculados:

$$\sigma_{t// \text{ max.}} = P \text{ max.} / A \quad (\text{kgf cm}^2) \quad (67)$$

$$\sigma_{t// LP} = P_{LP} / A \quad (\text{kgf cm}^2) \quad (68)$$

$$E_{t//} = P_{LP} \cdot L / A \cdot d_{LP} \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (69)$$

onde:

$\sigma_{t// \text{ max.}}$  = resistência à tração axial máxima (na ruptura);

$\sigma_{t// LP}$  = resistência à tração axial no limite de proporcionalidade;

$E_{t//}$  = módulo de elasticidade à tração axial;

$P \text{ max}$  = carga aplicada no momento da ruptura (kg);

$P_{LP}$  = carga aplicada no momento que o limite proporcional (LP) é atingido (kg);

$A$  = área da seção transversal do corpo-de-prova rompida no ensaio ( $\text{cm}^2$ ) e;

$L$  = comprimento do vão de teste dado pelo extensômetro (cm).

Com base no tipo e no comprimento de ruptura ocorrida na madeira, também é possível fazer uma classificação de sua resistência à tração axial, embora de forma subjetiva.

Em geral, quanto maior o comprimento da ruptura, maior é a resistência da madeira. Na figura 71 são mostradas duas representações gráficas, para melhor esclarecimento das interpretações sobre diferentes tipos de ruptura:

A peça com o N<sup>o</sup>. 1 apresenta-se como possuidora de maior resistência à tração axial, por possuir uma região de ruptura com maior quantidade de feixes fibrosos entrelaçados e de maior comprimento (C1) que a peça com o N<sup>o</sup> 2, com região de ruptura menor (C2) e menos feixes fibrosos. Para melhor visualização, vide também regiões de ruptura similares, obtidas pelo ensaio de resistência à flexão dinâmica figura 62 à página 131.

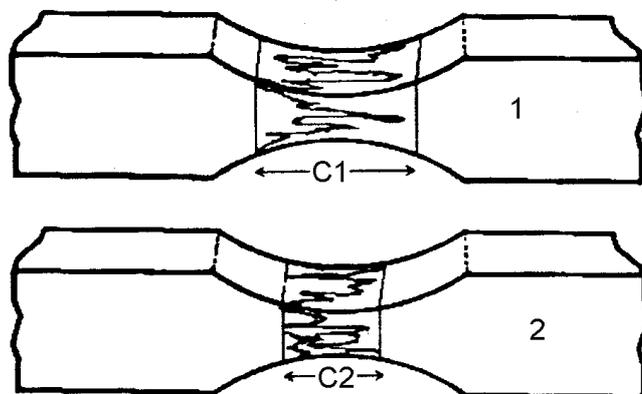


Figura 71. Representação gráfica de rupturas causadas por tração axial, em madeiras com diferentes resistências aparentes.

A seguir é apresentado modelo de formulário utilizado para o registro dos resultados obtidos em ensaio de laboratório.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.



## 9.6. TRAÇÃO PERPENDICULAR

### 9.6.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio

A finalidade, importância e precisão deste teste são, muitas vezes, criticadas e contestadas, pelas razões apresentadas a seguir:

- a) Na construção civil normalmente evita-se utilizar a madeira em situações que a exponha a tensões de tração perpendicular à grã, pelo fato de sua resistência ser muito baixa neste sentido e de decrescer mais ainda com as inevitáveis rachaduras de contração (rachaduras radiais); e
- b) O fato das tensões dentro do corpo-de-prova serem muito irregulares, as quais causam grande variação nos resultados, caracteriza um ensaio pouco preciso e que gera resultados de pouca representatividade para uso prático.

Pelas razões acima, os resultados levantados para esta propriedade servem apenas para uso científico, com a finalidade de comparação da resistência entre diferentes espécies de madeira.

A figura 72, abaixo, apresenta um exemplo de corpo-de-prova utilizado para a determinação desta propriedade, pela metodologia descrita na Norma ASTM D-143-52, bem como a forma de execução do respectivo ensaio.

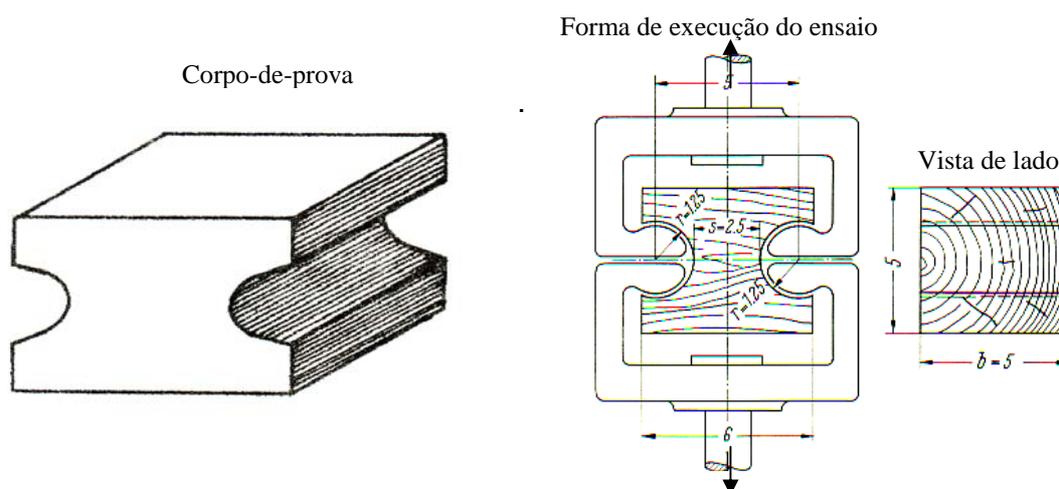


Figura 72. Corpo de prova e forma de execução do ensaio de tração perpendicular às fibras.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

A norma francesa descreve um outro tipo de corpo-de-prova, que se encontra ilustrado na figura 73, a seguir.

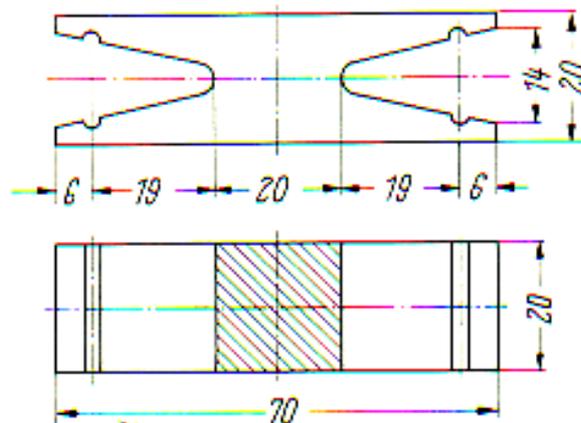


Figura 73. corpo-de-prova para o ensaio de tensão perpendicular à grã, de acordo com especificações da Norma AFNOR.

Ensaio efetuados com corpos-de-prova como os apresentados nas figuras 72 e 73 não são realmente ensaios de tensão perpendicular à grã, mas de fendilhamento duplo: as tensões não são distribuídas em uma seção transversal mínima e os valores obtidos são apenas bem relacionados com a resistência ao fendilhamento (fig. 74).

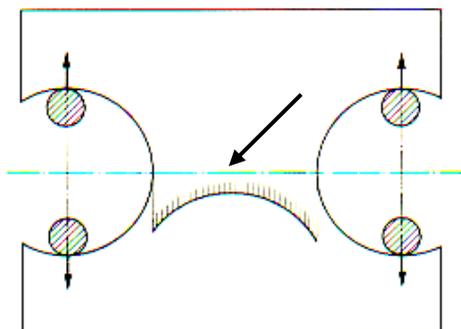


Figura 74. Distribuição das tensões dentro do c.p. durante a determinação da resistência.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

O termo **fendilhamento** representa a capacidade que um bloco de madeira contendo uma ranhura tem em resistir à rachadura, quando a ele é submetida uma força para afastar as bordas da ranhura.

Existe uma boa relação linear entre a resistência ao fendilhamento de corpos-de-prova com ranhuras simples e duplas, tornando-se desnecessária a determinação desta propriedade por ambos os métodos. Assim sendo, a determinação com corpos-de-prova com apenas uma ranhura é preferível, pela maior facilidade de prepará-los.

A figura 75 ilustra uma diversidade de modelos de corpos-de-prova para a determinação da resistência ao fendilhamento, e a figura 76 mostra o relacionamento entre esta resistência, determinada em corpos-de-prova com uma e com duas ranhuras.

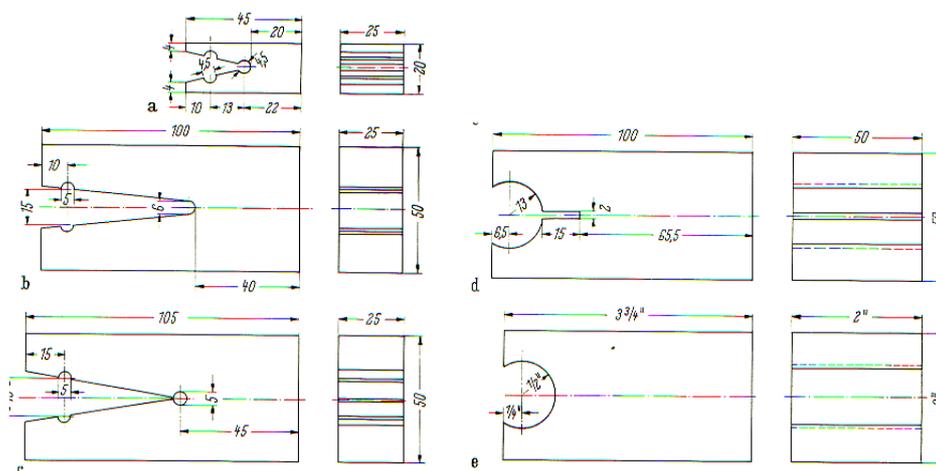


Figura 75. Corpos-de-prova de acordo com diferentes normas técnicas, para a determinação da resistência ao fendilhamento.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

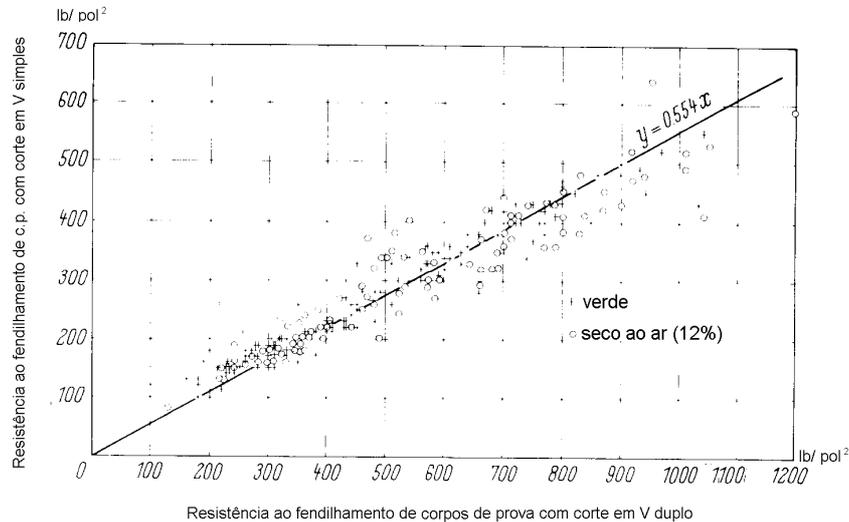


Figura 76. Relacionamento entre a resistência ao fendilhamento determinada em corpos-de-prova confeccionados com uma (figura 71) e com duas ranhuras (figuras 68 – 70).

O formulário utilizado para a determinação da resistência à tração perpendicular às fibras é apresentado a seguir.



### 9.6.2. Cálculo da Resistência à Tração Perpendicular às Fibras

A resistência a tração perpendicular às fibras é calculada como:

$$\sigma_{t\perp \max} = P_{\max.} / a \times b \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (70)$$

onde:

$\sigma_{t\perp \max.}$  = Resistência máxima à tração perpendicular às fibras;

$P_{\max.}$  = carga máxima, no momento da ruptura (kg);

$A = a \times b$  (área determinada pela multiplicação das dimensões  $a$  e  $b$ );

$A$  = área da seção transversal mínima do corpo-de-prova ( $\text{cm}^2$ ).

## 9.7. CISALHAMENTO

### 9.7.1. Considerações Gerais Sobre o Ensaio

Teoricamente, o cisalhamento da madeira consiste na separação das suas fibras, causada por um esforço paralelo às mesmas (deslizamento), sendo de grande importância em peças cavilhadas, roletes, calandras, polias, vigas, etc.

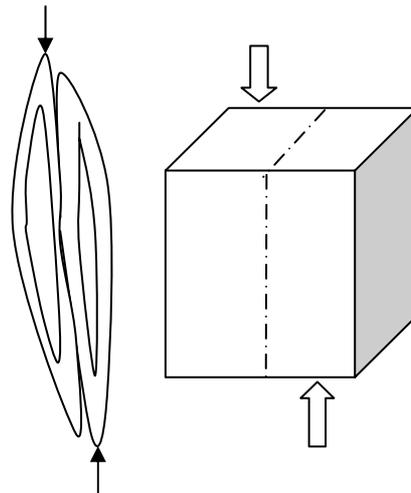


Figura 77: Esquema do teste de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento da madeira é problemático devido à superposição de tensões, principalmente com as de flexão: Tensões de compressão, concentração de tensões, desenvolvimento de rachaduras e outras tensões mascaram o fenômeno do cisalhamento.

A resistência máxima ao cisalhamento paralelo à grã é relacionada às propriedades de torção, as quais sempre são maiores que as de cisalhamento.

As tensões adicionais às de cisalhamento em um ensaio, tornam os resultados duvidosos e não permitem a comparação com resultados obtidos em ensaios diferentes sem precauções especiais.

O ensaio em si consiste na aplicação e na mensuração do esforço no sentido das fibras, para provocar o deslizamento entre elas, sendo um dado de importância em madeira cavilhadas, roletes, calandras, polias, vigas, postes, etc.

A figura 78, abaixo, ilustra um corpo-de-prova confeccionado para a determinação desta resistência. A seção de trabalho pode variar, proporcionando que o cisalhamento ocorra na face tangencial ou na face radial da madeira e normalmente mede 5cm x 5cm.

As tensões desenvolvidas no interior de um cubo de madeira sob esforço que cause o seu cisalhamento, são ilustradas na figura 79, a seguir.

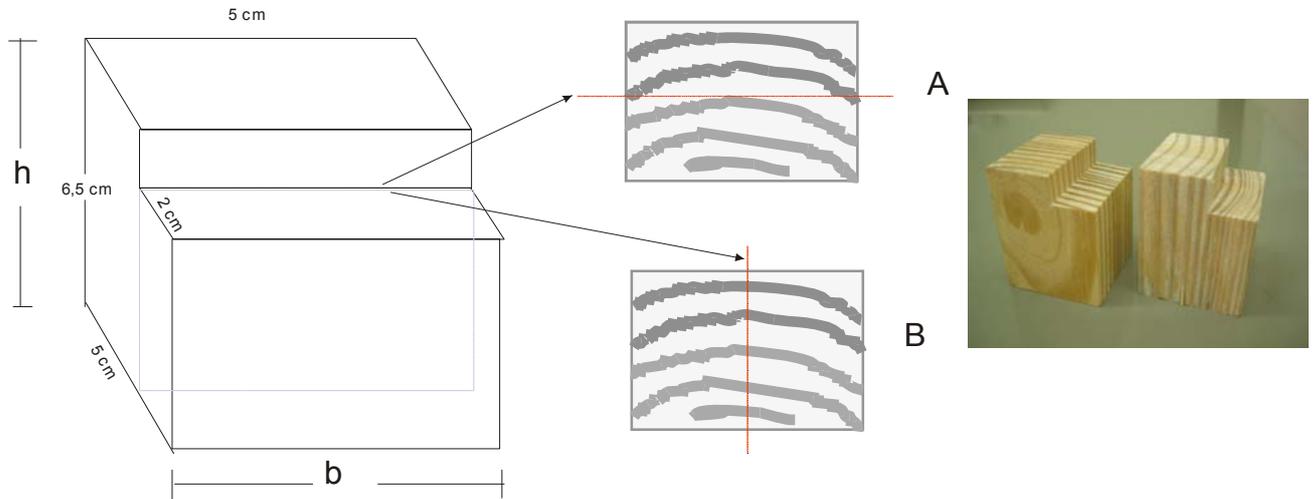


Figura 78. Corpo-de-prova usado para a determinação da resistência ao cisalhamento, segundo a Norma COPANT 30:1-007 - seções de trabalho em função da orientação de corte da madeira: A) tangencialmente aos anéis de crescimento; e B) perpendicularmente aos anéis de crescimento.

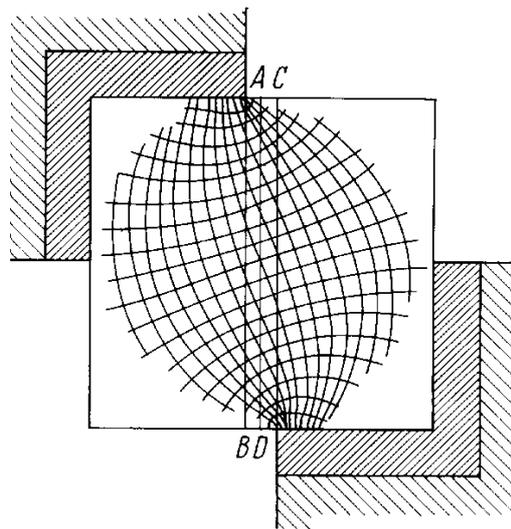


Figura 79. Distribuição de tensões em um cubo de madeira sob carga simetricamente distribuída.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

A resistência ao cisalhamento da madeira é diretamente proporcional à sua densidade, mas depende principalmente do sentido em que o esforço é aplicado em relação aos anéis de crescimento (usualmente a ruptura se determina no plano tangencial ou radial): Enquanto no plano tangencial há uma grande influência da diferença entre os lenhos inicial e tardio, no plano radial há grande influência dos raios da madeira.

No plano radial há grande influência dos raios da madeira, sendo que madeiras com raios largos apresentam baixas resistências ao cisalhamento em relação às com raios mais estreitos.

No plano tangencial há uma grande influência do crescimento da árvore, ou da diferença de resistência entre os lenhos inicial e tardio. Assim, madeiras com maior porcentagem de lenho adulto, e conseqüentemente maior porcentagem de lenho tardio e de material lenhoso por unidade de volume, normalmente apresentam maiores resistências ao cisalhamento no plano tangencial que madeiras com maiores percentuais de lenho inicial.

Em um estudo efetuado por KEYLWERTH (1945), o autor demonstra que a resistência ao cisalhamento é inversamente proporcional ao teor de umidade (0%U - PSF), mas que o incremento médio de resistência desta propriedade com o decréscimo em teor de umidade é menor que o observado para as resistências à flexão e à compressão.

#### 9.7.2. Cálculo da Resistência ao Cisalhamento

Com os dados obtidos pela mensuração do corpo-de-prova e com os procedimentos de ensaio, a resistência ao cisalhamento é calculada pela fórmula:

$$\sigma = P_{\max} / b.h \quad (\text{kg/ cm}^2) \quad (71)$$

onde:

$P_{\max}$  : carga máxima resistida pela peça de madeira (kg);

$b . h$  : largura e altura que definem a área sujeita ao esforço aplicado.



## 9.8. RESISTÊNCIA À DUREZA

### 9.8.1. Considerações Gerais

Geralmente a dureza é definida como a resistência requerida para um corpo sólido penetrar em outro por meio de esforço, ou como a resistência oferecida pelo material testado à penetração de um certo dispositivo (esfera, agulha, cilindro, etc.).

Para ensaios efetuados em metais, a impressão da esfera de aço (Método Brinell) deixada na superfície plana e lisa, longe das bordas do material testado, é bem definida. Para a madeira, anisotrópica, heterogênea e higroscópica, o valor da dureza é mais que duvidoso.

A dureza da madeira é uma propriedade importante para aparelhos de esporte, entalhes, assoalhos, parquetes, tacos, roletes e calandras, também sendo, em geral, indicadora da trabalhabilidade da madeira.

Existem vários métodos para a determinação da dureza da madeira, entre eles o Brinell e o Janka.

A grande dificuldade na avaliação da dureza por estes métodos, é a influência do percentual dos lenhos inicial e tardio, e as tenções, fricções e rupturas de cisalhamento produzidas na peça de madeira, causando grande variação nos resultados. Assim, a determinação da dureza da madeira é um assunto nebuloso, pois existe dúvida sobre o seu significado.

### 9.8.1. Dureza Brinell

Considerações gerais sobre o ensaio:

O **Método Brinell** utiliza uma esfera de aço endurecido com um diâmetro de 10 mm, que é forçada a penetrar no corpo-de-prova mediante uma pressão predeterminada.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

A espessura do corpo-de-prova deve ter no mínimo 15 cm, e este é confeccionado com superfícies planas e lisas.

As cargas a serem aplicadas sobre a esfera, durante a execução do teste, são determinadas em função da provável classe de dureza da madeira, conforme tabela abaixo:

TABELA 20. CARGA APLICADA NO TESTE DE DUREZA BRINNEL EM FUNÇÃO DA PROVÁVEL DUREZA E MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA TESTADA

<b>TIPO DE MADEIRA</b> (Dureza)	<b>MASSA ESPECÍFICA</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>CARGA APLICADA</b> (kg)
Mole	< 0,35	10
Media	0,35 - 0,75	50
Dura	> 0,75	100

Na realização do ensaio a carga total é aplicada de forma contínua, dentro de um período de tempo de 15 segundos. Subseqüentemente a carga máxima é mantida por 30 segundos.

Após a execução do ensaio, determina-se a área da cavidade deixada pela esfera na superfície do corpo de prova, com a utilização da seguinte fórmula:

$$A = \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2}) / 2 \quad (\text{mm}^2) \quad \textcircled{72}$$

onde:

D = diâmetro da esfera metálica; e

d = diâmetro médio das concavidades (determinação com lupa especial)

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Após a determinação da área, calcula-se a dureza Brinell como:

$$H_B = P/A = 2P / \pi \cdot D ( D - \sqrt{D^2 - d^2} ) \quad (\text{kg/mm}^2) \quad \text{73}$$

A determinação de um valor médio confiável exige normalmente um mínimo de 10 avaliações por face testada ( tangencial, radial ou transversal). A distância entre as áreas de realização do teste, não deve ser inferior que 25 mm nas faces tangencial e radial, e não inferior a 50 mm na face transversal.

#### 9.8.2. Dureza Janka

Janka (1906, 1908 e 1915) propôs e desenvolveu uma modificação do ensaio da determinação da dureza Brinell para o material madeira.

A Norma COPANT 30:1-009 adota o Método Janka, que consiste em avaliar o esforço necessário para introduzir nas faces laterais e dos topos dos corpos-de-prova, uma esfera de 1 cm<sup>2</sup> de área diametral, a uma profundidade igual a seu raio. O implemento utilizado para esta finalidade é mostrado em corte na figura 80, apresentada a seguir.

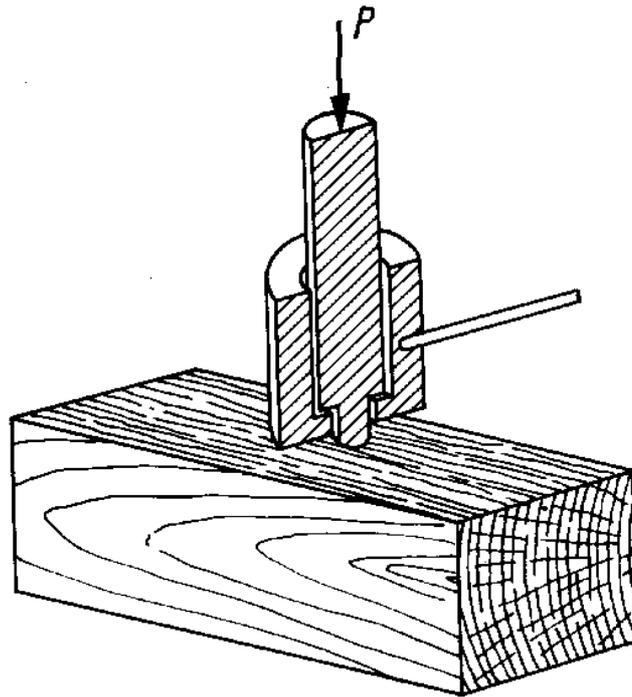


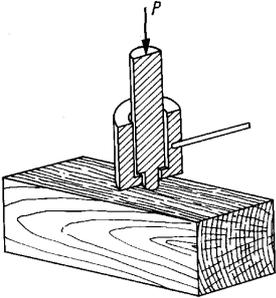
Figura 80. Esquema do ensaio para a determinação da dureza Janka

As dimensões do corpo-de-prova são 5 x 5 x 15 cm, e um número de 6 determinações são efetuadas, sendo 2 em cada face tangencial, 2 em cada face radial e 1 em cada face da seção transversal (sentido axial).

O esforço da penetração é medido em quilogramas e, devido à área diametral da esfera ser de 1 cm<sup>2</sup>, este valor é obtido diretamente em kg/ cm<sup>2</sup>.

Em geral:

$$D_J \text{ axial } \gg D_J \text{ tangencial } \cong D_J \text{ radial}$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UFPR CENTRO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA <b>Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal</b>				<b>DUREZA JANKA</b>				Responsável:				
Clima da sala: Temperatura		°C	Umidade relativa				%					
Máquina de ensaio:				Espécie:								
Anel de crescimento – largura média:				mm								
Massa específica:		g/ cm <sup>3</sup>										
Umidade teste:		%										
Alburno:		%										
Dimensões nominais do C.P.:												
Comprimento =		cm	h =		cm	b =		cm				
<b>Carga = Dureza Janka (kg/ cm<sup>2</sup>)</b>												
No. C.P.	X	X	média	T	T	Média	R	R	Média	Peso <sub>t</sub> (g)	Peso <sub>0</sub> (g)	U%

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

## 9.9. RESISTÊNCIA À ABRASÃO

A resistência à abrasão é uma propriedade muito importante para vários itens de madeira, como pisos, assoalhos, partes de máquinas, etc.

Abrasão é causada por vários fatores, como pelas ações de andar, dançar e transportar, bem como pela influência de oscilações, areia, sujeira e outros corpos estranhos, produtos químicos, umidade e troca de temperaturas. Preservantes como óleos, seladores e vernizes reduzem a abrasão na madeira.

O fenômeno da abrasão é tão complexo e tão diferente que não existe um teste padronizado para esta finalidade: Apenas é possível simular situações da madeira em serviço nas situações de uso citadas acima, para fins de comparação.

Os testes de abrasão podem ser conduzidos para determinar o desgaste da madeira (perda de massa e de espessura) quando ela é raspada por abrasivos, como por jatos de areia de quartzo fina, lixas, raspadores de metal, escovas de aço, etc, ou por uma combinação destes.

As condições do ensaio devem ser controladas: Algumas máquinas para testes de abrasão simulam as condições de desgaste produzido em assoalhos em serviço; para esta finalidade, o teste pode ser efetuado em amostras de madeira, dentro de uma variedade de dimensões.

Outras considerações a serem feitas referem-se à espécie de madeira, forma de corte, teor de umidade, condição da superfície, grã e proteção artificial contra abrasão.

## 9.10. RESISTÊNCIA À TORÇÃO

A resistência à torção da madeira é raramente exigida, mas é possível calculá-la caso ela seja necessária.

O módulo de rigidez nos planos longitudinal-radial (LR), longitudinal-tangencial (LT) e radial-tangencial (RT) determina a deformação em torção da madeira.

Quando torcemos uma peça de madeira em torno de seu eixo axial (paralelo à grã), apenas os módulos de rigidez  $G_{LR}$  e  $G_{LT}$  estão envolvidos. Para muitas madeiras estes módulos não variam muito, de forma que uma "média em módulo de rigidez", segundo BAUMANN, é dado por  $G = E/17$ , e pode ser usado para o emprego da deformação e resistência à torção da madeira.

Na fórmula de BAUMANN,  $E$  refere-se ao módulo de YOUNG ou módulo de elasticidade ( $E = 1/\alpha$ ).

Determinação da resistência à torção:

O ensaio à torção é simples, mas a avaliação dos resultados é duvidosa, uma vez que se utiliza a fórmula para materiais anisotrópicos.

No caso da resistência à torção para corpos-de-prova de seções transversais quadradas, a seguinte fórmula é utilizada:

$$\sigma_{tb} = 4,80 \cdot M_t / a^3$$

74

onde:

$M_t$ : momento de tração, em cm.kg; e

$A$ : comprimento da aresta da seção transversal, em cm.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

A figura 81 apresenta as possíveis formas de torção de corpos-de-prova da madeira durante a realização de ensaios de laboratório.

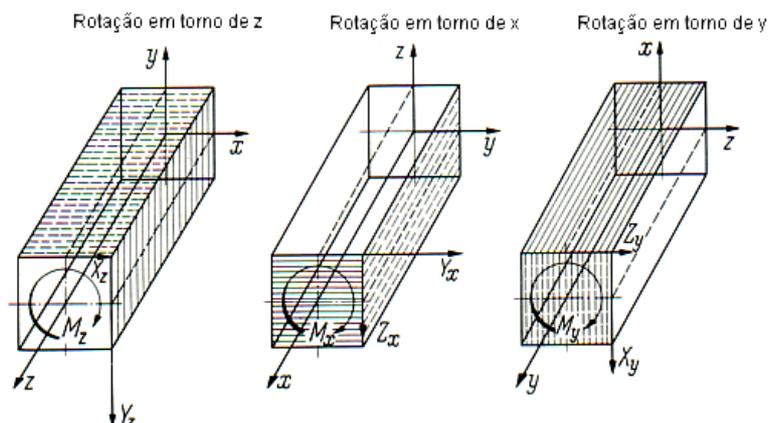


Figura 81. Possíveis casos de torção de C.P. de madeira com seção transversal quadrada.

O módulo de rigidez, tensão no limite proporcional e resistência à torção ( $\sigma_{tb}$ ) dependem do teor de umidade, de forma similar às propriedades mecânicas estáticas da madeira.

Segundo TRAYER (1930), os valores calculados usando a fórmula acima não têm sentido no ponto de vista físico, pois só são de utilidade para a área arquitetônica, uma vez que o maior interesse está na relação entre o momento da ruptura e o valor cúbico de "a".

Segundo HÖRIG (1944), é de especial interesse no ponto de vista técnico a resistência à torção da madeira em torno do eixo Y, e as fórmulas para a determinação da resistência á ruptura são:

### **Caso 1:** torção em torno do eixo Z

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

$$(\sigma_{zx})_{\max.} = 3,52 M_z / a^3 \quad (75)$$

$$(\sigma_{zy})_{\max.} = 11,04 M_z / a^3 \quad (76)$$

**Caso 2:** torção em torno do eixo X

$$(\sigma_{xy})_{\max.} = 12,41 M_x / a^3 \quad (77)$$

$$(\sigma_{xz})_{\max.} = 3,44 M_x / a^3 \quad (78)$$

**Caso 3:** torção em torno do eixo Y

$$(\sigma_{yx})_{\max.} = 4,60 M_y / a^3 \quad (79)$$

$$(\sigma_{yz})_{\max.} = 3,44 M_y / a^3 \quad (80)$$

## 10. DEPENDÊNCIAS GERAIS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

As variações observadas nos resultados obtidos por ensaios mecânicos, ocorrem devido aos seguintes fatores:

- a. Condições de realização do ensaio (influência do método empregado);
- b. Características e propriedades internas da madeira (influências internas); e
- c. Influências externas.

### 10.1. CONDIÇÕES DO ENSAIO

Em geral, todas as propriedades mecânicas e elásticas estão sujeitas às seguintes influências:

#### 10.1.1. Tamanho e Forma do Corpo de Prova - Exemplos

- Para a compressão axial, têm-se como ideal a relação  $h / a \cong 4$ ;
- Quanto maior a seção transversal, maior a resistência à compressão;
- Quanto maior o comprimento, menor a resistência à compressão.
- Em ensaios de flexão estática a relação  $L/h$  deve ser maior que 10, e não superior a 20, uma vez que a partir deste ponto atinge-se uma resistência máxima e constante.
- Na flexão dinâmica a relação  $L/h$  também deve estar entre 10 e 20, pois estes valores correspondem a valores mínimos de resistência.
- Para que a ruptura no teste de tração se de na metade do comprimento do corpo de prova, este deve apresentar uma forma adequada, para existir menor resistência às tensões efetuadas no teste, nesta posição.
- Para testes de cisalhamento da madeira, existem corpos-de-prova confeccionados em várias formas. Assim, a distribuição das tensões internas durante o ensaio são diferentes e, por conseqüência, os resultados avaliados.

### 10.1.2. Velocidade do Ensaio

Esta variável é altamente relacionada à variação nos resultados de ensaios mecânicos. Como exemplo podem-se citar os diferentes métodos de determinação do módulo de elasticidade:

$$E_f < E_c \sim E_t < E_d$$

|———— E estáticos ———|

A aplicação de cargas durante a realização do teste de flexão estática de maneiras diferentes, acarreta em momentos e distribuições de tensões desiguais dentro do corpo de prova, dando diferentes resultados.

Não é possível a comparação direta entre valores obtidos por diferentes métodos de determinação da resistência de dureza, acontecendo o mesmo com os testes utilizados para a determinação do cisalhamento da madeira.

Todas as influências supracitadas indicam:

- a) A impossibilidade de comparação de resultados obtidos por testes diferentes (exceto se forem bem correlacionados);
- b) A necessidade de utilização de normas;
- c) A necessidade de indicar sempre a norma utilizada, ou descrever detalhadamente os processos ou testes empregados;

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu download e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

## 10.2. INFLUÊNCIAS INTERNAS DA MADEIRA

### 10.2.1. Massa Específica

A propriedade física da madeira mais relacionada às mecânicas é a massa específica. De forma geral, quanto maior for a massa específica deste material, maior é a quantidade de material lenhoso por unidade de volume da madeira e, por conseqüência, maiores são as suas propriedades mecânicas e elásticas.

### 10.2.2. Ângulo das Fibras

As propriedades mecânicas e elásticas da madeira também são afetadas pelo fenômeno da anisotropia (desigualdade nas alterações dimensionais por efeito da contração e/ou do inchamento, entre as direções radial, tangencial e longitudinal). Contudo, as grandes influências em resistência por efeito da anisotropia são observadas apenas entre as direções paralela e perpendicular às fibras, e muito pouco pelos sentidos radial, tangencial e longitudinal, em relação às da contração e do inchamento.

### 10.2.3. Posição no Tronco

Variações de massa específica dentro da árvore (ao longo de uma tora e na direção medula-casca, ou em idade da madeira, com variações nas proporções das madeiras de lenho juvenil e adulto, e dentro destes, dos lenhos inicial e tardio): De forma grosseira, para coníferas, quanto maior a distância da base da árvore, e quanto mais próxima da medula a madeira for localizada, menor serão a massa específica e as propriedades mecânicas da madeira.

### 10.2.4. Porcentagem dos Lenhos Inicial e Tardio

A influência causada pela porcentagem dos lenhos inicial e tardio, está relacionada às propriedades mecânicas da madeira, principalmente pela grande variação destes em massa específica.

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Variações destes lenhos são mais acentuadas quando comparamos os lenhos juvenil e adulto, distribuídos em proporções diferenciadas ao longo do tronco na direção medula-casca.

#### 10.2.5. Defeitos da Madeira

A influencia de defeitos da madeira é especialmente alta em madeiras úmidas. Os principais defeitos que afetam as propriedades mecânicas da madeira são:

##### 10.2.5.1 Galhos (nós)

A formação irregular da madeira, em decorrência da existência de nós, afeta de forma significativa suas propriedades mecânicas. Esta influência pode ser observada pelos exemplos apresentados nas tabelas a seguir:

TABELA 21. MÓDULOS DE ELASTICIDADE À FLEXÃO ESTÁTICA

MADEIRA SEM GALHOS (kg/ cm <sup>2</sup> )	MADEIRA COM GALHOS (kg/ cm <sup>2</sup> )	ESPÉCIE
161.000	150.000	<i>Pinus spp. (u = 12%)</i>
113.000	107.000	<i>Fraxinus excelsior</i>
135.000	83.000	<i>Tecoma grandis</i>
89.000	42.000	<i>Piptocarpha angustifolia</i>

TABELA 22. RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS À COMPRESSÃO, TRAÇÃO E FLEXÃO ESTÁTICA DA MADEIRA COM E SEM A PRESENÇA DE NÓS.

Resistência	Mad. sem galhos (kg/ cm <sup>2</sup> )	Mad. com galhos (kg/ cm <sup>2</sup> )	Espécie
$\sigma_c$ max.	403	360	<i>Pinus spp.</i>
$\sigma_t$ max.	780	380	<i>Pinus spp.</i>
$\sigma_f$ max.	800	200	<i>Piptocarpha angustifolia</i> *

\* Vassourão branco

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

A influência dos nós sobre as propriedades mecânicas e de elasticidade da madeira, depende de seus diâmetros. Obviamente, quanto maior o tamanho dos nós, menor será a resistência do material.

#### 10.2.5.2. Grã irregular

A grã irregular da madeira é uma conseqüência do crescimento irregular, do rápido crescimento da árvore, de fatores genéticos, da cicatrização de ferimentos, etc. Este tipo de defeito provoca altas dilatações na madeira, tensões internas elevadas e ângulo das fibras variável, redundando na baixa resistência do material.

O crescimento irregular causa:

Elevadas tensões internas e baixa massa específica, levando ao desenvolvimento de rachaduras microscópicas.

Ex.: *Schizolobium parahybum*: Uma vez cortada e serrada a madeira, as tensões internas elevadas e o crescimento irregular provocam rachaduras, empenamentos acentuados etc., redundando em baixa resistência do material.

#### 10.2.5.3. Lenho de reação

Em geral, altas resistências da madeira estão relacionadas a altas massas específicas deste material. No entanto, apesar do lenho de reação possuir maior massa específica que o lenho normal, ele diz respeito a material constituído de células contendo substâncias gelatinosas, com paredes frágeis e quebradiças. Desta forma, apesar de possuir maior massa específica, este tipo de lenho na madeira reduz as suas propriedades mecânicas de forma significativa.

### Conseqüências das influências internas da madeira:

- a. Há grande variação das propriedades mecânicas, segundo a variação em massa específica;
- b. Não é possível determinar as propriedades mecânicas de uma espécie de madeira, baseando-se apenas em uma amostra, um disco, ou um único tronco. É necessário uma amostragem representativa e cientificamente elaborada para a espécie (Algumas normas sugerem 5 árvores de uma determinada população, e seleção ao acaso de onde serão obtidos os corpos-de-prova no tronco. Contudo, este número dependerá do que se pretende representar: Talhão, micro localização, região, etc.);
- c. Necessidade de utilizar somente corpos-de-prova sem defeitos e bem confeccionados;
- d. Possibilidade de classificação de madeiras em base às suas massas específicas. ( Ex.: Classificação preliminar de espécies desconhecidas na floresta).
- e. Necessidade de registrar a direção em que a carga foi aplicada durante a realização do ensaio mecânico ( Ex.:  $\sigma_C \parallel$  ou  $\sigma_C \perp$ , etc.);
- f. Em alguns casos, necessidade de utilização de chapas compensadas ou aglomeradas, para se evitar as conseqüências indesejadas decorrentes da anisotropia da madeira maciça. Neste tipo de material a anisotropia que ocorre na madeira é praticamente eliminada; e
- g. Necessidade de condução do povoamento florestal com práticas silviculturais e de manejo adequadas, para controle da massa específica, taxa de crescimento, eliminação de nós, entre várias outras possibilidades, para a obtenção de madeira de boa qualidade (uma função do uso final pretendido).

### 10.3. INFLUÊNCIAS EXTERNAS

#### 10.3.1. Temperatura

Em geral, altas temperaturas reduzem a resistência da madeira, em decorrência da dilatação térmica do material e da movimentação térmica de suas moléculas: Acima de 100°C inicia-se lentamente a deterioração térmica da madeira.

A resistência à compressão de uma peça de madeira sujeita a uma determinada temperatura, em relação à resistência desta mesma madeira a uma temperatura conhecida, pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$\sigma_{c2} = \sigma_{c1} - n (t_2 - t_1) \quad (81)$$

onde:

$\sigma_{c2}$  = resistência à compressão na temperatura  $t_2$

$\sigma_{c1}$  = resistência à compressão na temperatura  $t_1$

$t_1$  e  $t_2$  = temperaturas consideradas

$n = 4,76 \cdot r_o$

#### 10.3.2. Umidade

A entrada de água nos espaços submicroscópicos da parede celular, causa a dilatação e o amolecimento da madeira. Assim, de forma geral, quanto maior for o teor de umidade, menor é a sua resistência. Esta influência se verifica entre 0%U e o PSF; acima deste ponto não ocorrem alterações das propriedades elásticas e mecânicas da madeira.

Normalmente, entre 8 e 20%U, todas as propriedades mecânicas mostram uma dependência estreita e inversamente proporcional ao teor de umidade. Nestas condições, é possível descrever o comportamento de madeiras em função do teor de umidade, por meio de equações lineares.

Como exemplo do exposto acima, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade entre 8 e 20%U são descritos segundo as seguintes equações:

$$\sigma_{c2} = \sigma_{c1} ( 32 - u_2 / 32 - u_1 ) \quad [ \text{kg} / \text{cm}^2 ] \quad \textcircled{82}$$

$$E_{c2} = E_{c1} ( 48 - u_2 / 48 - u_1 ) \quad [ \text{kg} / \text{cm}^2 ] \quad \textcircled{83}$$

Devido o relacionamento supracitado, existente entre as propriedades de resistência da madeira e o seu teor de umidade, a tabela abaixo apresenta as seguintes alterações no intervalo de 8 a 20% de teor de umidade:

TABELA 23. ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.

PROPRIIDADE	ALTERAÇÕES APROXIMADAS ( % / % )
Tração longitudinal	3,0
Tração perpendicular	1,5
Dureza longitudinal	4,0
Dureza lateral	2,5
Módulo de elasticidade	2,0

A presente apostila foi elaborada para fins didáticos e seu dowload e cópia estão disponibilizados para qualquer pessoa interessada na matéria, contudo a alteração de seu conteúdo, a transcrição da totalidade ou de parte de seu texto, bem como sua tradução total ou parcial, não estão autorizadas pelo autor.

Observação: Os valores da tabela 23, obtidos por fórmulas ou gráficos, têm propósito ilustrativo. Portanto, na necessidade de valores reais, convém determiná-los corretamente por meio de testes.

### Conclusões:

1. Só ocorrem alterações das propriedades elásticas e mecânicas devido variações no teor de umidade da madeira, entre 0%U e o PSP. Acima deste ponto não há qualquer alteração;
2. "Madeiras verdes", com teor de umidade superior a 20%, não devem ser utilizadas para construções;
3. Para se obter valores comparáveis, as madeiras devem sempre ser testadas a teores de umidade padronizadas (normalmente a 12%U ou 15%U, ou valores superiores ao PSF ), Adicionalmente, o teor de umidade adotado deve sempre ser especificado;
4. Os testes devem ser executados em salas climatizadas, com temperatura e umidade relativa padrões e constantes ( Ex.: 20° C e 65% UR para obter uma  $U_{equ.} = 12\%$  na madeira e, nas salas onde se procedem aos ensaios, com a temperatura recomendada para não ocorrer dilatação diferenciada entre os elementos que constituem as máquinas de ensaio e sua conseqüente deformação/ perda de precisão);
- 5) O cozimento e a vaporização da madeira a tornam amolecida, facilitando sua laminação, flexão, etc.