



Centro Universitário de União da Vitória

Centro Universitário de União da Vitória

União da Vitória | São Mateus do Sul | Paraná

Telefones: 42.3522.1837 | 42.3532.6154

www.uniuv.edu.br

Propriedades Físicas da Madeira

APOSTILA
Versão 2013

Prof. Peterson Jaeger

Conteúdo

1. Conceitos
2. Densidade da madeira
3. Determinação da densidade
4. Teor de umidade
5. Determinação do teor de umidade
6. Contração e inchamento
7. Retratabilidade e anisotropia
8. Propriedades térmicas
9. Propriedades acústicas

1

Conceitos

Propriedade física

- Característica inerente a matéria.
- Comportamento inato do material quando exposto a condições ambientais diferenciadas.

- Anisotrópico
 - Comportamento diferenciado nos diferentes planos anatômicos.
 - Antônimo: isotrópico (metais)

Anéis de crescimento

- Regiões da madeira que apresentam variação na dimensão da parede celular.
- Essa variação é proporcionada pela existência de um período vegetativos mais intenso.

- Lenho inicial (ou primaveril)
 - Corresponde ao período vegetativo mais intenso.
 - Alto fluxo de líquidos
 - Células com paredes mais finas e lumens grandes

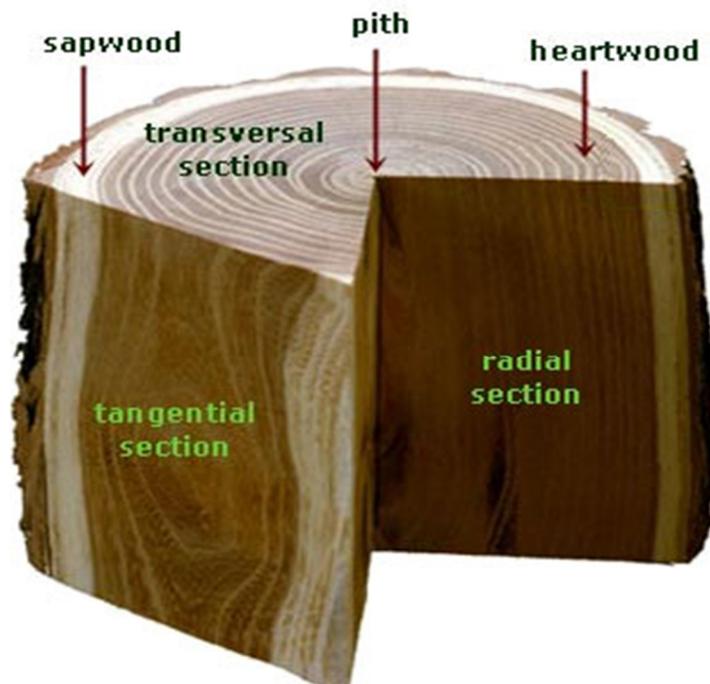
- Lenho tardio (ou outonal)
 - Período vegetativo menos intenso.
 - Baixo fluxo de líquidos
 - Células com paredes mais espessas e lumens pequenos

Cerne e alborno

- Células mais próximas do centro da árvore perdem atividade fisiológica.
 - Sem circulação de seiva, há acúmulo de substâncias (taninos, resinas, etc.).
 - Esse acúmulo resulta na diferenciação da cor em algumas espécies.
-
- Cerne apresenta:
 - Cor mais escura, quando verificada distinção de cores.
 - Menor teor de umidade.
 - Menor permeabilidade.
 - Maior resistência a degradação (depois da madeira processada)

Planos anatômicos

- As células da madeira são organizadas em diferentes direções.
 - Plano transversal – perpendicular ao eixo da árvore.
 - Plano radial – perpendicular aos anéis de crescimento (ou paralelo aos raios).
 - Plano tangencial – tangenciando os anéis de crescimento.



Grã

- Termo que designa a orientação geral dos elementos verticais constituintes do lenho em relação ao eixo longitudinal da árvore.

- Grã direita (ou reta)
- Grãs irregulares
 - Espiral ou torcida
 - Entrecruzada ou reversa
 - Ondulada ou crespada
 - Inclinada, diagonal ou oblíqua

2

Densidade da madeira

Densidade da madeira

- Referencia para qualidade da madeira
 - Madeira leve ou pesada
- Resultado da combinação de vários fatores
- Valor correlacionado com outras características físicas e mecânicas

- Densidade é a massa existente por unidade de volume de determinado material.

$$Densidade = \frac{massa}{volume}$$

- A madeira é um material higroscópico
 - Problemas para determinação da densidade em função da umidade
- Formas de expressar a densidade:
 - Densidade aparente
 - Densidade básica
 - Densidade real

Densidade real

- Representa a quantidade de material lenhoso, excluído os espaços vazios.
- Varia muito pouco entre as espécies de madeira (quase constante).
 - $D_R = 1,50$ a $1,56 \text{ g/cm}^3$

Exemplos de densidade

Espécie		Massa _{15%} (g/cm ³)
<i>Guajacum officinale</i>	Guaiaco	1,23 - 1,40
<i>Myroxylon balsamum</i>	Cabriúva Vermelha	0,95
<i>Balforodendron riedelianum</i>	Pau Marfim	0,84
<i>Pterogyne nitens</i>	Amendoim	0,77
<i>Cabralea cangerana</i>	Canjerana	0,67
<i>Araucaria angustifolia</i>	Pinheiro do Paraná	0,55
<i>Talauma ovata</i>	Baguaçu	0,56
<i>Cedrela sp.</i>	Cedro	0,53
<i>Didymopanax calvum</i>	Mandioqueira	0,52
<i>Schizolobium parahybum</i>	Guapuruvú	0,32
<i>Ochroma lagopus</i>	Balsa	0,13 - 0,20

Segundo o IPT, Classificam-se as madeiras segundo sua densidade básica:

CLASSIFICAÇÃO	LIMITES	
muito leve		0,39
leve	0,4	0,55
moderadamente pesada	0,56	0,75
pesada	0,76	0,95
muito pesada	0,96	

Fatores que influenciam a densidade

- **(01) Espécie** – variações da densidade ocorrem:
 - Entre espécies diferentes
 - Entre arvores da mesma espécie
 - Entre partes de uma mesma arvore

- **(02) Teor de umidade** - a água inserida na madeira altera seu peso conforme a expressão:

$$P_U = P_0 (1 + tu)$$

The diagram shows the equation $P_U = P_0 (1 + tu)$ with three arrows pointing from labels to variables:

- An arrow from "Peso úmido" points to P_U .
- An arrow from "Peso seco" points to P_0 .
- An arrow from "Teor de umidade" points to tu .

Exemplo:

Um pedaço de madeira pesa 100g em seu estado totalmente seco. Qual será seu peso com 25% de teor de umidade?

$$P_u = 100(1 + 0,25) = 125g$$

- Além do peso, a água também altera o volume da madeira:

$$V_U = V_0(1 + \alpha V)$$

Diagram illustrating the equation $V_U = V_0(1 + \alpha V)$ with labels:

- V_U : Volume úmido
- V_0 : Volume seco
- α : Coeficiente de inchamento volumétrico

$$D_U = \frac{P_U}{V_U} \Rightarrow \frac{P_0(1 + tu)}{V_0(1 + \alpha V)} \Rightarrow D_0 \frac{(1 + tu)}{(1 + \alpha V)}$$

- O coeficiente de inchamento volumétrico nem sempre é conhecido.
- Para teores de umidade entre 0% e 30%, tem-se uma formula alternativa.

$$D_U = D_0 \left[\frac{1 + tu}{1 + (0,85 \times D_0 \times tu)} \right]$$

Teor de umidade

Densidade a 0% de umidade

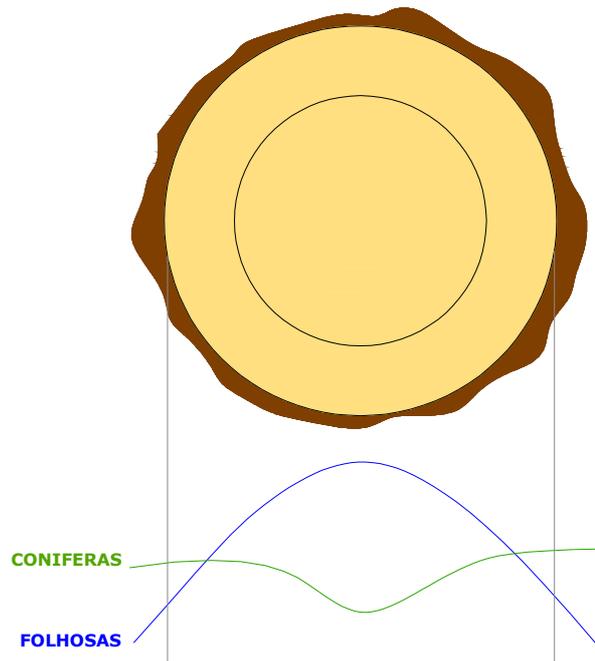
Exemplo:

Qual a densidade de uma madeira com $D=0,55\text{g/cm}^3$ em 15% de umidade?

$$D_{15} = 0,55 \left[\frac{1 + 0,15}{1 + (0,85 \times 0,55 \times 0,15)} \right] = 0,59\text{g/cm}^3$$

- **(03) Lenho inicial e tardio** – a diferença de espessura da parede celular das células do lenho inicial e das células do lenho tardio promove diferenciação da densidade da madeira.

- **(04) - Posição no tronco** – a largura dos anéis de crescimento ao longo da vida da árvore se alteram, causando variação de densidade no sentido transversal.
- No sentido longitudinal, a densidade decresce da base para a copa.



■ **(05) Fatores externos:**

- Local
 - Clima
 - Solo
 - Altitude
 - Declividade

- Métodos silviculturais
 - Adubação
 - Poda
 - Desbaste

3

Determinação da densidade da madeira

Métodos gravimétricos

- São métodos que utilizam o deslocamento de líquidos.
 - Imersão em água
 - Pesagem
 - Imersão em mercúrio
 - Imersão relativa
 - Passagem de raios

- Imersão em água
 - Amostra de madeira de dimensão maior;
 - Verifica-se o deslocamento da água em recipiente graduado
 - Cada mL corresponde a 1 cm³
 - Exige duas leituras:
 - Inicial – volume de água no recipiente
 - Final – volume de água + madeira

$$\text{Densidade} = \frac{m(g)}{V_F - V_I (mL)}$$

← Massa
← Volume final ← Volume inicial

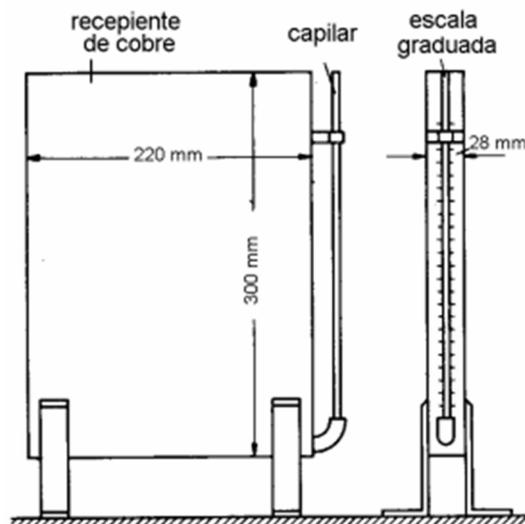
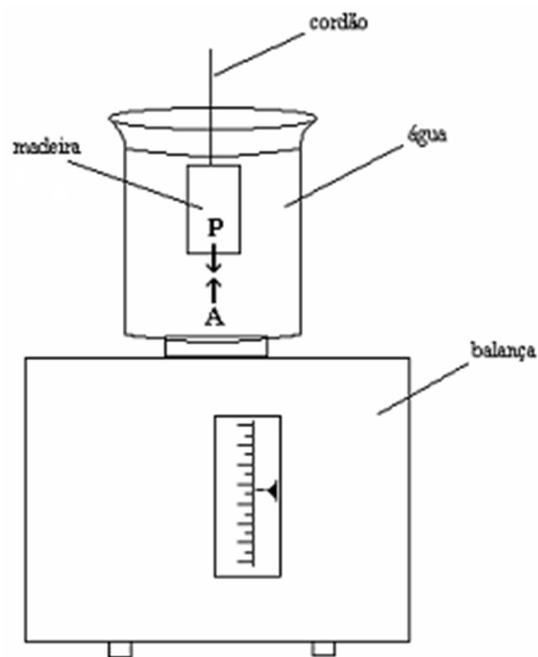


Figura 2: Recipiente para a determinação do volume pelo deslocamento de água (kollmann, pag. 361): recipiente e tubo capilar, em perfil, e escala graduada e tubo capilar, vistos de frente.

- A partir que a amostra de madeira entra em contato com a água, inicia a absorção;
- Uso de revestimento na amostra (parafina).

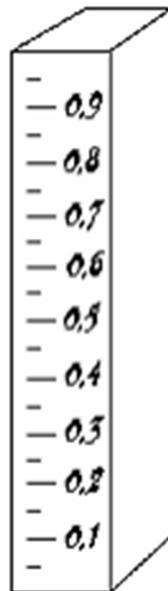
- Método de pesagem
 - Uma amostra de madeira colocada em um recipiente com água altera o peso inicial desse recipiente.
 - Água tem densidade 1g/cm^3 ;
 - $A = \text{força de sustentação (empuxo)}$
 - $A = V_u \cdot \text{densidade da água} \rightarrow A = V_u$
 - $P = V_u \cdot \text{densidade da água} \rightarrow P = V_u$
 - $P = A = V_u$

- Duas pesagens: inicial e final
- Peça de madeira deve estar seca
- Peça de madeira deve estar suspensa



Determinação do volume por pesagem

- **Imersão relativa**
 - Aplicado a amostras de forma alongada, superfícies paralelas e lisas.
 - Divide-se a amostra em 10 partes iguais
 - Mergulha-se da menor altura possível em recipiente com água, na posição vertical, sem tocar na parede do recipiente;
 - A densidade é verificada na marca d'água deixada na amostra.
- **Precisão muito baixa**



Métodos estereométricos

- A determinação do volume da amostra de madeira é feita pelas suas dimensões.
 - Superfícies lisas
 - Lados paralelos
 - Ausência de fendas ou similares

Exemplo

- Uma amostra de madeira tem sua massa e dimensões alteradas em função do seu teor de umidade, conforme a tabela. Calcule a densidade aparente a 0% e 12% de umidade e a densidade básica.

Planos anatômicos	Dimensões (cm)		
	0%	12%	saturada
R	6,00	6,20	6,35
T	2,50	2,60	2,70
L	8,00	8,25	8,33
Massa (g)	45	51	52

- Densidade a 0% de umidade:

$$D_0 = \frac{m_0}{V_0} \Rightarrow \frac{45}{6,0 \times 2,5 \times 8,0} \Rightarrow \frac{45}{120} \Rightarrow 0,375 \text{ g / cm}^3$$

- Densidade a 12% de umidade:

$$D_0 = \frac{m_0}{V_0} \Rightarrow \frac{51}{6,2 \times 2,6 \times 8,25} \Rightarrow \frac{51}{132,99} \Rightarrow 0,383 \text{ g / cm}^3$$

- Densidade básica:

$$D_0 = \frac{m_0}{V_0} \Rightarrow \frac{45}{6,35 \times 2,7 \times 8,33} \Rightarrow \frac{45}{142,82} \Rightarrow 0,315 \text{ g / cm}^3$$

4

Teor de umidade da madeira

Água de capilaridade

- Localizada nos vasos, canais e lúmens das células;
- Fácil de retirar;
- A água passa de uma célula para outra até atingir a superfície da madeira.

Água de adesão

- Localizada no interior da parede celular;
- Unidas as micro fibrilas na forma de vapor;
- Retirada mais difícil e com maior tempo e dispêndio de energia.

Ponto de saturação das fibras - PSF

- Momento teórico em que toda água de capilaridade foi retirada, remanescendo na madeira toda água higroscópica.
- Situado em torno de 28% de umidade da madeira (padronização)
- A partir deste ponto, ocorrem as variações dimensionais da madeira
 - Disso pode ocasionar o aparecimento de rachaduras e empenamentos.

Dependência da umidade da madeira

- Umidade máxima da madeira em função da íntima relação entre teor de umidade e densidade.

$$U_{MAX} = \left[0,28 + \left(\frac{1,50 - D_0}{1,50 \times D_0} \right) \right] \times 100$$

Valor padronizado do ponto de saturação das fibras (PSF)
Valor padronizado da densidade real
Densidade a 0% de umidade

Exemplo

Exemplo:

Qual é o teor máximo de umidade que a madeira Guaiaco (1,40 g/cm³) poderia conter?

$$U_{\max} = \left[0,28 + \left(\frac{1,50 - 1,40}{1,50 \times 1,40} \right) \right] \times 100 = 32,76\%$$

5

Determinação do teor de umidade da madeira

Secagem em estufa

- A umidade da madeira é calculada em função da relação do seu peso úmido (P_U) e seu peso seco (P_S);

$$tu = \left(\frac{P_U - P_S}{P_S} \right) \times 100$$

Peso úmido Peso seco

Exemplo

Uma amostra de madeira medindo 20 x 2,5 x 2,5 cm com um peso inicial de 185g apresentou, após seca em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, um peso constante de 133g. Pergunta-se qual seu teor de umidade?

$$TU = \frac{185 - 133}{133} \times 100 \Rightarrow TU = 39,1\%$$

Ou

$$TU = \left(\frac{185}{133} - 1 \right) \times 100 \Rightarrow TU = 39,1\%$$

Premissa

- Secar em estufa a $103 \text{ C} \pm 2 \text{ C}$ ate atingir peso constante;
 - Peso constante: a diferença de peso entre três pesagens sucessivas não dever ter variação maior que 0,1%.

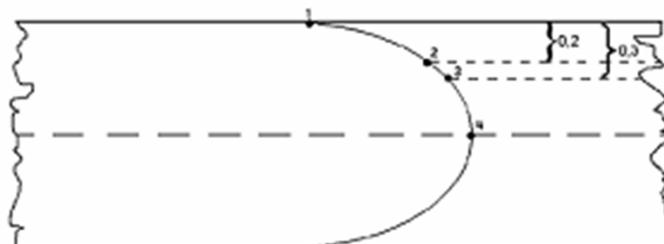
Aparelhos elétricos

- Baseados na resistência da madeira a passagem de uma corrente continua.
- Assim, o conteúdo de água existente na madeira facilita a passagem da corrente.
 - Quanto mais úmido, maior a passagem

■ Desvantagem:

- Imprecisão em teores de umidade muito baixos;
- Imprecisão em teores de umidade acima de 30%;
- Podem estar restritos a uma leitura superficial

- A umidade dentro de uma peça e' representada por uma distribuição parabólica;
- A medição deve ser tomada a profundidade entre 20% e 30% da espessura da peça.



6

Contração e inchamento

Contração e inchamento volumétrico

- A mudança de volume da madeira é verificada quando esta possui entre 0% e 28% de teor de umidade.
- Esses comportamentos são resultados de um processo denominado “sorção”:
 - Adsorção – capacidade de assimilação de água pela madeira, promovida pelo aumento da umidade do ar;
 - Desorção – termo que designa a perda de água pela madeira, em função da diminuição da umidade do ar.

- O aumento do volume (inchamento) se dá pela inclusão de moléculas de água nos espaços submicroscópicos e nas regiões amorfas.
 - Da mesma forma, a contração ocorre pela saída das moléculas desses mesmos espaços.
 - Assim, o aumento do volume é proporcional:
 - Ao aumento do teor de umidade;
 - A densidade da madeira.
-
- A alteração do volume da madeira depende da água contida no interior da parede celular.
 - Portanto, só ocorre abaixo do PSF.

Inchamento: 0% ⇒ 28%

Contração: 28% ⇒ 0%

Inchamento volumétrico máximo

- Baseado na diferença das dimensões da madeira em estado absolutamente seco (0% tu) e em com umidade acima do PSF.

$$\alpha V_{MAX} = \left(\frac{V_U - V_0}{V_0} \right) \times 100$$

Volume da madeira com umidade acima do PSF

Volume da madeira com 0% de umidade

Contração volumétrica máximo

- Também baseado na diferença das dimensões da madeira em estado absolutamente seco (0% tu) e em com umidade acima do PSF.

$$\beta V_{MAX} = \left(\frac{V_U - V_0}{V_U} \right) \times 100$$

Volume da madeira com umidade acima do PSF

Volume da madeira com 0% de umidade

Exemplo

Uma peça de madeira tem volume úmido de 97 cm³ (no estado verde) e volume absolutamente seco de 89 cm³. Quais os coeficientes de contração e inchamento volumétricos?

Coeficiente de inchamento volumétrico

$$\alpha V_{MAX} = \left(\frac{V_U - V_0}{V_0} \right) \times 100$$

$$\alpha V_{MAX} = \left(\frac{97 - 89}{89} \right) \times 100$$

$$\alpha V_{MAX} = 8,99\%$$

Coeficiente de contração volumétrico

$$\beta V_{MAX} = \left(\frac{V_U - V_0}{V_U} \right) \times 100$$

$$\beta V_{MAX} = \left(\frac{97 - 89}{97} \right) \times 100$$

$$\beta V_{MAX} = 8,25\%$$

Relações

$$\beta V_{MAX} = \left(\frac{\alpha V_{MAX}}{1 + \alpha V_{MAX}} \right) \times 100$$

$$\alpha V_{MAX} = \left(\frac{\beta V_{MAX}}{1 - \beta V_{MAX}} \right) \times 100$$

Exemplo:

O fator de inchamento volumétrico máximo de uma madeira é 15%. Qual é seu fator de contração volumétrica máxima?

$$\beta V_{MAX} = \left(\frac{0,15}{1 + 0,15} \right) \times 100$$

$$\beta V_{MAX} = 13\%$$

Contração e inchamento lineares

- A variação dimensional ocorre diferentemente em cada um dos planos anatômicos:
 - Longitudinal
 - Radial
 - Tangencial

- A determinação dessa variação da-se de forma semelhante ao cálculo volumétrico.

$$\alpha I_{MAX} = \left(\frac{I_U - I_0}{I_0} \right) \times 100$$

$$\beta I_{MAX} = \left(\frac{I_U - I_0}{I_U} \right) \times 100$$

- A maior alteração dimensional da madeira ocorre no sentido no sentido tangencial, seguido do sentido radial.
- A relação de grandeza aproxima-se de:

β_{tag}	:	β_{rad}	:	β_{long}
1,6 - 2,0	:	1,0	:	0,1

Contração e inchamento para algumas espécies de madeira

Espécie	β_{long}	β_{rad}	β_{tang}	β_{vol}
<i>Ochroma lagopus</i> (balsa)	0,6	3,0	3,5	7,1
<i>Populus sp.</i> (Choupo)	0,7	3,0	7,1	11,8
<i>Cedrela sp.</i> (cedro)	-	4,0	6,0	12,0
<i>Araucaria angustifolia</i>	-	4,0	8,0	13,0
<i>Pinus echinata</i>	0,4	4,4	7,7	12,5
<i>Ocotea porosa</i> (imbuia)	-	2,7	6,3	9,8
<i>Tectona grandis</i> (Teca)	0,6	3,0	5,8	9,4
<i>Bowdichia virgilioides</i> (sucupira)	-	5,3	8,4	15,5
<i>Guaiacum officile</i> (guáiaço)	0,1	5,6	9,3	15,0

Exemplo

Uma viga de madeira de dimensões 150cm x 15cm x 20cm, acidentalmente caiu em um rio. No dia seguinte, foi retirada e apresentou as seguintes dimensões: 151,5cm x 15,8cm x 22,3cm. Determine o inchamento linear em cada plano anatômico e o inchamento volumétrico.

Inchamento tangencial

$$\alpha Tan = \left(\frac{Tan_U - Tan_0}{Tan_0} \right) \times 100$$

$$\alpha Tan = \left(\frac{22,3 - 20}{20} \right) \times 100$$

$$\alpha Tan = 11,5\%$$

Inchamento radial

$$\alpha Rad = \left(\frac{Rad_U - Rad_0}{Rad_0} \right) \times 100$$

$$\alpha Rad = \left(\frac{15,8 - 15}{15} \right) \times 100$$

$$\alpha Rad = 5,3\%$$

Inchamento longitudinal

$$\alpha_{Long} = \left(\frac{Long_U - Long_0}{Long_0} \right) \times 100$$

$$\alpha_{Long} = \left(\frac{151,5 - 150}{150} \right) \times 100$$

$$\alpha_{Long} = 1,0\%$$

Inchamento volumétrico

$$\alpha_V = \left(\frac{V_U - V_0}{V_0} \right) \times 100$$

$$\alpha_V = \left(\frac{53.379,51 - 45.000,00}{45.000,00} \right) \times 100$$

$$\alpha_V = 18,62\%$$

7

Retratibilidade e anisotropia

Coefficiente de retratibilidade

- Representa a variação dimensional da madeira a cada 1% de variação de umidade.
- Pode ser calculado para todos os sentidos anatômicos e para o volume.

$$Q = \frac{(I_{12\%} - I_{0\%}) \times P_0}{(P_{12\%} - P_{0\%}) \times I_0}$$

Coeficiente de retratibilidade para algumas espécies de madeira

Espécie	Q_{tang}	Q_{rad}
<i>Lophira sp.</i>	0,40	0,31
<i>Fagus sp.</i>	0,44	0,19
<i>Pinus sp.</i>	0,26	0,15
<i>Tectona grandis</i>	0,24	0,13
<i>Ocotea porosa</i>	0,27	0,12

Exemplo

Uma peça de teca (*Tectona grandis*), com coeficiente de retratibilidade de 0,24, possui 10cm no sentido tangencial e será secado de 14% para 6% de umidade. De que grandeza será a alteração de sua dimensão nesse sentido?

$$U : 14\% \rightarrow U : 6\%$$

$$\Delta : 8\%$$

$$\Delta \times Q \rightarrow 8 \times 0,24 = 2,016\%$$

$$I_{UMIDA} = (I_0 + 2,016) \times I_0 \rightarrow I_{UMIDA} = 1,02016 \times I_0$$

$$\frac{I_{UMIDA}}{1,02016} = I_0 \rightarrow \frac{10}{1,02016} = I_0 \rightarrow I_0 = 9,799 \text{ cm}$$

**Dimensão da peça
com 6% de umidade**

$$U : 0\% \rightarrow U : 6\%$$

$$\Delta : 6\%$$

$$\Delta \times Q \rightarrow 6 \times 0,24 = 1,44\%$$

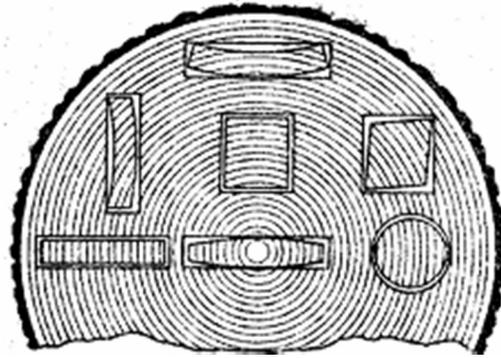
$$I_{UMIDA} = (I_0 + 0,0144) \times I_0 \rightarrow I_{UMIDA} = 1,0144 \times I_0$$

$$I_{UMIDA} = 1,0144 \times 9,67 \rightarrow I_0 = 9,81 \text{ cm}$$

**Dimensão da peça
com 6% de umidade**

Anisotropia dimensional

- A madeira incha e contrai desigualmente nos diferentes sentidos (longitudinal, tangencial e radial).
- Esse fato é causador das deformações verificadas em peças de madeira após a secagem.



Defeitos desenvolvidos durante a secagem da madeira, devidos ao fenômeno de anisotropia dimensional.

- O fator de anisotropia dimensional de contração (A_c) e de inchamento (A_i) é expresso pela relação entre os movimentos lineares tangencial e radial.

$$A_c = \frac{\beta_{Tang}}{\beta_{Rad}}$$

$$A_i = \frac{\alpha_{Tang}}{\alpha_{Rad}}$$

- O fator de anisotropia dimensional ideal é 1, o que indicaria:
 - inexistência de alteração nas dimensões da madeira, ou;
 - alterações no sentido tangencial e radial seriam iguais.

Coefficiente de Anisotropia	Qualidade da Madeira
< 1,5	Madeira muito estável
1,6 até 2,0	Média baixa
2,0 até 2,5	Média alta
>2,6	Madeira muito instável

EXERCÍCIO:

Dadas as tabelas com dados de três corpos de provas em diferentes condições de umidade, calcule:

- a) Densidade básica;
- b) Contração:
 - i. radial;
 - ii. tangencial;
 - iii. longitudinal;
 - iv. volumétrica;
- c) Coeficiente de anisotropia de contração;
- d) Coeficiente de retratibilidade:
 - i. radial;
 - ii. tangencial;
 - iii. longitudinal;
 - iv. volumétrica;

Teor de umidade: 0,00					
CP	Massa (g)	Dimensões (mm)			Volume (cm ³)
		Radial	Tangencial	Longitudinal	
1	112	48	49	102	239,904
2	96	49	50	101	247,45
3	105	50	48	102	244,8
Teor de umidade: 12,00					
CP	Massa (g)	Dimensões (mm)			Volume (cm ³)
		Radial	Tangencial	Longitudinal	
1	115	51	49	102	254,898
2	99	51	51	101	262,701
3	111	51	50	102	260,1
Teor de umidade: 75,00					
CP	Massa (g)	Dimensões (mm)			Volume (cm ³)
		Radial	Tangencial	Longitudinal	
1	121	53	51	103	278,409
2	103	52	51	101	267,852
3	117	52	51	102	270,504

Resultados:

Densidade básica:				
CP	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	
1	112	278,409	0,40	
2	96	267,852	0,36	
3	105	270,504	0,39	
Contração:				
CP	Radial (%)	Tangencial (%)	Longitudinal (%)	Volumétrica (%)
1	9,43	3,92	0,97	13,83
2	5,77	1,96	0,00	7,62
3	3,85	5,88	0,00	9,50

Coeficiente de anisotropia de contração				
CP	Ac			
1	0,42			
2	0,34			
3	1,53			
Coeficiente de retratibilidade				
CP	Radial (%)	Tangencial (%)	Longitudinal (%)	Volumétrica (%)
1	2,33	0,00	0,00	2,33
2	1,31	0,64	0,00	1,97
3	0,35	0,73	0,00	1,09

8**Propriedades térmicas**

Propriedades térmicas

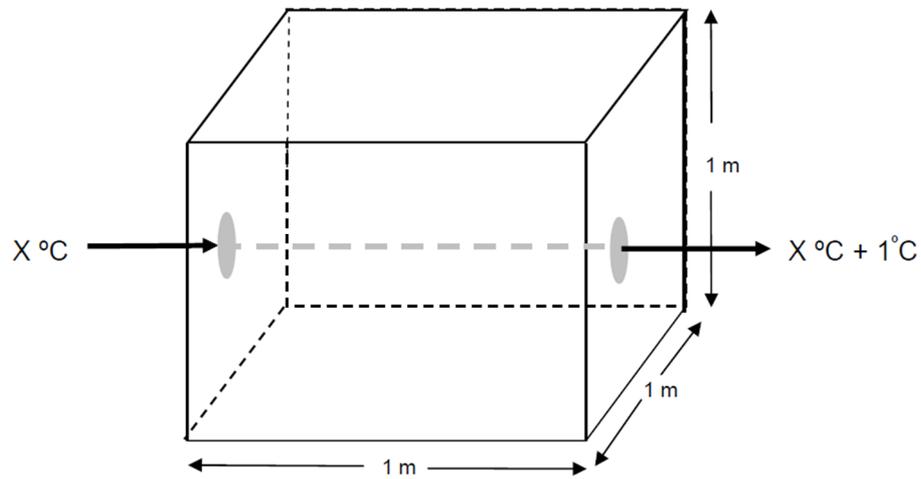
- A madeira possui quatro propriedades térmicas:
 - Condutividade
 - Calor específico
 - Transmissão térmica
 - Coeficiente de expansão térmica

Condutividade térmica

- É a medida da taxa de fluxo de calor por meio de materiais submetidos a uma gradiente de temperatura.
- Atinge valores muito pequenos se comparado à outros materiais, principalmente os metais.
- Interessante para obras e aparatos que necessitem de isolamento térmico.

coeficiente de condutividade térmica

- Indica a quantidade de calor conduzido através de um cubo de 1 m^3 ($1 \times 1 \times 1$) quando este é submetido à uma diferença de temperatura entre seus lados opostos igual a 1 C .
- Unidade: kcal/m.h. C



- Existe uma aproximação matemática para determinar o coeficiente de condutividade térmica da madeira pro meio da densidade aparente (12% tu).

$$\lambda_{12} = 0,168 \times \delta_{12} \times 0,022$$

Constantes

Densidade aparente à 12% de umidade (kg/m³)

- A variação da condutividade em função da temperatura pode ser calculada por:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times [1 - (1,1 - 0,98 \times \delta_0) \times (t_2 - t_1)] \times 100$$

Temperatura final
Temperatura inicial

↑
↑

Coeficiente de condutividade
térmica da madeira na
temperatura t1
Densidade da madeira a 0% tu

- A variação da condutividade em função do teor de umidade é dada por:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times [1 - 0,0125 \times (tu_2 - tu_1)]$$

umidade final
Umidade inicial

↑
↑

Coeficiente de condutividade
térmica da madeira na umidade tu1

- É possível calcular a resistência térmica do material, ou seja, sua capacidade isolante.

$$r_{12} = \frac{1}{\lambda_{12}}$$

Coeficiente de condutividade térmica da madeira

- Para várias camadas de materiais ou espécies, as resistências térmicas são somadas.

MATERIAL	Kcal / m.h.°C
Vácuo	0,00
Ar	0,0216
Poliestireno expandido (isopor)	0,035
Lã de vidro (20 kg/m ³) seca	0,05
Lã de vidro (20 kg/m ³) encharcada	0,10
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

Quanto maior a densidade, maior será a condutividade térmica;

Quanto maior o teor de umidade, maior será a condutividade térmica;

Quanto maior o teor de extrativos, maior será a condutividade térmica da madeira;

Quanto maior o aumento da temperatura, a partir da temperatura em que se determina um coeficiente de condutividade térmica de referência, maior será a condutividade térmica da madeira.

CALOR ESPECÍFICO DA MADEIRA

- Relação entre a capacidade de aquecimento do material e a capacidade de aquecimento da água.
- Representa a quantidade de energia necessária para causar a troca de uma unidade de temperatura em uma unidade de massa.
- ce água = 1 kcal/kg C
- Para a madeira, o calor específico independe da densidade ou da espécie, mas é influenciada pela umidade.

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

- A madeira tem c_e relativamente alto, se comparado a outros materiais.
- Ao aplicar uma quantidade de calor, a madeira se aquecerá menos do que outros materiais com c_e menor.

- Calor específico da madeira seca:

$$c_e = 0,2692 + 0,00108 \times t$$

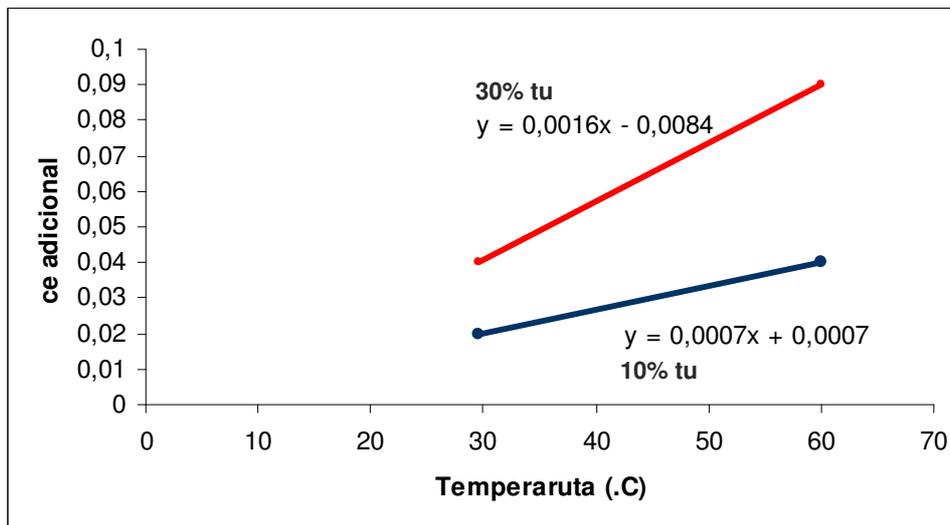
Temperatura (°C)



- Calor específico da madeira úmida:

$$ce = \frac{tu + ce_0 + A}{1 + tu}$$

↙ Calor específico da madeira seca
↙ Calor específico adicional
↙ Temperatura (°C)



EXPANSÃO TÉRMICA

- É a medida da troca de dimensão causada pela troca de temperatura
 - Expande pelo aquecimento
 - Retrai pelo resfriamento
- No sentido paralelo, o coeficiente de expansão térmica é extremamente baixo.
 - $3 \cdot 10^{-6}$ a $5 \cdot 10^{-6}$
- Nos sentidos radial e tangencial, verifica-se relação com a densidade
 - De 5 a 10 vezes maior que o paralelo

Madeiras mais pesadas

$$cr = 45 \times \delta_0 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$$

$$ct = 58 \times \delta_0 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$$

Madeiras mais leves

$$cr = 56 \times \delta_0 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$$

$$ct = 81 \times \delta_0 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$$

TRANSMISSÃO TÉRMICA

- É o quão rápido o material absorve o calor de suas imediações.

$$a = \frac{\lambda}{ce.\delta}$$

Diagram illustrating the formula for thermal transmission coefficient a . The numerator is λ (Coefficient of thermal conductivity) and the denominator is $ce.\delta$ (Product of specific heat c , density e , and thickness δ). Arrows point from the labels to the corresponding variables in the formula.

- É influenciada inversamente pela umidade e pela densidade da madeira.
- Madeira = 0,0016 cm²/s
- Aço = 0,1290 cm²/s
- Sensação ao tato

9

Propriedades acústicas

Principais conceitos relacionados

- Som
 - Impressão produzida por vibrações de corpos, captadas pelo ouvido.
 - Propagação por ondas.

- Frequência
 - Frequência com que as ondas se propagam
 - Frequências inferiores à 20 Hz (infra sonoras) e superiores à 20.000 Hz (ultra sonoras) não provocam sensação do ouvido humano.

- Velocidade do som
 - Depende da densidade e da elasticidade

$$C = \sqrt{980665 \times \frac{E}{\delta}}$$

Velocidade do som
Módulo de Elasticidade
Densidade aparente

Exemplos de outros materiais

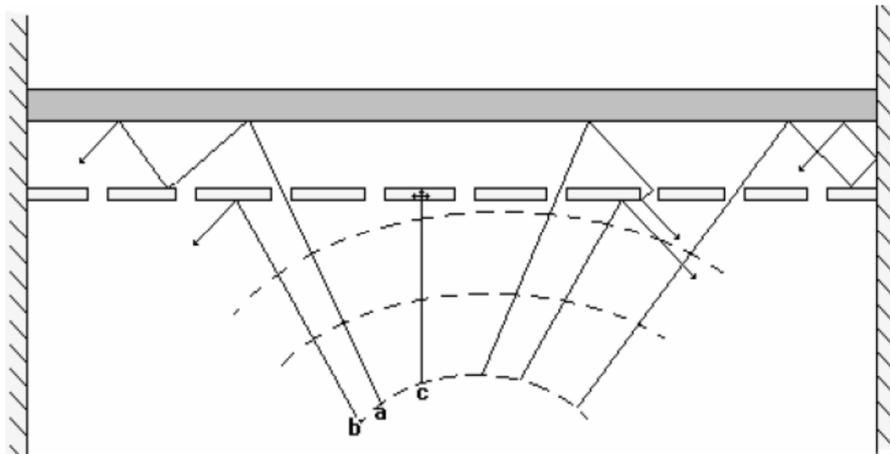
ar.....340 m/s	cortiça.....500 m/s
aço.....5.000 m/s	borracha.....500 m/s
cimento.....4.000 m/s	água.....1.450 m/s

- Intensidade do som
 - Indica a potência da onda por unidade de área

Isolamento do som

- Propagação sonora no ar
 - A acústica de recintos depende da relação entre o som refletido e o absorvido por seus diferentes materiais.
 - É influenciada pela geometria das peças, a qual repercute na freqüência e reflexão do som.

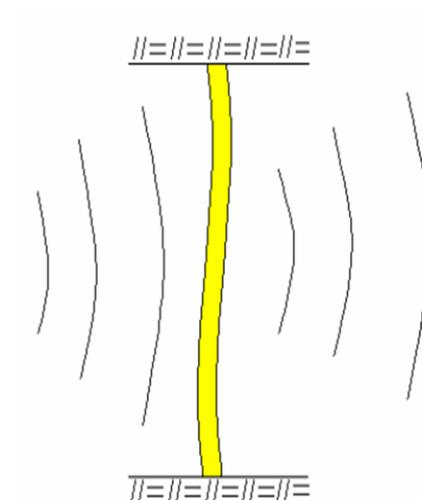
- a. penetração de ondas nos espaços e perda de energia por reflexão sucessiva.
- b. reflexão parcial da onda sonora
- c. absorção da onda sonora



Exemplo de absorção de ondas sonoras de alguns materiais.

MATERIAL	GRAU DE ABSORÇÃO (A)	
	120 Hz	2.000Hz
Janela aberta (referência)	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

- O choque de ondas sonoras sobre uma parede provoca vibração dessa parede.
- Essa vibração propaga o som para ambientes vizinhos.



- O isolamento do som propagado pelo ar, por uma parede de camada única, constituída de um material pode ser determinado por:

$$R = 20 \log(0,004 \times m \times f)$$

Diagram illustrating the variables in the sound insulation formula:

- R : Capacidade de isolamento
- m : Massa
- f : Frequência

MATERIAL	COEF. DE ABSORÇÃO DE RUIDOS (dB)	MASSA DO MATERIAL (kg/ m ²)
Compensado 5 mm	18	2,3
Vidro de 3 a 4 mm	30	12,0
Vidro de 7 a 8 mm	17	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 de palha prensada não caiada	21	14,0
¼ muro chapa metálica de ferro 2mm	33	160,0