




Sistemas Estruturais II

Madeira

UCDB – 2023 A

Prof. Willian de Araujo Rosa, M.Sc.



Livro-texto



ESTRUTURAS DE MADEIRA

Walter Pfeil
Michèle Pfeil

SEXTA EDIÇÃO

LTC



Ementa resumida

- 1. A madeira como material de construção**
- 2. Produtos de madeira e sistemas estruturais**
- 3. Propriedades mecânicas – bases de cálculo**
- 4. Ligações de peças estruturais**
- 5. Peças tracionadas**
- 6. Vigas**
- 7. Peças comprimidas – Flambagem**
- 8. Vigas em treliça**

Vantagens

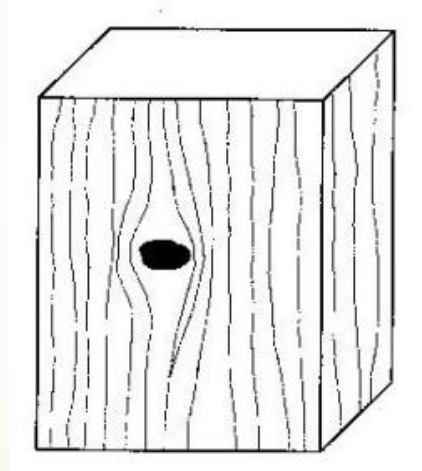
- Na flexão resiste tanto a esforços de tração como de compressão;
- Baixo peso próprio e grande resistência mecânica;
- Grande capacidade de absorver choques;
- Boas características de isolamento térmico e acústico;
- Grande variedade de padrões;
- Facilidade de ser trabalhada;
- Ligações fáceis e simples
- Custo de produção reduzido ⇒ reservas renováveis.

Desvantagens

- Material heterogêneo e anisotrópico;
- Formas limitadas: alongadas e de seção transversal reduzida;
- Deterioração fácil;
- Combustível;
- Variações volumétricas x Variação de umidade

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

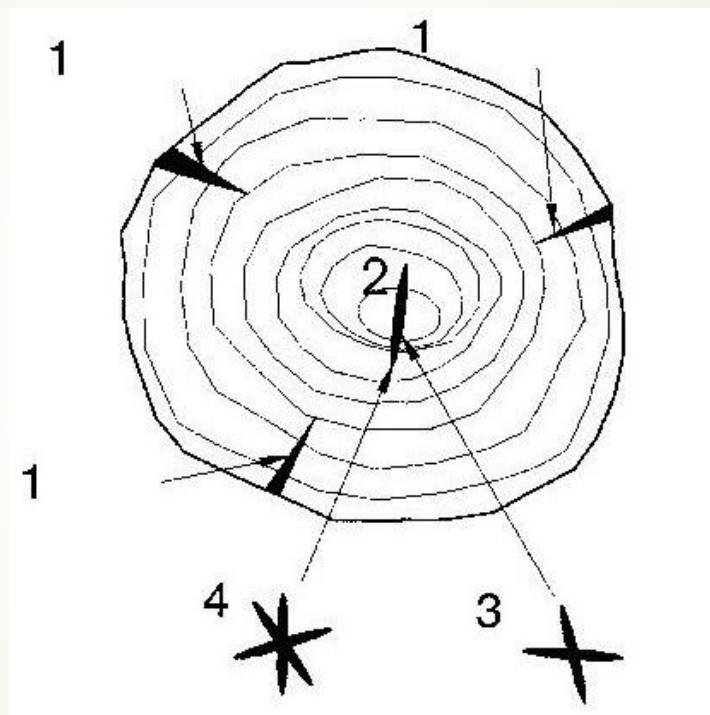
Nós



imperfeições da madeira nos pontos dos troncos onde existiam galhos

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

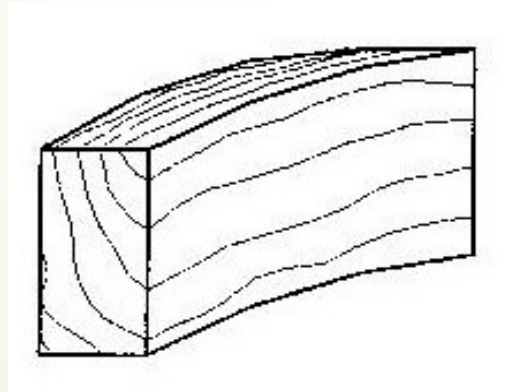
Fenda



são aberturas nas extremidades das peças originadas pela secagem rápida da superfície

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

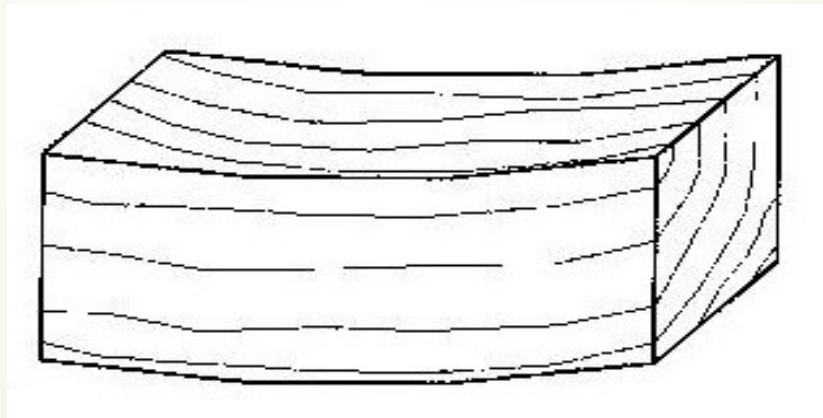
Abaulamento



é o encurvamento na direção da largura da peça

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

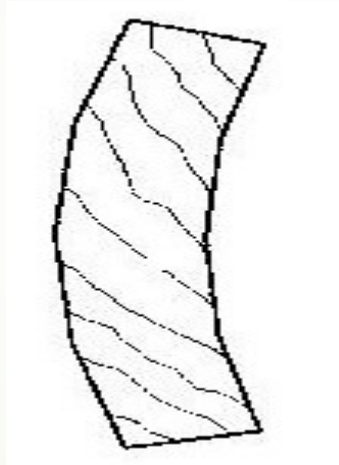
Arqueadura



é o encurvamento na direção longitudinal, ou seja, no comprimento da peça

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

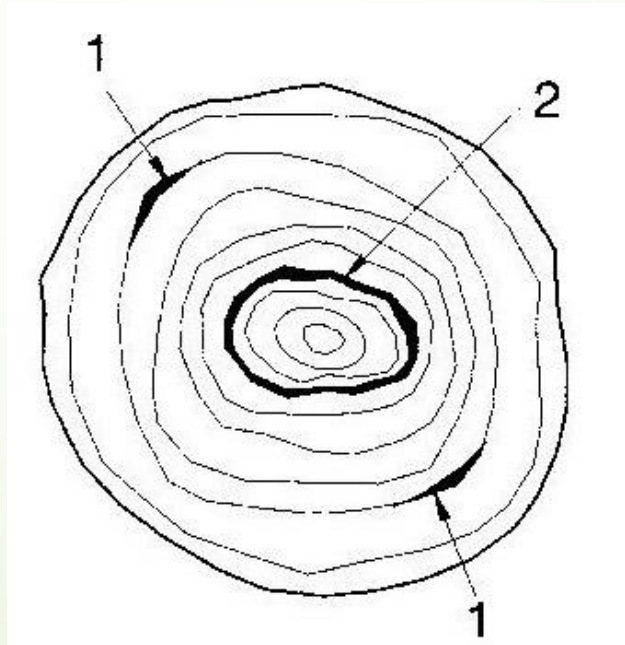
Empenamento



é o encurvamento no sentido transversal da peça

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

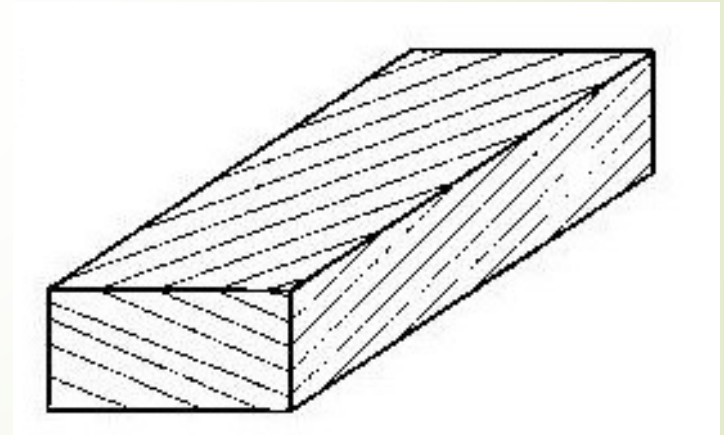
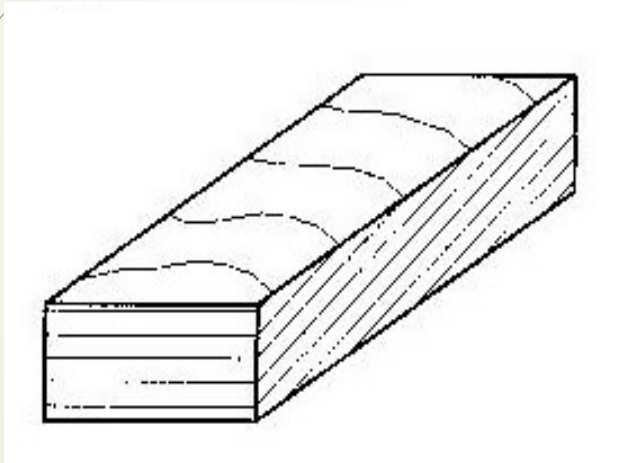
Gretas ou ventas



é a separação entre os anéis anuais

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

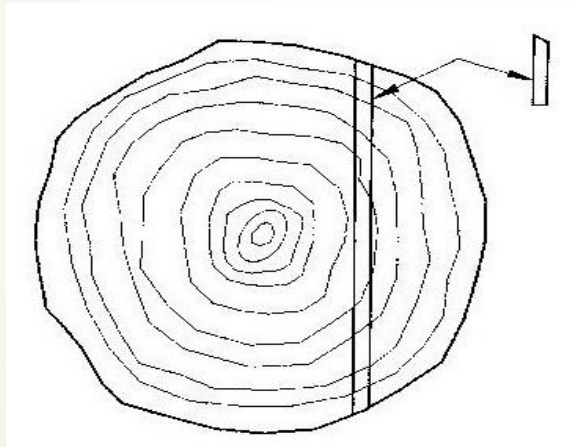
Fibras reversas



são fibras não paralelas ao eixo da peça

PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

Esmoada ou quina morta



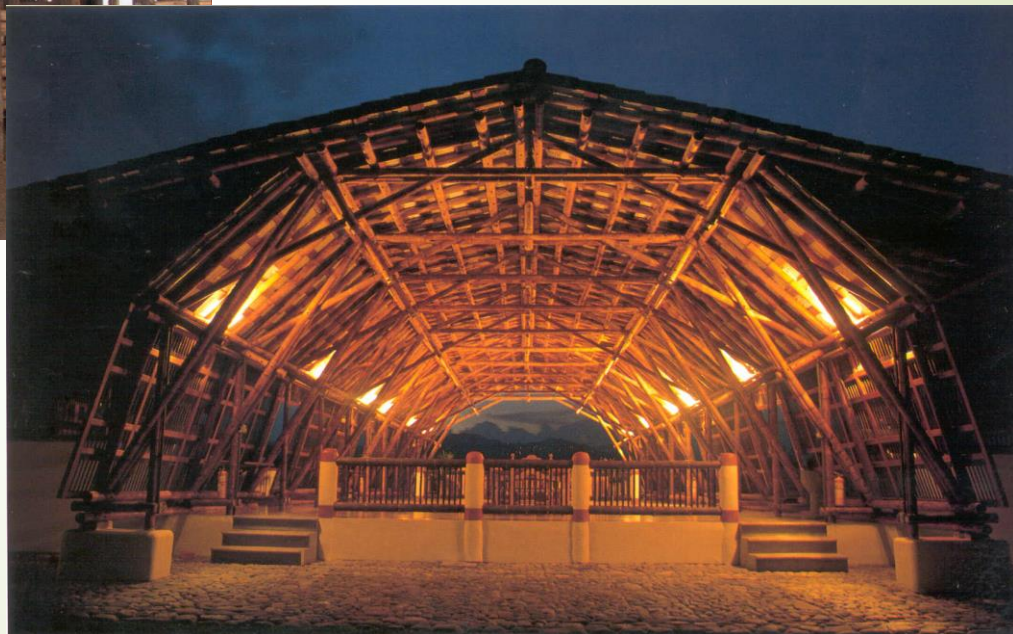
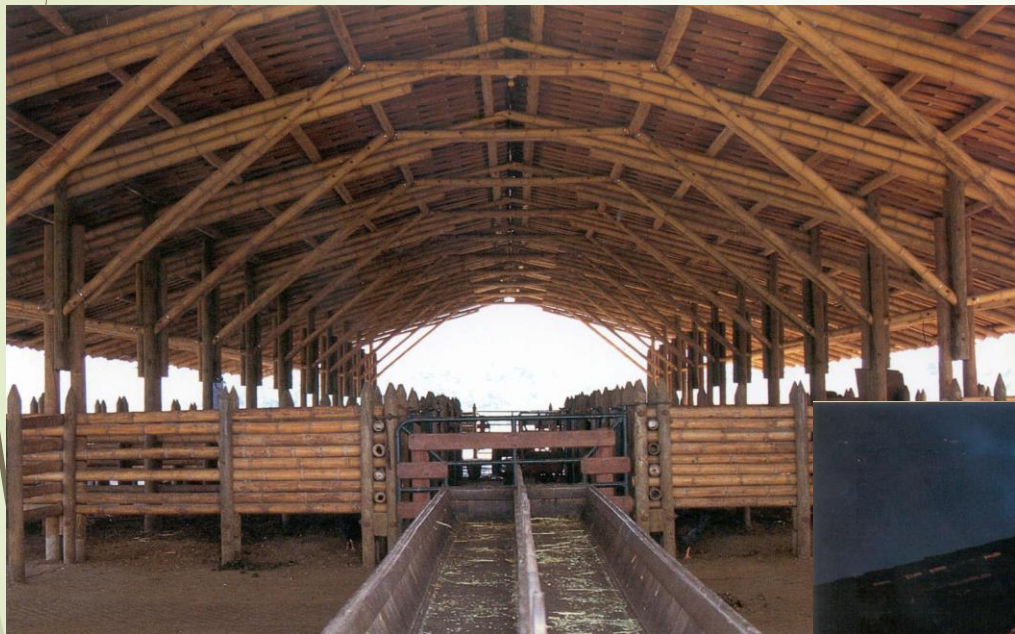
é o canto arredondado formado pela curvatura natural do tronco

Utilização de bambu em estruturas



Abdul Rendado - Europa

Utilização de bambu em estruturas



Abdul Rendado - Europa

Utilização de bambu em estruturas



Abdul Rendado - Europa

Utilização de bambu em estruturas



Abdul Rendado - Europa

Ponte de madeira roliça

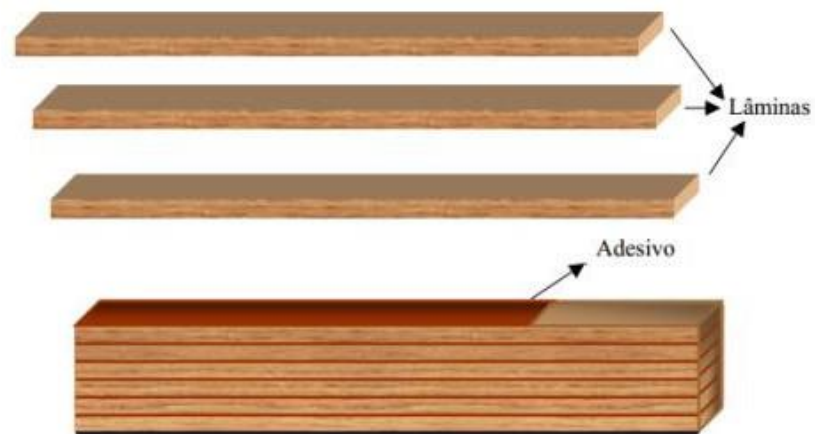


Ponte de madeira roliça



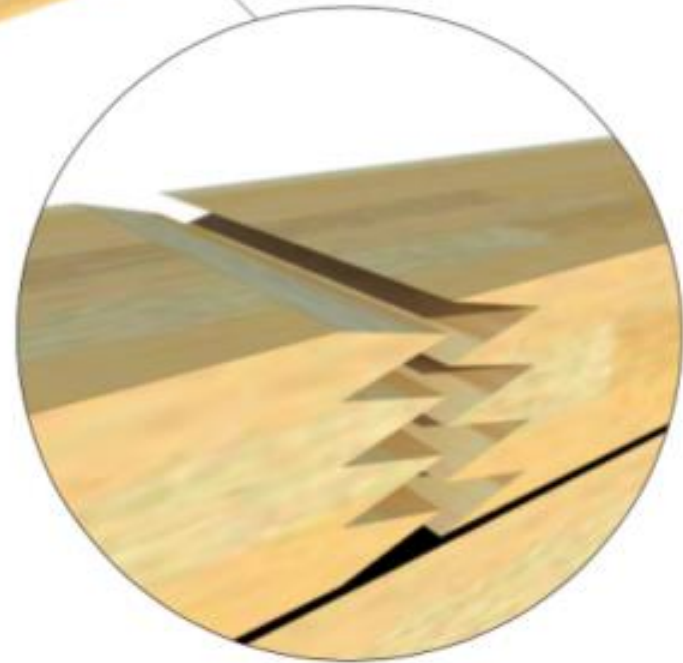
Madeira Laminada e Colada

- **MDP** é a abreviação de Medium Density Particleboard.
- **MDF** significa Medium Density Fiberboard.
- O **Compensado** é um painel de madeira industrializada, feito de lâminas de madeira coladas, cujo sentido vai sendo alternado em 90°.
- **OSB** - Oriented Strand Board é material derivado da madeira, composto por pequenas lascas de madeira orientadas em camadas cruzadas seguindo uma determinada direção, que lhe conferem alta resistência e rigidez.





Linhas de cola e lâminas de madeira



Detalhe emenda dentada



Estruturas em madeira laminada



Estruturas em madeira laminada



Estruturas em madeira laminada



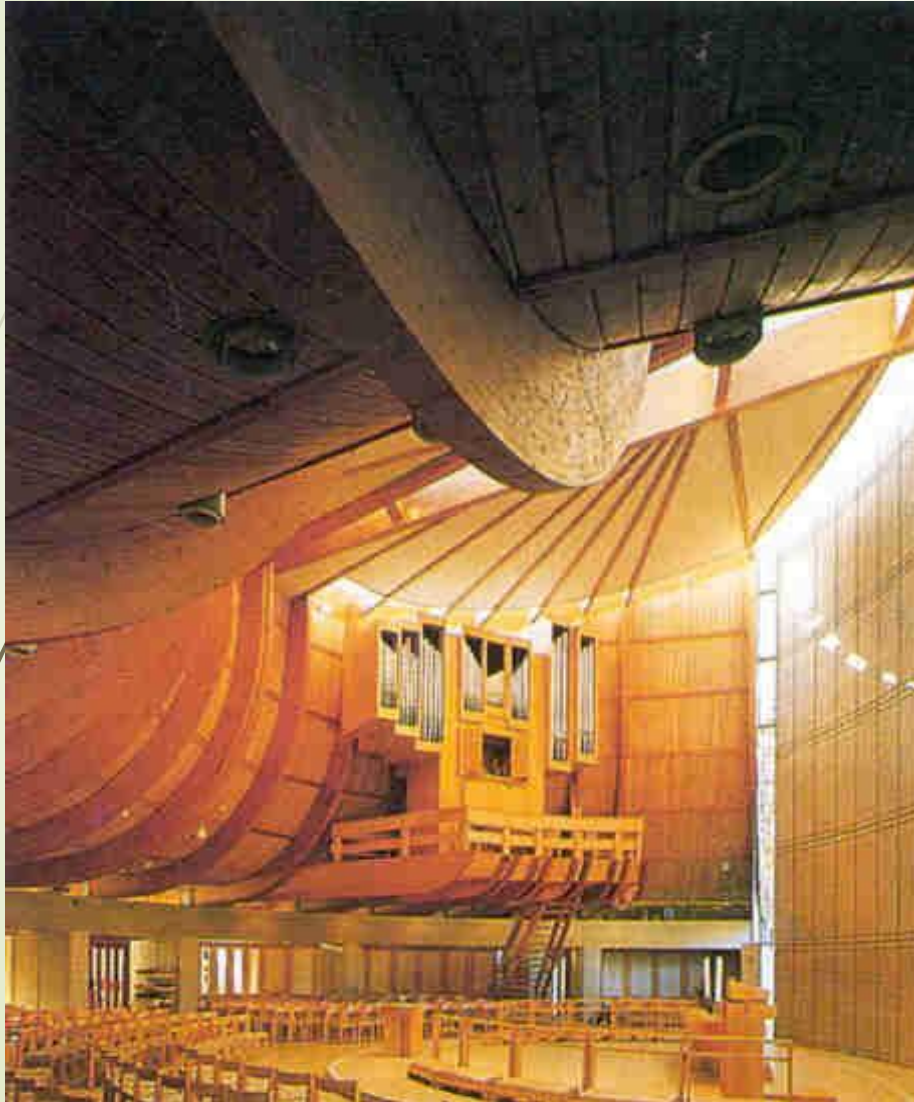
Estruturas em madeira laminada



Estruturas em madeira laminada



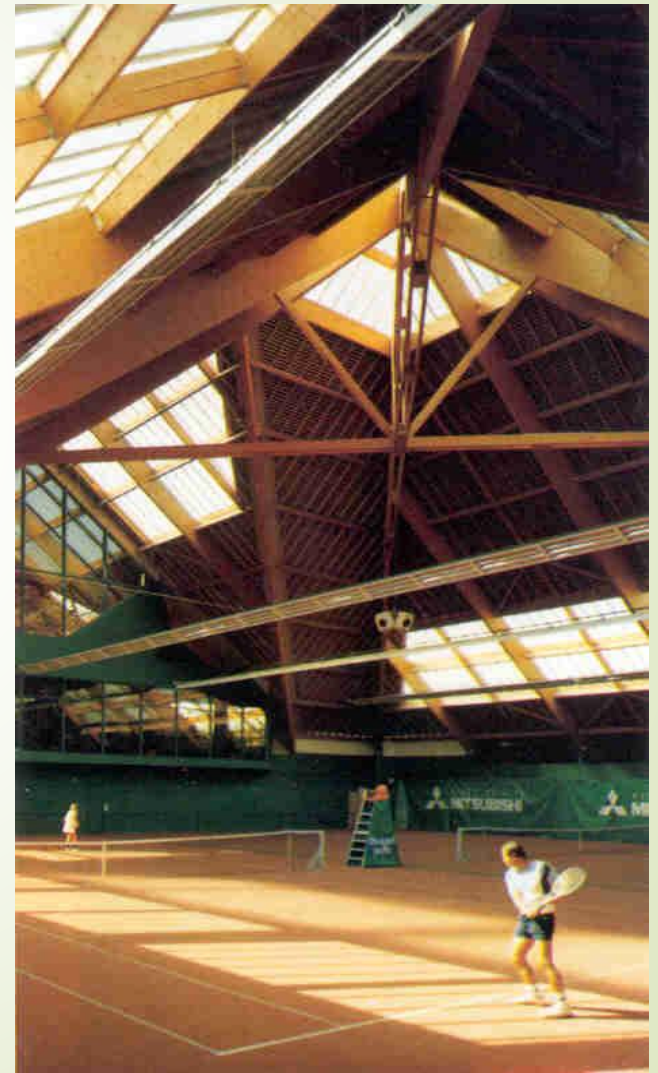
Estruturas em madeira laminada



Estruturas em madeira laminada



Estruturas em madeira laminada



Estruturas em madeira laminada





Classificação das árvores

- **Madeiras duras**
 - dicotiledôneas
 - Angiospermas – folhas achatadas e longas
 - Crescimento lento
 - Peroba, ipê, aroeira, carvalho
- **Madeiras macias**
 - coníferas
 - Gimnospermas – folhas agulhadas ou escamadas
 - Crescimento rápido
 - Pinheiro-do-paraná, pinheirinho, pinus

Classificação das madeiras

► Classificação tecnológica

- Madeiras finas → marcenaria: Louro, Cedro
- Madeiras duras ou de lei → construção: Cabriúna, Grápia;
- Madeiras resinosas → construções provisórias: Pinho;
- Madeiras brandas → pequena durabilidade: Timbaúva.

Crescimento das árvores

► Raiz

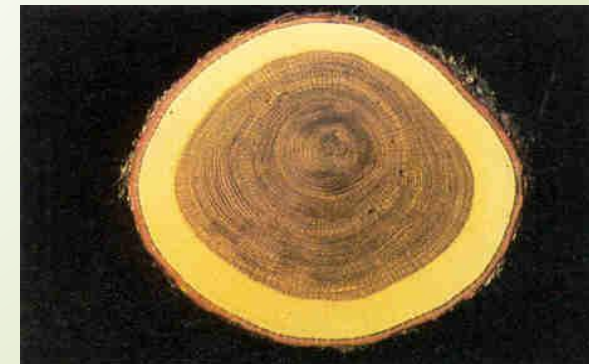
• Caule

► Copa



Crescimento das árvores

- **Casca**
 - Protege as árvores contra agentes externos
- **Alburno ou branco**
 - Camada formada por células vivas que conduzem seiva das raízes para as folhas
- **Cerne ou durâmen**
 - Parte resistente das árvores – células inativas
- **Medula**
 - Miolo central, mole
 - Vestígio do vegetal jovem



Características físicas

► Umidade

- Grande importância pois todas as propriedades mecânicas variam com o teor de umidade

► A água na madeira verde:

- Água de constituição das células vivas
 - Não é alterada pela secagem;
- Água de adesão ou impregnação
 - Satura as paredes da célula
- Água de capilaridade ou livre
 - Enche os canais do tecido lenhoso

Características físicas

- Ponto de Saturação das Fibras (PSF)
 - É o ponto onde a madeira perdeu toda a água livre
 - Não existe água livre mas as paredes e os tecidos estão saturados e inchados
 - A remoção da água livre não causa alteração de volume

PSF \cong 30% (variável em função da espécie)

Madeira seca ao ar

- **Fazendo-se a secagem por exposição ao ar**, começa a evaporar a água de impregnação ou adesão, até um ponto de equilíbrio entre a umidade do ar e a da madeira
- A remoção da **água de adesão** é acompanhada de variações volumétricas
 - Teor de umidade da madeira seca ao ar - 12 a 18%
- Referência para determinação das características físicas e mecânicas:
 - **Teor de umidade normal internacional igual a 15%**
 - **Brasil = 12%**
 - **Campo Grande / MS = 14%**

Propriedades físicas e mecânicas da madeira

Umidade

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100$$

onde m_i é a massa inicial da madeira e m_s é a massa da madeira seca.

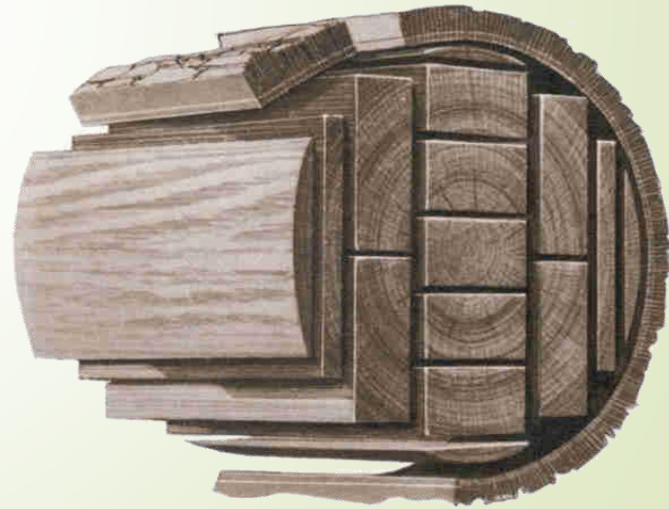
A umidade na madeira

| Denominação | Teor de umidade |
|-----------------------------|------------------------|
| Madeira verde | $U > 30\%$ |
| Madeira comercialmente seca | $18 \leq U < 23\%$ |
| Madeira seca ao ar | $12 \leq U < 18\%$ |
| Madeira dessecada | $U < 12\%$ |

Abaixo de 23% de umidade pode-se considerar que a madeira está ao abrigo do ataque dos agentes de destruição (fungos e bactérias)

Produção

- Desdobro
 - Obtenção de peças estruturais de madeira maciça



Aparelhamento ou bitolagem

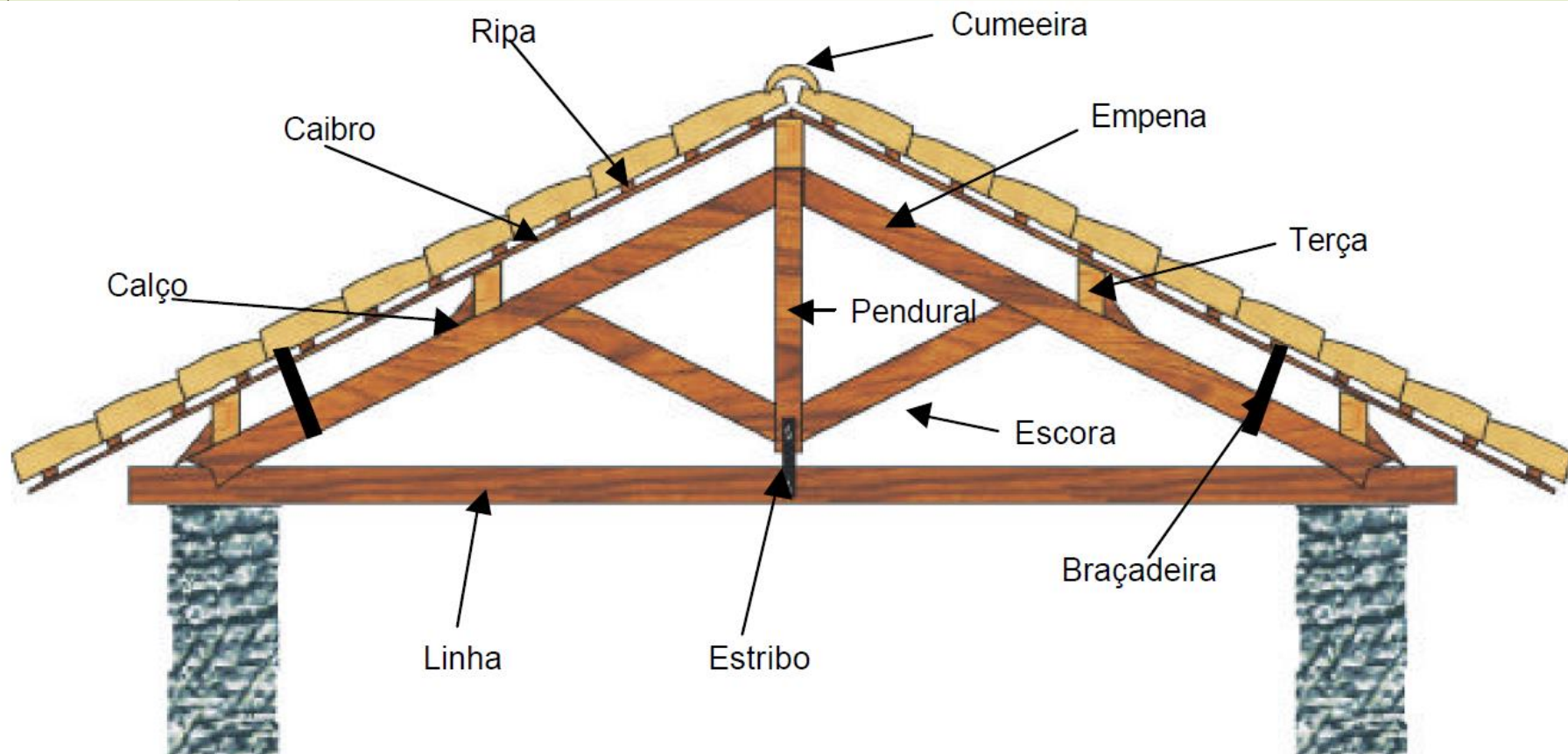
Nomenclatura de peças de madeira serradas

| Nome | Espessura (cm) | Largura (cm) |
|-------------|-----------------------|---------------------|
| Pranchão | > 7,0 | > 20,0 |
| Prancha | 4,0 - 7,0 | > 20,0 |
| Viga | >4,0 | 11,0 - 20,0 |
| Vigota | 4,0 - 8,0 | 8,0 - 11,0 |
| Caibro | 4,0 - 8,0 | 5,0 - 8,0 |
| Tábua | 1,0 - 4,0 | > 10,0 |
| Sarrafo | 2,0 - 4,0 | 2,0 - 10,0 |
| Ripa | < 2,0 | < 10,0 |

Dimensões da madeira beneficiada (cm)

- Soalho
 - Seção de 2,0 x 10,0
- Forro
 - Seção de 1,0 x 10,0
- Batente
 - Seção de 4,5 x 14,5
- Rodapé
 - Seção de 1,5 x 15,0
 - Seção de 1,5 x 10,0
- Taco
 - Seção de 2,0 x 7,5

Treliça Clássica – Tesoura

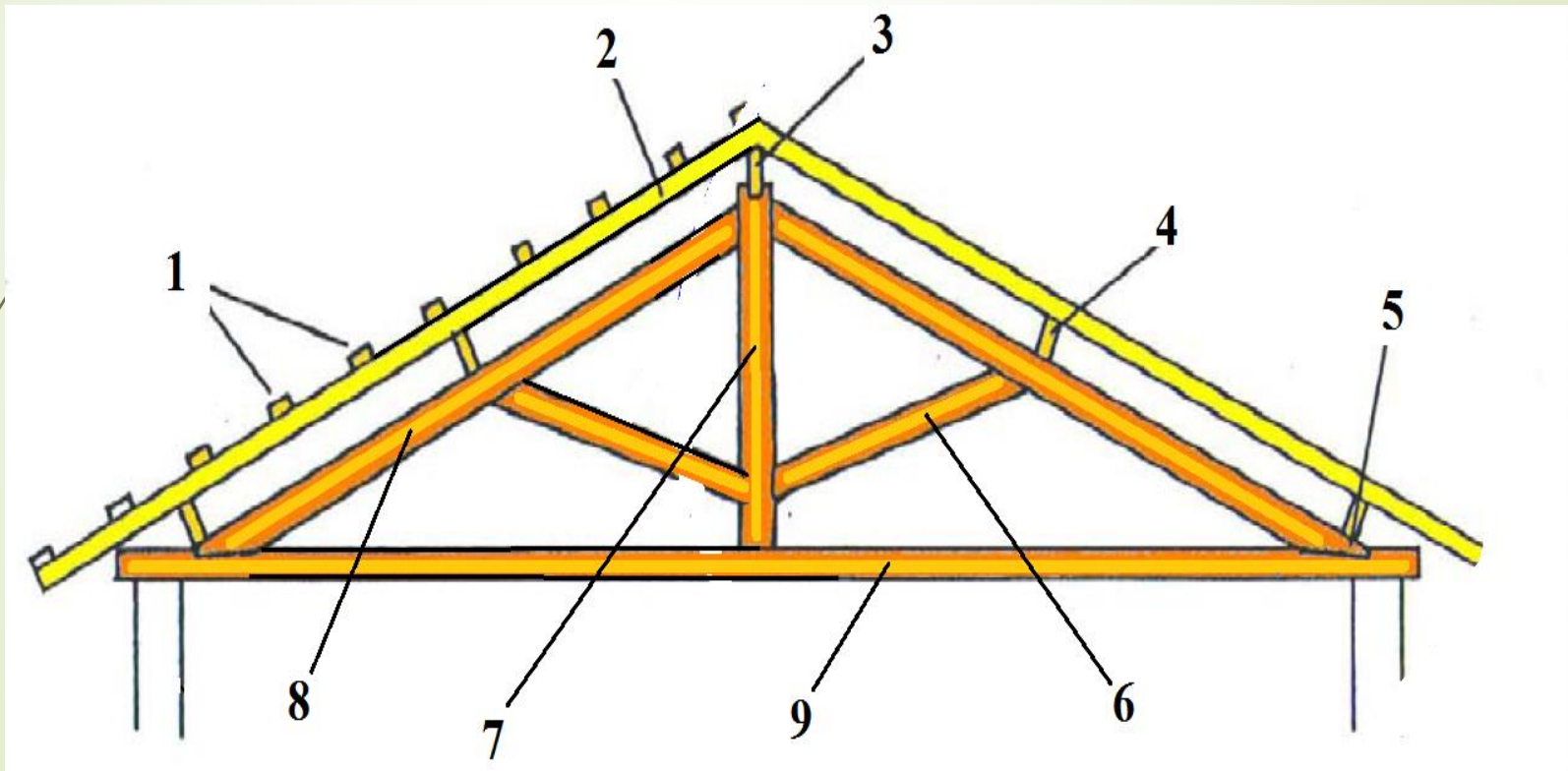


Questões Frequentes – Responda em uma frase de uma linha

- 1) Quais são as duas principais categorias de madeiras?
- 2) Como se determina a umidade da madeira? Qual a umidade-padrão de referência no Brasil? Qual é a umidade de uma madeira meio seca (ponto de saturação das fibras)?
- 3) Como são os principais defeitos das madeiras: Nós, Fendas, e Arqueadura?
- 4) Como identificar uma madeira compensada de uma madeira laminada e colada?
- 5) Qual a norma brasileira para cálculo e execução de estruturas de madeira?

Questões Frequentes – Resposta em uma frase de uma linha

- 6) Quais são os principais elementos de uma tesoura de madeira (veja desenho a seguir)?



Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Estado Limite Último

$$S_d < R_d$$

S_d – Solicitação de projeto

R_d – Resistência de projeto

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Resistência de cálculo, f_d

$$f_d = k_{\text{mod}} \frac{f_k}{\gamma_w}$$

$$k_{\text{mod}} = k_{\text{mod},1} \times k_{\text{mod},2} \times k_{\text{mod},3}$$

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Resistência Característica, f_k

A resistência mínima é fixada estatisticamente, admitindo-se uma certa porcentagem dos resultados possa ficar abaixo do mínimo.

Em geral **adota-se 5%** para essa porcentagem.

$$f_k = f_m - 1,645\sigma$$

f_m – resistência
média

σ – desvio padrão

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Tabela 3.1 – Variação estatística dos resultados de ensaios de peças isentas de defeitos. Relação entre resistência característica e resistência média (ASTM D2555, 1992)

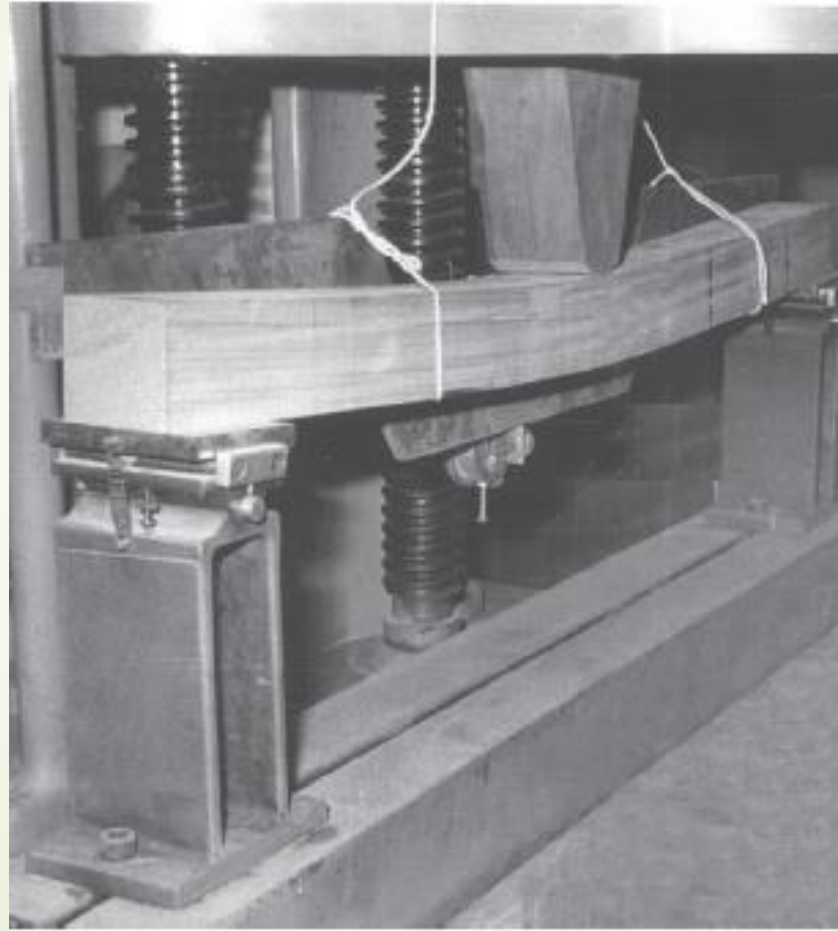
| Propriedades medida em ensaios | Coefficiente de variação (δ) | f_k/f_m |
|---|---------------------------------------|-------------|
| Resistência à flexão (f_M) | 16% | 0,74 |
| Módulo de elasticidade (E) | 22% | 0,64 |
| Resistência à compressão paralela às fibras (f_c) | 18% | 0,70 |
| Resistência à compressão perpendicular às fibras (f_{cn}) | 28% | 0,54 |
| Resistência ao cisalhamento (f_v) | 14% | 0,77 |
| Peso específico (γ) | 10% | 0,84 |

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Tabela 3.2 – Relação entre valores característicos de tensões resistentes (**NBR 7190**)

| | |
|---|-------------|
| $f_{c,k} / f_{t,k}$ | 0,77 |
| $f_{M,k} / f_{t,k}$ | 1,00 |
| $f_{cn,k} / f_{c,k}$ | 0,25 |
| $f_{v,k} / f_{c,k}$ (conífera) | 0,15 |
| $f_{v,k} / f_{c,k}$ (dicotiledôneas) | 0,12 |

Propriedades Mecânicas – Ensaio de Flexão



Propriedades Mecânicas – Valores médios

TABELA A.1.1 Valores médios de resistência e módulo de deformação longitudinal, para U = 12%, de madeiras dicotiledôneas nativas e de florestamento (NBR7190, 1996)

| Nome comum (dicotiledôneas) | Nome científico | $\rho_{ap}(12\%)$ (kg/m ³) | f_c (MPa) | f_t (MPa) | f_{tn} (MPa) | f_v (MPa) | E_c (MPa) |
|-----------------------------|------------------------------|---|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| Angelim-araroba | <i>Vataireopsis araroba</i> | 688 | 50,5 | 69,2 | 3,1 | 7,1 | 12876 |
| Angelim-ferro | <i>Hymenolobium</i> spp | 1170 | 79,5 | 117,8 | 3,7 | 11,8 | 20827 |
| Angelim-pedra | <i>Hymenolobium petraeum</i> | 694 | 59,8 | 75,5 | 3,5 | 8,8 | 12912 |
| Angelim-pedra Verdadeiro | <i>Dinizia excelsa</i> | 1170 | 76,7 | 104,9 | 4,8 | 11,3 | 16694 |
| Branquilha | <i>Terminalia</i> spp | 803 | 48,1 | 87,9 | 3,2 | 9,8 | 13481 |
| Cafearana | <i>Andira</i> spp | 677 | 59,1 | 79,7 | 3,0 | 5,9 | 14098 |
| Canafistula | <i>Cassia ferruainea</i> | 871 | 52,0 | 84,9 | 6,2 | 11,1 | 14613 |
| Sucupira | <i>Diplotropis</i> spp | 1106 | 95,2 | 123,4 | 3,4 | 11,8 | 21724 |
| Tatajuba | <i>Bagassa guianensis</i> | 940 | 79,5 | 78,8 | 3,9 | 12,2 | 19583 |

As propriedades de resistência e rigidez apresentadas neste anexo foram determinadas pelos ensaios realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo.

$\rho_{ap}(12\%)$ = massa específica aparente a 12% de umidade

f_c = resistência à compressão paralela às fibras

f_t = resistência à tração paralela às fibras

f_{tn} = resistência à tração normal às fibras

f_v = resistência ao cisalhamento

E_c = módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras

Propriedades Mecânicas – Valores médios

TABELA A.1.2 Valores médios de resistência e do módulo de deformação longitudinal, para U = 12%, de madeiras coníferas nativas e de florestamento (NBR7190, 1996)

| Nome comum (coníferas) | Nome científico | $\rho_{ap}(12\%)$ (kg/m ³) | f_c (MPa) | f_t (MPa) | f_{tn} (MPa) | f_v (MPa) | E_c (MPa) |
|------------------------|--------------------------------------|---|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| Pinho-do-paraná | <i>Araucaria angustifolia</i> | 580 | 40,9 | 93,1 | 1,6 | 8,8 | 15225 |
| Pinus caribea | <i>Pinus caribea var.caribea</i> | 579 | 35,4 | 64,8 | 3,2 | 7,8 | 8431 |
| Pinus bahamensis | <i>Pinus caribea var.bahamensis</i> | 537 | 32,6 | 52,7 | 2,4 | 6,8 | 7110 |
| Pinus elliottii | <i>Pinus elliottii var.elliottii</i> | 560 | 40,4 | 66,0 | 2,5 | 7,4 | 11889 |
| Pinus hondurensis | <i>Pinus caribea var.hondurensis</i> | 535 | 42,3 | 50,3 | 2,6 | 7,8 | 9868 |
| Pinus oocarpa | <i>Pinus oocarpa shiede</i> | 538 | 43,6 | 60,9 | 2,5 | 8,0 | 10904 |
| Pinus taeda | <i>Pinus taeda L.</i> | 645 | 44,4 | 82,8 | 2,8 | 7,7 | 13304 |

$\rho_{ap}(12\%)$ = massa específica aparente a 12% de umidade

f_c = resistência à compressão paralela às fibras

f_t = resistência à tração paralela às fibras

f_{tn} = resistência à tração normal às fibras

f_v = resistência ao cisalhamento

E_c = módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras

Coefficiente de variação para resistências a solicitações normais $\delta = 18\%$

Coefficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais $\delta = 28\%$

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Correção Umidade - 12% como padrão de referência

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right]$$

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Tabela 3.8 – Relação f_k/f_m entre as resistências características a média e o valor do coeficiente γ_w

| Esforço | f_k/f_m | γ_w |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| compressão paralela às fibras | 0,70 | 1,4 |
| tração paralela às fibras | 0,70 | 1,8 |
| cisalhamento paralelo às fibras | 0,54 | 1,8 |

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Valores de $k_{mod,1}$

| Classes de carregamento | Tipos de madeira | |
|-------------------------|--|--------------------|
| | Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada | Madeira recomposta |
| Permanente | 0,60 | 0,30 |
| Longa duração | 0,70 | 0,45 |
| Média duração | 0,80 | 0,65 |
| Curta duração | 0,90 | 0,90 |
| Instantânea | 1,10 | 1,10 |

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Umidade

Quadro 1 - Classes de umidade

| Classes de umidade | Umidade relativa do ambiente U_{amb} | Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq} |
|--------------------|--|---|
| 1 | $\leq 65\%$ | 12% |
| 2 | $65\% < U_{amb} \leq 75\%$ | 15% |
| 3 | $75\% < U_{amb} \leq 85\%$ | 18% |
| 4 | $U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos | $\geq 25\%$ |

Fonte: NBR 7190/97

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Valores de $k_{mod,2}$

| Classes de umidade | Madeira serrada | Madeira recomposta |
|--------------------|---|--------------------|
| | Madeira laminada colada Madeira compensada | |
| (1) e (2) | 1,0 | 1,0 |
| (3) e (4) | 0,8 | 0,9 |

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Valores de $k_{\text{mod},3}$

O coeficiente parcial de modificação $k_{\text{mod},3}$ leva em conta se a madeira é de 1ª ou 2ª categoria. No caso de madeira de 2ª categoria admite-se $k_{\text{mod},3} = 0,8$ e no de 1ª categoria $k_{\text{mod},3} = 1,0$.

O coeficiente parcial de modificação $k_{\text{mod},3}$ para **coníferas** na forma de peças estruturais maciças de madeira serrada sempre deve ser tomado com o valor $k_{\text{mod},3} = 0,8$, a fim de se levar em conta o risco da presença de nós de madeira não detectáveis pela inspeção visual.

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Classes de resistência das coníferas

| Coníferas | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|--|
| (Valores na condição padrão de referência U = 12%) | | | | | |
| Classes | f_{cok} (MPa) | f_{vk} (MPa) | E_{co,m} (MPa) | ρ_{bas,m} (kg/m³) | ρ_{aparente} (kg/m³) |
| C 20 | 20 | 4 | 3500 | 400 | 500 |
| C 25 | 25 | 5 | 8500 | 450 | 550 |
| C 30 | 30 | 6 | 14500 | 500 | 600 |

Propriedades Mecânicas – Bases de Cálculo

Classes de resistência das dicotiledôneas

| Dicotiledôneas | | | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|--|
| (Valores na condição padrão de referência U = 12%) | | | | | |
| Classes | f_{ck} (MPa) | f_{vk} (MPa) | E_{co,m} (MPa) | ρ_{bas,m} (kg/m³) | ρ_{aparente} (kg/m³) |
| C 20 | 20 | 4 | 9500 | 500 | 650 |
| C 30 | 30 | 5 | 14500 | 650 | 800 |
| C 40 | 40 | 6 | 19500 | 750 | 950 |
| C 60 | 60 | 8 | 24500 | 800 | 1000 |