

# Aula 3 – Resistência e métodos de cálculos

---

PROF.<sup>a</sup> MSC. PATRÍCIA ANDRADE

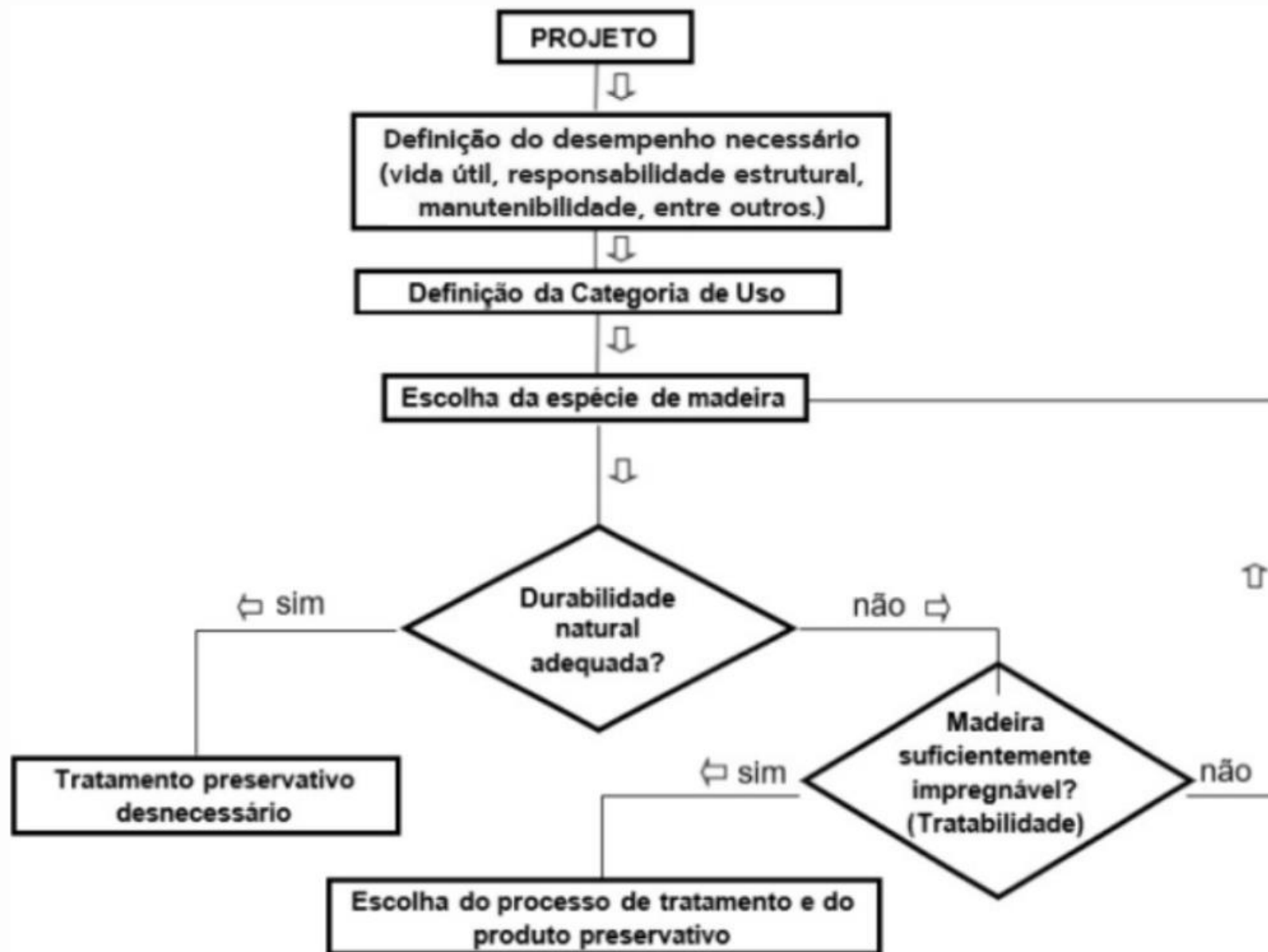
O propósito do Sistema de Categorias de Uso é oferecer uma ferramenta simplificada para a tomada de decisão quanto ao uso racional e inteligente da madeira, por meio de uma abordagem sistêmica ao produtor e usuário, que assegure maior durabilidade das construções.

seis categorias de uso baseadas nas condições de exposição ou uso da madeira, na expectativa de desempenho do componente e nos possíveis agentes biodeterioradores presentes

**Tabela 25 – Categorias de uso da madeira**

<b>Categoria de uso</b>	<b>Condição de uso da madeira</b>	<b>Organismo xilófago</b>
1	Interior de construções, fora de contato com o solo, fundações ou alvenaria, protegidos das intempéries, das fontes internas de umidade e locais livres do acesso de cupins-subterrâneos ou arborícolas.	Cupim-de-madeira-seca Broca-de-madeira
2	Interior de construções, em contato com a alvenaria, sem contato com o solo ou fundações, protegidos das intempéries e das fontes internas de umidade.	Cupim-de-madeira-seca Broca-de-madeira Cupim-subterrâneo Cupim-arborícola
3	Interior de construções, fora de contato com o solo e protegidos das intempéries, que podem, ocasionalmente, ser expostos a fontes de umidade.	Cupim-de-madeira-seca Broca-de-madeira Cupim-subterrâneo
4	Uso exterior, fora de contato com o solo e sujeitos as intempéries.	Cupim-arborícola Fungo embolorador/manchador
5	Contato com o solo, água doce e outras situações favoráveis à deterioração, como engaste em concreto e alvenaria.	Fungo apodrecedor
6	Exposição à água salgada ou salobra.	Perfurador marinho Fungo embolorador/manchador Fungo apodrecedor

O sistema de categorias de uso define medidas que devem ser adotadas durante a fase de elaboração de projeto de uma construção com componentes de madeira, auxiliando na escolha do tratamento preservativo da madeira - produto e processo. Este processo de decisão é representado pelo fluxograma na Figura 34.



# Normas

---

NBR 7190: 2022

NBR 6120: 2019

# Métodos de cálculo

## Estado limite último

- perdas de equilíbrio como corpo rígido;
- Ruptura de uma ligação ou seção;
- Instabilidade em regime elástico ou não
- **está ligado a iminência da ruptura da estrutura!!!!**

## Estado limite de utilização

- deformações excessivas e o consequente dano a acessórios da estrutura com alvenarias e esquadrias;
- Vibrações excessivas e o consequente mau funcionamento de equipamentos e desconforto dos usuários;
- **Ou seja, o desempenho da estrutura em serviço ao longo da vida útil!!!**



Ações

Permanentes

Variáveis

Peso próprio de estruturas

Peso de instalações permanentes

Empuxo

Protensão

Retração

Recalques

Acidental

Vento

Temperatura

# Tipos de combinações

---

## ➤ Normal:

Uso previsto desde o início do projeto;

Longa duração;

ELU;

# ESTADO LIMITE ÚLTIMO

---

## NORMAIS

$$F_{sd} = \sum \gamma_{gi} * G_i + \gamma_{q1} * Q_1 + \sum \gamma_{qj} * \psi_{0j} * Q_j$$

$\gamma_{gi}$  = Coeficiente de majoração de carga permanente i

$G_i$  = Carga permanente i

$\gamma_{q1}$  = Coeficiente de majoração de carga variável principal

$Q_1$  = Carga variável principal

$\gamma_{qj}$  = Coeficiente de majoração de carga variável secundária

$Q_j$  = Carga variável secundária

$\psi_{0j}$  = Coeficiente de redução da aplicado à carga variável secundária

# Coeficientes de majoração de ações no ELU

---

# Fatores de redução

TABELA 3.7 Fatores de combinação  $\psi_0$  e de utilização  $\psi_1$  (frequente) e  $\psi_2$  (quase-permanente)

Descrição das ações		$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Ações ambientais em estruturas correntes	– variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
	– pressão dinâmica do vento	0,5	0,2	0
Cargas acidentais em edifícios	– locais onde não há predominância de pesos de equipamentos fixos, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,4	0,3	0,2
	– locais onde há predominância de pesos de equipamentos fixos ou de elevadas concentrações de pessoas	0,7	0,6	0,4
	– bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	– pontes de pedestres	0,4	0,3	0,2*
	– pontes rodoviárias	0,6	0,4	0,2*
	– pontes ferroviárias (ferrovias não-especializadas)	0,8	0,6	0,4*

\*Admite-se  $\psi_2 = 0$  quando a ação variável de base da combinação for um sismo.

# ESTADO LIMITE ÚLTIMO

---

## ESPECIAIS OU DE CONSTRUÇÃO

### ➤ Especial:

Natureza ou intensidade especiais;

$$F_D = \sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{gi} + \gamma_q (F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{qj,k})$$

$\gamma_{gi}$  = Coeficiente de majoração de carga permanente i

$F_{gi}$  = Carga permanente i

$\gamma_{q1}$  = Coeficiente de majoração de carga variável principal

$F_{Q1}$  = Carga variável principal

$\gamma_{qj}$  = Coeficiente de majoração de carga variável secundária

$F_{qj,k}$  = Carga variável secundária

$\psi_{0j}$  = Coeficiente de redução da aplicado à carga variável secundária

# ESTADO LIMITE ÚLTIMO

---

## EXCEPCIONAIS

### ➤ Excepcional:

Efeitos catastróficos

$$F_D = \sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{gi} + F_{EXP} + \gamma_q \left( \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{qj,k} \right)$$

$\gamma_{gi}$  = Coeficiente de majoração de carga permanente i

$F_{Gi}$  = Carga permanente i

$\gamma_{q1}$  = Coeficiente de majoração de carga variável principal

$F_{EXP}$  = Carga excepcional

$\gamma_q$  = Coeficiente de majoração de carga variável secundária

$F_{qj}$  = Carga variável secundária

$\psi_{0j}$  = Coeficiente de redução da aplicado à carga variável secundária

# Exemplo 1

---

Uma viga de madeira está sujeita aos seguintes carregamentos verticais distribuídos por:

Peso próprio + peso piso de madeira →  $G = 1,6 \text{ kN/m}$

Carga acidental →  $Q = 2 \text{ kN/m}$

Calcular as ações combinadas para o projeto no estado limite último de acordo com a NBR 7190.

**Resolução:**

$$F_{sd} = \gamma_g * G_1 + \gamma_{q1} * Q_1$$

$$F_{sd} = 1,4 * 1,6 + 1,4 * 2$$

$$F_{sd} = 5,04 \text{ kN/m}$$

# Exemplo 2

---

Uma treliça de cobertura em madeira está sujeita aos seguintes carregamentos verticais distribuídos por:

Peso próprio + peso cobertura  $\rightarrow G = 0,8 \text{ kN/m}$

Carga acidental  $\rightarrow Q = 1,5 \text{ kN/m}$  (residência)

Vento  $\rightarrow V_1 = 1,3 \text{ kN/m}$   $\rightarrow$  sobrepessão  $\rightarrow$  mesmo sentido que as outras forças

Calcular as ações combinadas para o projeto no estado limite último de acordo com a NBR 7190.

**Resolução:**

$$F_{sd} = \gamma_g * G_1 + \gamma_{q1} * Q_1 + \gamma_{v1} * \psi_{01} * V_1$$

# Resolução

---

$$F_{sd} = \sum \gamma_{gi} * G_i + \gamma_{q1} * Q_1 + \sum \gamma_{qj} * \psi_{0j} * Q_j$$

**1ª suposição: accidental é a principal**

$$F_{sd} = \gamma_g * G_1 + \gamma_{q1} * Q_1 + \gamma_{v1} * \psi_{0v} * V_1$$

$$F_{sd} = 1,4 * 0,8 + 1,4 * 1,5 + 1,4 * 1,3 * 0,5$$

$$F_{sd} = 4,13 \text{ kN/m}$$

**2ª suposição: vento 1 é a principal**

$$F_{sd} = \gamma_g * G_1 + \gamma_{v1} * 0,75 * V_1 + \gamma_{q1} * \psi_{0q} * Q_1$$

$$F_{sd} = 1,4 * 0,8 + 1,4 * 0,75 * 1,3 + 1,4 * 1,5 * 0,4$$

$$F_{sd} = 3,325 \text{ kN/m}$$

# Exemplo 3

---

Uma treliça de cobertura em madeira está sujeita aos seguintes carregamentos verticais distribuídos por:

Peso próprio + peso cobertura  $\rightarrow G = 0,8 \text{ kN/m}$

Carga acidental  $\rightarrow Q = 1,5 \text{ kN/m}$

Vento (sobrepessão)  $\rightarrow V_1 = 1,3 \text{ kN/m}$

Vento (sucção)  $\rightarrow V_2 = - 1,7 \text{ kN/m}$

Calcular as ações combinadas para o projeto no estado limite último de acordo com a NBR 7190.

# Resolução

---

$$F_{sd} = \sum \gamma_{gi} * G_i + \gamma_{q1} * Q_1 + \sum \gamma_{qj} * \psi_{0j} * Q_j$$

**1ª suposição: acidental é a principal**

$$F_{sd} = \gamma_g * G_1 + \gamma_{q1} * Q_1 + \gamma_{v1} * \psi_{0v} * V_1$$

$$F_{sd} = 1,4 * 0,8 + 1,4 * 1,5 + 1,4 * 1,3 * 0,5$$

$$F_{sd} = 4,13 \text{ kN/m}$$

# Resolução

---

$$F_{sd} = \sum \gamma_{gi} * G_i + \gamma_{q1} * Q_1 + \sum \gamma_{qj} * \psi_{0j} * Q_j$$

**2ª suposição: vento 1 é a principal**

$$F_{sd} = \gamma_g * G_1 + \gamma_{v1} * 0,75 * V_1 + \gamma_{q1} * \psi_{0q} * Q_1$$

$$F_{sd} = 1,4 * 0,8 + 1,4 * 0,75 * 1,3 + 1,4 * 1,5 * 0,4$$

$$F_{sd} = 3,325 \text{ kN/m}$$

# Resolução

---

$$F_{sd} = \sum \gamma_{gi} * G_i + \gamma_{q1} * Q_1 + \sum \gamma_{qj} * \psi_{0j} * Q_j$$

**3ª suposição: vento 2 é a principal**

$$F_{sd} = \gamma_g * G_1 - \gamma_{v2} * 0,75 * V_2$$

$$F_{sd} = 0,9 * 0,8 - 1,4 * 0,75 * 1,7$$

$$F_{sd} = -1,065 \text{ kN/m}$$

Qual das 3 forças é a crítica:

1ª suposição:  $F_{sd} = 4,13 \text{ kN/m}$

2ª suposição:  $F_{sd} = 3,325 \text{ kN/m}$

3ª suposição:  $F_{sd} = -1,065 \text{ kN/m}$

# Exemplo 4

---

Uma treliça de cobertura em madeira está sujeita aos seguintes carregamentos verticais distribuídos por:

Peso próprio + peso cobertura  $\rightarrow G = 0,8 \text{ kN/m}$

Carga acidental  $\rightarrow Q = 3 \text{ kN/m}$

Vento (sobrepessão)  $\rightarrow V_1 = 1,7 \text{ kN/m}$

Vento (sucção)  $\rightarrow V_2 = - 2,5 \text{ kN/m}$

Calcular as ações combinadas para o projeto no estado limite último de acordo com a NBR 7190.

# Classificação de peças estruturais de madeira

---

A resistência varia entre espécies → mais de 50 espécies elencadas na norma  
dentro das espécies varia de árvore para árvore → condições climáticas, defeitos  
E das árvores varia a posição da peça no tronco → alburno e cerne

# Classificação de peças estruturais de madeira

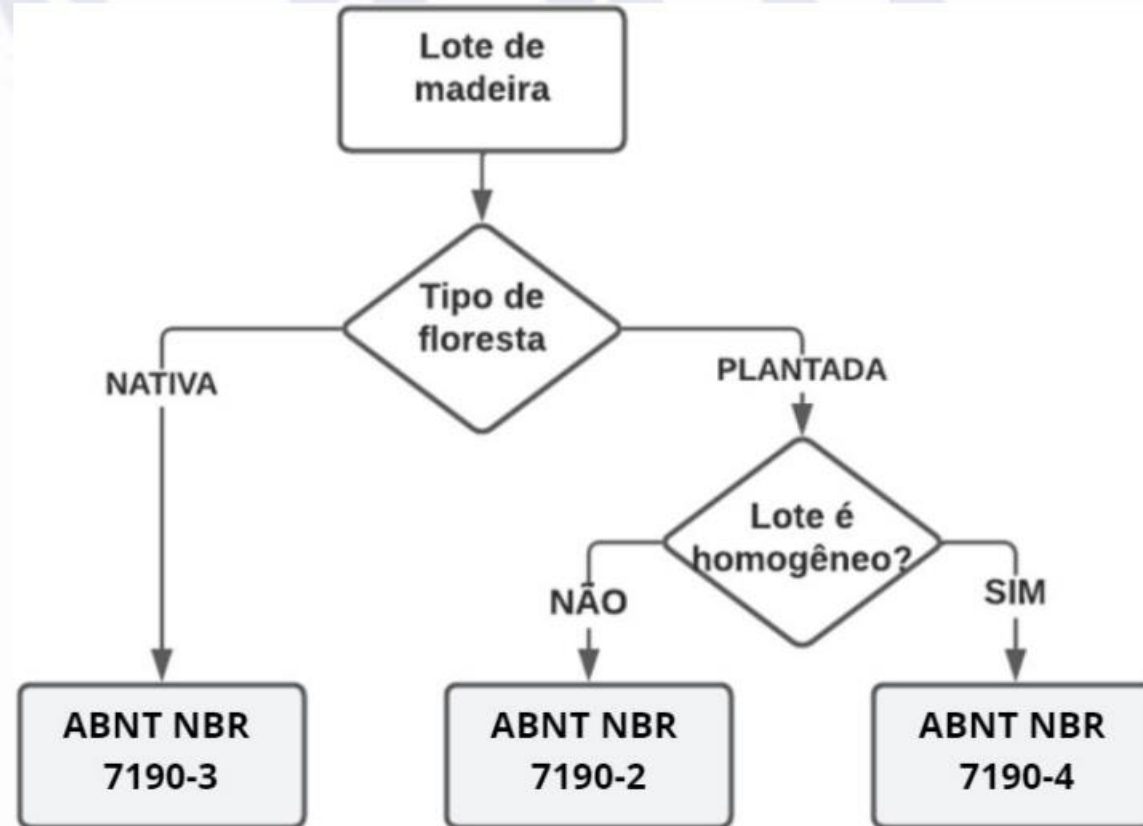


Figura 1 – Fluxograma de caracterização das propriedades de resistência e rigidez das madeiras

# Classificação de peças estruturais de madeira

## Classes de resistência

As classes de resistência das madeiras têm por objetivo a utilização de madeiras com propriedades padronizadas, orientando a escolha do material para elaboração de projetos estruturais.

**Tabela 2 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos**

Classes	$f_{c0k}$ MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,med}$ MPa	Densidade a 12 % kg/m <sup>3</sup>
D20	20	4	10 000	500
D30	30	5	12 000	625
D40	40	6	14 500	750
D50	50	7	16 500	850
D60	60	8	19 500	1 000

NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3.

NOTA 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %.

NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na ABNT NBR 7190-3:2022, Tabela A.1.



### Tabela 3 – Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

		Coníferas												Folhosas							
	Símbolo	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de rigidez GPa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	$G_m$	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25

# Resistência de projeto

---

Tensão resistente de projeto ( $f_d$ ) de uma peça de madeira

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

$f_k$  - resistência característica obtida por ensaios padronizados de curta direção

$k_{mod}$  - coeficiente de ajuste da resistência

$\gamma_w$  - coeficiente de minoração da resistência. Leva em conta a variabilidade da resistência do material do mesmo lote, suas diferenças em relação ao material de confecção das amostras de ensaios e também reduções de resistência decorrentes do modelo de cálculo para esforços

# Coeficiente de minoração

---

## **5.8.5 Coeficientes de minoração da resistência para estados-limites último**

O coeficiente de minoração  $\gamma_w$  para estados-limite últimos decorrentes de tensões normais tem o valor básico  $\gamma_w = 1,4$ . O coeficiente de ponderação para estados-limite últimos decorrentes de tensões de cisalhamento tem o valor básico  $\gamma_w = 1,8$ .

## **5.8.6 Coeficiente de ponderação para estados-limite de serviço**

O coeficiente de ponderação para estados-limite de serviço tem o valor básico  $\gamma_w = 1,0$ .

# k<sub>mod</sub>

---

$$k_{mod} = k_{mod1} * k_{mod2}$$

$k_{mod1}$  - coeficiente de ajuste que leva em conta o tipo de produto de madeira empregado e o tempo de duração da carga

$k_{mod2}$  - coeficiente de ajuste que considera o efeito da umidade

# k<sub>mod1</sub>

Definido conforme o tipo de produto da madeira e a classe de carregamento, exceto para as **combinações normais em que as cargas são classificadas como de longa duração**

**Tabela 4 – Definição de classes de carregamento e valores de  $k_{mod1}$**

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
Permanente	Permanente	Mais de dez anos	0,60	0,30
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos	0,70	0,45
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,80	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10	1,10

# kmod2

---

Definido conforme as classes de umidade e o tipo de produto da madeira utilizado

**Tabela 1 – Classes de umidade**

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

**Tabela 5 – Valores de  $k_{mod2}$**

<b>Classes de umidade</b>	<b>Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)</b>	<b>Madeira recomposta</b>
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70 <sup>a</sup>	0,90

<sup>a</sup> Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).

# Exemplo 5

---

Uma treliça de madeira está sujeita a **combinações normais de ações**. Após a determinação dos esforços solicitantes para estas combinações de ações, verifica-se se os elementos da treliça atendem aos critérios de segurança no estado limite último. Determinar a tensão resistente de projeto à **tração paralela às fibras**  $f_{td}$ , sabendo-se que será **utilizada madeira serrada de pinho-do-paraná** e o local da construção tem **umidade relativa do ar média igual a 60%**.

**Resolução**

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

# Exemplo 6

---

Uma treliça de madeira está sujeita a **combinações normais de ações**. Após a determinação dos esforços solicitantes para estas combinações de ações, verifica-se se os elementos da treliça atendem aos critérios de segurança no estado limite último. Determinar a **tensão resistente de projeto à tração paralela às fibras  $f_{td}$** , sabendo-se que será utilizada **madeira serrada de classe D30** e o local da construção tem **umidade relativa do ar média igual a 75%**.

# Exemplo 7

---

Um conjunto de escoras de madeira está sujeita ao carregamento atuante numa laje recém concretada. Após a determinação dos esforços solicitantes para estas combinações de ações, verifica-se se o conjunto de escoras atendem aos critérios de segurança no estado limite último. Determinar a **tensão resistente** a compressão paralela as fibras, sabendo-se que será utilizada **C14** e o local da construção tem **umidade relativa do ar média igual a 85%**.

# Exemplo 6

---

Uma treliça de madeira está sujeita a **combinações normais de ações**. Após a determinação dos esforços solicitantes para estas combinações de ações, verifica-se se os elementos da treliça atendem aos critérios de segurança no estado limite último. Determinar a **tensão resistente de projeto à compressão paralela às fibras  $f_{cd}$** , sabendo-se que será utilizada **madeira serrada de classe D30** e o local da construção tem **umidade relativa do ar média igual a 85%**.

# Módulo de elasticidade

---

Para as verificações do ELU em que os esforços solicitantes dependam da rigidez da madeira, adota-se valor efetivo do módulo de elasticidade na direção das fibras

$$E_{c,ef} = k_{mod1} * k_{mod2} * E_c$$

$E_c$  - é valor médio do módulo de elasticidade obtido de ensaios de compressão paralela às fibras