

Aula 3 – Resistência e métodos de cálculos

PROF.^a MSC. PATRÍCIA ANDRADE

Fatores que influenciam na resistência

Umidade

Defeitos

Tempo de duração da carga

Posição da peça na árvore

A madeira é um material viscoelástico

Temperatura

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

Normas

NBR 7190: 1996

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

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

γ_{gi} = Coeficiente de majoração de carga permanente i

G_i = Carga permanente i

γ_{q1} = Coeficiente de majoração de carga variável principal

Q_1 = Carga variável principal

γ_{qj} = Coeficiente de majoração de carga variável secundária

Q_j = Carga variável secundária

ψ_{0j} = Coeficiente de redução da aplicado à carga variável secundária

Coeficientes de majoração de ações no ELU

TABELA 3.6 Coeficientes de majoração γ_f das ações no estado limite de projeto

Combinação	Ações permanentes			Ações variáveis		
	Cargas permanentes		Recalques diferenciais γ_ϵ	Ações variáveis em geral, incluídas as cargas acidentais móveis γ_q	Variação de temperatura ambiental γ_q	
	Grande variabilidade γ_g	Pequena variabilidade (*) γ_g				
Normal	1,4 (0,9)	1,3 (1,0)	1,2 (0)	1,4	1,2	
Especial ou de construção	1,3 (0,9)	1,2 (1,0)	1,2 (0)	1,2	1,0	
Excepcional	1,2 (0,9)	1,1 (1,0)	0 (0)	1,0	0	

Os valores entre parênteses correspondem a ações permanentes favoráveis à segurança.

(*) Peso próprio de elementos de madeira classificada estruturalmente, cujo peso específico tenha coeficiente de variação não superior a 10%.

Fatores de redução

TABELA 3.7 Fatores de combinação ψ_0 e de utilização ψ_1 (frequente) e ψ_2 (quase-permanente)

Descrição das ações		ψ_0	ψ_1	ψ_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;

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

γ_{gi} = Coeficiente de majoração de carga permanente i

F_{gi} = Carga permanente i

γ_{q1} = Coeficiente de majoração de carga variável principal

F_{Q1} = Carga variável principal

γ_{qj} = Coeficiente de majoração de carga variável secundária

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

ψ_{0j} = Coeficiente de redução da aplicado à carga variável secundária

ESTADO LIMITE ÚLTIMO

EXCEPCIONAIS

➤ Excepcional:

Efeitos catastróficos

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

γ_{gi} = Coeficiente de majoração de carga permanente i

F_{Gi} = Carga permanente i

γ_{q1} = Coeficiente de majoração de carga variável principal

F_{EXP} = Carga excepcional

γ_q = Coeficiente de majoração de carga variável secundária

F_{qj} = Carga variável secundária

ψ_{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 $\rightarrow G = 1,6 \text{ kN/m}$

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

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.

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

γ_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

TABELA 3.8 Relação f_k/f_m entre as resistências característica e 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

k_{mod}

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

$k_{\text{mod}1}$ - coeficiente de ajuste que leva em conta o tipo de produto de madeira empregado e o tempo de duração da carga

$k_{\text{mod}2}$ - coeficiente de ajuste que considera o efeito da umidade

$k_{\text{mod}3}$ - coeficiente de ajuste que leva em conta a classificação natural da madeira

kmod1

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**

Classe	Período acumulado de tempo de atuação da carga variável de base de uma combinação de ações
Permanente	Vida útil da construção
Longa duração	Mais de 6 meses
Média duração	1 semana a 6 meses
Curta duração	Menos de 1 semana
Duração instantânea	Muito curta

Classe de carregamento da combinação de ações	Tipo de produto 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

kmod2

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

TABELA 3.11 Classes de umidade

Classe de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Grau de umidade da madeira (equilíbrio com o ambiente)
1 (padrão)	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$, durante longos períodos	$\geq 25\%$

TABELA 3.12 Valores do coeficiente k_{mod2}

Classe de umidade	Tipo de produto de madeira	
	Madeira serrada Madeira laminada e colada Madeira compensada	Madeira recomposta
1 e 2	1,0	1,0
3 e 4	0,8	0,9

k_{mod3}

Coefficiente que ajusta os valores de resistência em função da categoria estrutural da madeira utilizada, porque os valores de resistência característica são obtidos por meio de ensaios em corpos-de-prova

TABELA 3.13 Valores do coeficiente $k_{\text{mod}3}$

Produto de madeira	Tipo de madeira	Categoria	$k_{\text{mod}3}$
Serrada	Dicotiledôneas	1. ^a Categoria	1,0
		2. ^a Categoria	0,8
	Coníferas	1. ^a ou 2. ^a	0,8
Laminada e colada*	Qualquer	1. ^a ou 2. ^a – peça curva	$1,0 - 2000 \left(\frac{r}{t} \right)^2$
		peça reta	1,0

*Laminada com espessura t e colada com raio de curvatura r (mínimo).

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

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

$$f_k = 0,7 * 93,1$$

$$F_k = 65,17 \text{ MPa}$$

TABELA 3.8 Relação f_k/f_m entre as resistências característica e 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

Resolução

$$\gamma_w = 1,8$$

K_{mod}

$$K_{mod\ 1} = 0,7$$

$$K_{mod\ 2} = 1$$

$$K_{mod\ 3} = 0,8$$

$$K_{mod} = K_{mod\ 1} * K_{mod\ 2}$$

$$K_{mod} = 0,7 * 1 * 0,8$$

$$K_{mod} = 0,56$$

$$F_{td} = K_{mod} * f_k / \gamma_w$$

$$F_{td} = 0,56 * 65,1 / 1,8$$

$$F_{td} = 20,27 \text{ MPa}$$

TABELA 3.8 Relação f_k/f_m entre as resistências característica e 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

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 sucupira** e o local da construção tem **umidade relativa do ar média igual a 75%**.

TABELA 3.10 Valores do coeficiente k_{mod1}

Classe de carregamento da combinação de ações	Tipo de produto 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

TABELA 3.11 Classes de umidade

Classe de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Grau de umidade da madeira (equilíbrio com o ambiente)
1 (padrão)	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$, durante longos períodos	$\geq 25\%$

TABELA 3.13 Valores do coeficiente k_{mod3}

Produto de madeira	Tipo de madeira	Categoria	k_{mod3}
Serrada	Dicotiledôneas	1.ª Categoria	1,0
		2.ª Categoria	0,8
	Coníferas	1.ª ou 2.ª	0,8
Laminada e colada*	Qualquer	1.ª ou 2.ª – peça curva	$1,0 - 2000 \left(\frac{r}{t} \right)^2$
		peça reta	1,0

*Laminada com espessura t e colada com raio de curvatura r (mínimo).

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 **pinus caribea** 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 angelim de pedra** e o local da construção tem **umidade relativa do ar média igual a 85%**.

$$f_{ck} = 0,7 * f_{cm}$$

$$f_{ck} = 0,7 * 59,8$$

$$f_{ck} = 41,86 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = (0,7 * 0,8 * 0,8) * 41,86 / 1,4$$

$$f_{cd}$$

Resolução

f_k/f_m =coeficiente

$$F_k = 0,7 * 123,4$$

$$F_k = 86,38 \text{ Mpa}$$

$$\gamma_w = 1,8$$

K_{mod}

$$K_{mod 1} = 0,7$$

$$K_{mod 2} = 1$$

$$K_{mod 3} = 0,8$$

$$K_{mod} = 0,56$$

$$F_{td} = 0,56 * 86,38 / 1,8$$

$$F_{td} = 26,87 \text{ MPa}$$

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

TABELA 3.8 Relação f_k/f_m entre as resistências característica e 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

TABELA 3.11 Classes de umidade

Classe de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Grau de umidade da madeira (equilíbrio com o ambiente)
1 (padrão)	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$, durante longos períodos	$\geq 25\%$

TABELA 3.10 Valores do coeficiente k_{mod1}

Classe de carregamento da combinação de ações	Tipo de produto de madeira	
	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada colada Madeira compensada	
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

TABELA 3.12 Valores do coeficiente k_{mod2}

Classe de umidade	Tipo de produto de madeira	
	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada e colada Madeira compensada	
1 e 2	1,0	1,0
3 e 4	0,8	0,9

TABELA 3.13 Valores do coeficiente k_{mod_3}

Produto de madeira	Tipo de madeira	Categoria	k_{mod_3}
Serrada	Dicotiledôneas	1.ª Categoria	1,0
		2.ª Categoria	0,8
	Coníferas	1.ª ou 2.ª	0,8
Laminada e colada*	Qualquer	1.ª ou 2.ª – peça curva	$1,0 - 2000 \left(\frac{r}{t} \right)^2$
		peça reta	1,0

*Laminada com espessura t e colada com raio de curvatura r (mínimo).

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

$$E_{c,ef} = k_{mod1} * k_{mod2} * k_{mod3} * E_c$$

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

Para o Estado Limite de Serviço (ELS):

$$E_{c,ef} \cong \frac{1}{(1+\varphi)} * E_c$$

φ coeficiente de fluência dado conforme a classe de umidade e a duração do carregamento sobre a estrutura