

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP

PPGEC

PEF 6007 2023 3

DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

Reyolando M. L. R. F. Brasil

Engenheiro Civil

Mestre, Doutor e Livre Docente

Dep. de Eng. e Estruturas e Geotécnica – PEF

Prof. Titular de Estruturas

Universidade Federal do ABC – UFABC

São Paulo

2022

Bibliografia Básica

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6120:2019 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento, Rio de Janeiro.
2. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6123:1988 – Forças Devidas ao Vento em Edificações, Rio de Janeiro.
3. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas, Rio de Janeiro.
4. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7190-1:2022 – Projeto de Estruturas de Madeira Parte 1 – Critérios de Dimensionamento, Rio de Janeiro
5. MOLITERNO, A., BRASIL, R.M.L.R.F. *Caderno de Projetos de Telhados em Estruturas de Madeira, 4ª Ed*, Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 2010.
6. PFEIL, W., PFEIL, M.S. *Estruturas de Madeira, 6a Edição*, LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora AS, Rio de Janeiro, 2012.
7. BRASIL, R.M.L.R.F., *Chapas, Placas e Cascas na Engenharia Aeroespacial*. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2020.

Parte 4

Verificação de Estados Limites de Serviço

Estados limites de serviço (ELS): Estados que, por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura. No período de vida da estrutura, usualmente são considerados estados limites de serviço caracterizados por:

- a) danos ligeiros ou localizados, que comprometam o aspecto estético da construção ou a durabilidade da estrutura;
- b) deslocamentos excessivos que afetem a utilização normal da construção ou seu aspecto estético;
- c) vibração excessiva ou desconfortável.

As condições usuais de verificação de segurança relativas aos estados-limite de serviço são expressas por desigualdades, conforme indicado a seguir:

$$S_{d,serv} \leq S_{lim} \quad (1)$$

onde

S_{lim} valor-limite fixado para o efeito estrutural que determina o aparecimento do estado-limite considerado,

$S_{d,serv}$ são os valores desses mesmos efeitos, decorrentes da aplicação das ações estabelecidas para a verificação, calculados com a hipótese de comportamento elástico linear da estrutura.

Nas verificações de estados limites de serviço, deve ser considerado o valor médio do módulo de elasticidade $E_{0,med}$ dado pela Tabela 2 da NBR 7190:2022.

1. Deslocamentos Excessivos (flechas)

Considerando que a madeira possui características distintas de outros materiais de construção, como, por exemplo, a significativa deformação ao longo do tempo (fluência, ou *creep*), as verificações quanto aos critérios de segurança em estados-limite de serviço devem ser consideradas adotando a combinação rara de serviço conforme a ABNT NBR 8681 para a cálculo das flechas instantâneas.

Para os deslocamentos instantâneos, desconsiderando os efeitos da fluência (*creep*), é calculado conforme a seguinte equação, com valores característicos das flechas devidas às ações permanentes, da flecha da ação principal e as das secundárias daquela combinação:

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^m \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1,j} \delta_{inst,Qj,k} \quad (2)$$

Para o cálculo das flechas finais deve-se considerar a combinação quase permanente e os efeitos da fluência conforme as equações a seguir, sempre com valores característicos:

$$\delta_{fin} = \sum_{i=1}^m \delta_{fin,Gi,k} + \sum_{j=1}^n \delta_{fin,Qj,k} \quad (3)$$

em que

$$\delta_{fin,G,k} = \delta_{inst,G,k} + \delta_{creep,Q,k} = \delta_{inst,G,k}(1 + \phi) \quad (4)$$

$$\delta_{fin,Qj,k} = \delta_{inst,Qj,k} + \delta_{creep,Qj,k} = \delta_{inst,Qj,k}(1 + \phi) \quad (5)$$

Os fatores de redução ψ_1 e ψ_2 referentes às combinações de serviço são dados pela Tabela 6 da NBR 8681:2003. Os valores do coeficiente de fluência são dados conforme a Tabela 20 da NBR 7190:2022, a seguir. Para o cálculo dos deslocamentos instantâneos em elementos de madeira, deve-se considerar o módulo de elasticidade com seu valor médio $E_{0,m}$.

Tabela 20 – Coeficiente de fluência (ϕ)

Material	Classes de umidade		
	(1)	(2 e 3)	(4)
Madeira serrada, MLC, MLCC, LVL e roliça	0,6	0,8	2,0 ^a
Compensado estrutural	0,8	1,0	2,5
OSB estrutural	1,5	2,25	-
^a Não é permitido o uso de MLCC para a classe de umidade 4.			

Para os casos correntes de elementos fletidos de madeira, a menos que haja restrições especiais, os limites de deslocamentos devem ser considerados conforme a Tabela 21 e a Figura 26 da NBR 7190:2022.

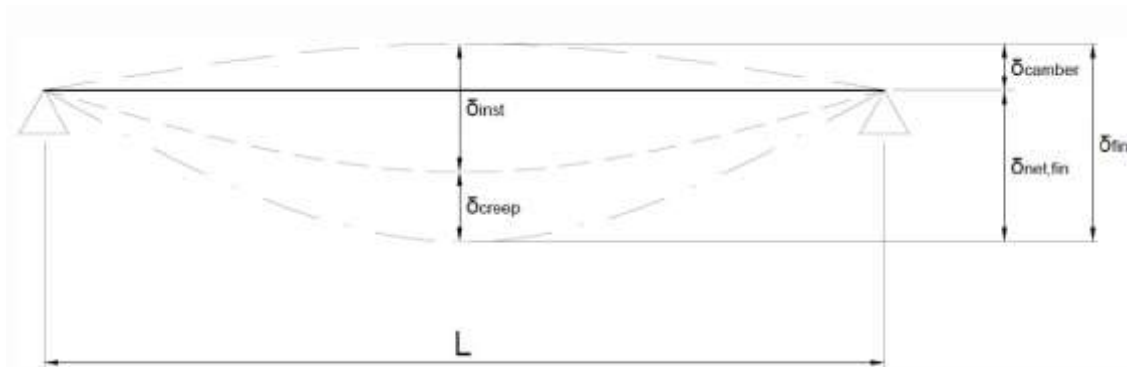


Figura 26 – Verificação esquemática dos deslocamentos-limite

Tabela 21 – Valores-limite de deslocamentos para elementos correntes fletidos

Tipo de viga	δ_{inst}	δ_{fin}	$\delta_{net,fin}$
Vigas biapoiadas ou contínuas	L/300 a L/500	L/150 a L/300	L/250 a L/350
Vigas em balanço	L/150 a L/250	L/75 a L/150	L/125 a L/175

As flechas devidas às ações permanentes podem ser parcialmente compensadas por contra flechas (δ_{camber}) na construção, conforme Fig. 26, não utilizando valores superiores a 2/3 dos deslocamentos instantâneos permanentes. Nas construções em que haja materiais frágeis ligados à estrutura, como forros, pisos e divisórias, cuja fissuração não possa ser evitada por meio de disposições construtivas adequadas, a verificação da segurança em relação aos estados-limite de deslocamentos procura evitar danos a esses materiais não estruturais. Além dos limites de deslocamentos respectivos indicados na Tabela 21, as flechas instantâneas devido somente às ações variáveis não podem superar 1/500 dos vãos ou 1/250 do comprimento dos balanços correspondentes, nem o valor absoluto de 15 mm.

Algumas fórmulas clássicas da Resistência dos Materiais para cálculo de flechas em vigas:

Viga bi apoiada, carga distribuída:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{p L^4}{E I}$$

Viga bi apoiada, carga concentrada a meio vão: $\delta = \frac{P L^3}{48 E I}$

Viga em balanço, carga distribuída: $\delta = \frac{p L^4}{8 E I}$

Viga em balanço, carga concentrada extremidade: $\delta = \frac{P L^3}{3 E I}$

2. Vibrações excessivas ou desconfortáveis

Em construções submetidas a fontes de vibração, devem ser adotadas disposições construtivas que evitem a presença de vibrações excessivas da estrutura. Nas estruturas sobre as quais o público em geral pode caminhar, devem ser evitadas vibrações que tragam desconforto aos usuários.

No caso particular de pisos sobre os quais as pessoas andem regularmente, como os de residências e escritórios, levando em conta que a frequência fundamental do andar de pessoas é 2 Hz, a menor frequência natural de vibração dos elementos da estrutura do piso não pode ser inferior a 4 vezes esse valor, ou seja, 8 Hz, que é o valor limite a considerar. Para esta finalidade, as placas compostas por elementos diagonais podem ser assimiladas a peças maciças.

Valores estimados de frequências de vibração fundamental de estruturas assimiladas a vigas, em Hz, são:

$$\begin{aligned} 1) \text{ Viga bi apoiada: } f &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{96 EI}{\bar{m} L^4}} \\ 2) \text{ Viga em balanço: } f &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{12 EI}{\bar{m} L^4}} \end{aligned}$$

em que $\bar{m}$ é a massa por unidade de comprimento da viga (kg/m), ou seja, a área da seção transversal (m²) vezes a densidade do material (kg/m³).

Para placas, estimativas de grande confiabilidade para essas frequências podem ser encontradas na publicação *open access*:

BRASIL, R.M.L.R.F., *Chapas, Placas e Cascas na Engenharia Aeroespacial*. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2020.

3. Programa Matlab para cálculo de flechas

```
% flecha_NBR7190_2022.m
%verificação de ELU de deslocamento (flecha)
%15/09/2022
%Prof. Reyolando Brasil
%
clc
clear
%
%Entrada de dados
%
%Material
%
%adotada madeira serrada folhosa D60
%
Ec0m=1950;%módulo de elasticidade médio direção fibras, KN/cm²
%
%Geometria
%
%adotada seção retangular b x h
%
b=7.5;%largura, cm
h=20;%altura, cm
L=400;%comprimento da peça direção, cm
I=b*h³/12;%momento de inércia, cm⁴
%
% cálculo das flechas para vários casos de vigas
%
caso='A';%viga bi apoiada, carga distribuida
%
switch(caso)
    case 'A'
        %viga bi apoiada, carga distribuida
```

```

%
G=0.015;%carga permanente KN/cm
Q1=0.015;%carga variável principal da combinação KN/cm
Q2=0;%carga variável secundária da combinação KN/cm
psil=0;%coeficiente de redução da carga variável secundária
del_instGk=5/384*G*L^4/Ec0m/I;
del_instQk=5/384*(Q1+psil*Q2)*L^4/Ec0m/I;
del_inst=del_instGk+del_instQk;
del_fin=del_inst*1.8;% coef fluencia 0.8, umidade entre 65 e 75%
del_lim_inst=L/300;%flecha inst limite
del_lim_fin=L/150;%flecha final limite
%
case 'B'
    %viga bi apoiada, carga concetrada
    %
    G=1;%carga permanente KN
    Q1=1;%carga variável principal da combinação KN
    Q2=0;%carga variável secundária da combinação KN
    psil=0;%coeficiente de redução da carga variável secundária
    del_instGk=G*L^3/48/Ec0m/I;
    del_instQk=(Q1+psil*Q2)*L^3/48/Ec0m/I;
    del_inst=del_instGk+del_instQk;
    del_fin=del_inst*1.8;% coef fluencia 0.8, umidade entre 65 e 75%
    del_lim_inst=L/300;%flecha inst limite
    del_lim_fin=L/150;%flecha final limite
    %
case 'C'
    %viga em balanço, carga distribuida
    %
    G=0.02;%carga permanente KN/cm
    Q1=0.02;%carga variável principal da combinação KN/cm
    Q2=0;%carga variável secundária da combinação KN/cm
    psil=0;%coeficiente de redução da carga variável secundária
    del_instGk=G*L^4/8/Ec0m/I;

```

```

del_instQk=(Q1+psil*Q2)*L^4/8/Ec0m/I;
del_inst=del_instGk+del_instQk;
del_fin=del_inst*1.8;% coef fluencia 0.8, umidade entre 65 e 75%
del_lim_inst=L/150;%flecha inst limite
del_lim_fin=L/75;%flecha final limite
%
case 'D'
    %viga em balanço, carga concetrada
    %
    G=1;%carga permanente KN
    Q1=1;%carga variável principal da combinação KN
    Q2=0;%carga variável secundária da combinação KN
    psil=0;%coeficiente de redução da carga variável secundária
    del_instGk=G*L^3/3/Ec0m/I;
    del_instQk=(Q1+psil*Q2)*L^3/3/Ec0m/I;
    del_inst=del_instGk+del_instQk;
    del_fin=del_inst*1.8;% coef fluencia 0.8, umidade entre 65 e 75%
    del_lim_inst=L/150;%flecha inst limite
    del_lim_fin=L/75;%flecha final limite
    %
otherwise
    disp('Caso não definido');
end
% verificações
%
disp('del_fin (cm)')
disp(del_fin)
disp('del_inst(cm)')
disp(del_inst)
dif1=del_fin-del_lim_fin;
dif2=del_inst-del_lim_inst;
if (dif1<0) && (dif2<0)
    disp('OK!')
else

```

```

disp('Não OK!')
%contraflecha
if dif1>0
    cf(1)=dif1;
else
    cf(1)=0;
end
if dif2>0
    cf(2)=dif2;
else
    cf(2)=0;
end
cfm=max(cf);
if (cfm <= 2*del_instGk/3)
    disp('contraflecha necessária (cm)')
    disp(cfm)
end
%
end
%
```