

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP

PPGEC

PEF 6007 2023 3

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

2023

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.

Parte 1

Verificação de Segurança e Propriedades Mecânicas da Madeira Estrutural

1. Verificação da segurança em estruturas de madeira

Advertência: embora na Engenharia se fale sempre em “Dimensionamento de Estruturas”, o que de fato acontece, na vasta maioria dos casos, é a “Verificação do Dimensionamento” das peças estruturais, cujas dimensões iniciais são estimadas com base na experiência prévia do engenheiro estrutural, por imposições arquitetônicas ou funcionais, ou consulta a literatura técnico-científica disponível, inclusive as normas nacionais e internacionais.

Os dois procedimentos para introdução da segurança em projeto (*design*) de estruturas mais utilizados são:

Método das Tensões Admissíveis; conhecido em inglês como *ASD – Allowable Stress Design*;

Método dos Estados Limites; conhecido em inglês como *LRFD – Load and Resistance Factor Design*.

As normas brasileiras em vigência adotam o segundo, o Método dos Estados Limites, para todos os materiais estruturais usuais: estruturas de concreto, de metal e de madeira.

A norma específica para Projeto de estruturas de madeira é:

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7190-1:2022 – Projeto de Estruturas de Madeira Parte 1 – Critérios de Dimensionamento, Rio de Janeiro.

O escopo dessa Norma é:

Esta Norma estabelece os requisitos gerais de projeto e execução de estruturas de madeira incluindo as estruturas formadas por tesouras planas, paralelas ou não, com ligações pregadas, parafusadas ou executadas com chapas de dentes estampados.

Esta Norma abrange os princípios e requisitos do método dos estados-limite incluindo a durabilidade e a situação de incêndio, e apresenta critérios de cálculo para o dimensionamento e a verificação de elementos estruturais de madeira para a segurança estrutural.

Esta Norma se aplica para estruturas de madeira sólida (serrada ou roliça), madeira lamelada colada, painéis estruturais de madeira e produtos estruturais à base de madeira, com elementos estruturais unidos por adesivos ou conectores mecânicos.

Esta Norma não se aplica a classificação visual e mecânica de madeiras para estruturas, a caracterização de madeiras, os ensaios de ligações e os produtos estruturais como vigas de madeira lamelada colada e painéis de madeira lamelada colada cruzada.

NOTA 1 A classificação visual e mecânica de madeiras são especificadas na ABNT NBR 7190-2 e a caracterização mecânica das madeiras para projeto de estruturas é especificada nas ABNT NBR 7190-3 e ABNT NBR 7190-4.

NOTA 2 As ligações mecânicas em estruturas de madeira são especificadas na ABNT NBR 7190-5, as vigas de madeira lamelada colada estrutural são especificadas na ABNT NBR 7190-6 e os painéis de madeira lamelada colada cruzada são especificados na ABNT NBR 7190-7.

O Método dos Estados Limites

Faz-se, aqui, apenas um resumo do tema, que é completamente detalhado na ABNT NBR 8681:2003, Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.

A ideia básica é que as **solicitações** de projeto (*design*) sejam sempre menores que as **resistências** de projeto (*design*) em seus estados limites:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

onde o subscrito *d* indica “valores de projeto” (*design*), conhecidos no meio técnico brasileiro como “valores de cálculo”. Na obtenção esses valores estão contidos em cada lado da Eq. (1), coeficientes de ponderação que majoram os valores das solicitações e minoram os valores das resistências, para garantir a segurança.

Conceitos Básicos

Estados limites de uma estrutura: Estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção.

Estados limites últimos (ELU): Estados que, pela sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção. No projeto, usualmente devem ser considerados os estados limites últimos caracterizados por:

- a) perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido;
- b) ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais;
- c) transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático;
- d) instabilidade por deformação;
- e) instabilidade dinâmica.

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) deformações excessivas que afetem a utilização normal da construção ou seu aspecto estético;
- c) vibração excessiva ou desconfortável.

Ações: Causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. Do ponto de vista prático, as forças e as deformações impostas pelas ações são consideradas como se fossem as próprias ações. As deformações impostas (como recalques de apoio e protensão) são por vezes designadas por ações indiretas e as forças, por ações diretas.

Ações permanentes: Ações que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção. A variabilidade das ações permanentes é medida num conjunto de construções análogas. Consideram-se como ações permanentes:

- a) ações permanentes diretas: os pesos próprios dos elementos da construção, incluindo-se o peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos permanentes, os pesos dos equipamentos fixos e os empuxos devidos ao peso próprio de terras não removíveis e de outras ações permanentes sobre elas aplicadas;
- b) ações permanentes indiretas: a protensão, os recalques de apoio e a retração dos materiais.

Ações variáveis: Ações que ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção. Consideram-se como ações variáveis as cargas acidentais das construções, bem como efeitos, tais como forças de frenação, de impacto e centrífugas, os efeitos do vento, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Em função de sua probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, as ações variáveis são classificadas em normais ou especiais:

- a) ações variáveis normais: ações variáveis com probabilidade de ocorrência suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas de um dado tipo de construção;
- b) ações variáveis especiais: nas estruturas em que devam ser consideradas certas ações especiais, como ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou de intensidade especiais, elas também devem ser admitidas como ações variáveis. As combinações de ações em que comparecem ações especiais devem ser especificamente definidas para as situações especiais consideradas.

Nomenclatura das Ações, Solicitações e Tensões

Na atividade de verificação da segurança de estruturas, várias grandezas físicas são consideradas:

as **ações** propriamente ditas, tais como as forças externas aplicadas sobre a construção (F), que podem ser permanentes (G) ou variáveis (Q);

as **solicitações**, que são os esforços internos que se desenvolvem no interior dos elementos da estrutura em virtude dessas ações, as forças normais (N), forças cortantes (V), os momentos fletores (M), e os momentos de torção (T);

as **tensões**, intensidades de força por unidade de área (Pa), as tensões normais (σ) e as tensões tangenciais (τ) ou de cisalhamento;

as **resistências** do material, intensidade de força por unidade de área (Pa), indicadas pela letra minúscula f .

Todas essas grandezas físicas tem variabilidade estatística e se utilizam subscritos para indicar qual de seus valores está sendo utilizado em cada situação. O subscrito m refere-se ao “valor médio”; o subscrito k refere-se ao “valor característico”; o subscrito d ao valor de projeto ou de cálculo.

Assim, por exemplo, as tensões normais devidas a uma solicitação de força normal de compressão poderiam ser indicadas nesses 3 casos como:

$$\sigma_{N_c,m} ; \sigma_{N_c,k} ; \sigma_{N_c,d} \quad (2)$$

Já no caso das resistências da madeira à compressão na direção de suas fibras, tem-se as resistências média, característica e de cálculo dadas por:

$$f_{c0,m} ; f_{c0,k} ; f_{c0,d} \quad (3)$$

Obtenção das Solicitações de cálculo

Esse tema é bem detalhado na NBR 8681:2003 e aqui só se dará uma revisão rápida dos principais aspectos da metodologia.

Para obtenção dos **valores característicos das ações**, F_k , se deveria realizar uma série histórica de captação de seus valores, a determinação de seu valor médio F_m , do desvio padrão σ_F , e a adoção de uma Função de Distribuição de Probabilidades (FDP) dependente dessas duas grandezas estatísticas. A partir daí, se determina o valor característico como aquele que tem uma certa probabilidade de não ser excedido. Por exemplo, no caso de uma FDP normal, ou gaussiana, com uma probabilidade de 95% desse valor não ser excedido, ter-se-ia:

$$F_k = F_m + 1,64\sigma_F \quad (4)$$

Na prática, esse procedimento é substituído pela adoção de **valores característicos nominais**, em geral os fornecidos pelas normas brasileiras, como a **NBR 6120:2019**, de cargas em edificações e a **NBR 6123:1988**, de forças devidas ao vento sobre edificações.

De posse dos valores característicos das ações, a obtenção dos valores de cálculo é desenvolvida a partir da consideração das diversas combinações devidas à ocorrência simultânea ou não das ações permanentes e variáveis, ao mesmo tempo em que se aplicam os coeficientes de ponderação de majoração dessas ações.

Neste curso, considera-se, apenas, **carregamento normal**, o qual decorre do uso previsto para construção. Admite-se que o carregamento normal possa ter duração igual ao período de referência da estrutura, e sempre deve ser considerado na verificação da segurança, tanto em relação a estados limites últimos quanto em relação a estados limites de serviço. Neste caso, cada uma das possíveis combinações leva à determinação da ação de cálculo no ELU na forma geral:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q (F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (4)$$

onde:

$F_{Gi,k}$ valor característico de cada uma das m ações permanentes, $i = 1, \dots, m$

γ_{gi} coeficiente de ponderação majorador de cada uma das ações permanentes

γ_q coeficiente de ponderação majorador das ações variáveis

$F_{Q1,k}$ valor característico da **ação variável principal** desta combinação

$F_{Qj,k}$ valor característico de cada uma das n **ações variáveis secundárias**, $j = 2, \dots, n$

ψ_{0j} fator de combinação de cada uma das n **ações variáveis secundárias**, $j = 2, \dots, n$

Neste curso, os coeficientes de ponderação majoradores γ_{gi} e γ_q serão sempre tomados iguais a 1,4 (ou 0,9 quando devido ao arranjo de cargas do modelo estrutural essa ação diminuir o valor de cálculo final). Mais detalhes podem ser encontrados nas **Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5 da NBR 8681:2003**.

Os fatores de combinação ψ_{0j} são os dados pela **Tabela 6 da NBR 8681:2003**.

Vale frisar que esse procedimento se repete para cada uma das combinações que se fizerem necessária no projeto, tendo em vista as n cargas variáveis presentes no modelo, cada uma delas sendo considerada a principal em uma combinação, as outras passando a ser secundárias.

Em estruturas de madeira, que resistem melhor a cargas de curta do que de longa duração, as ações de vento podem ser multiplicadas por 0,75, quando forem a ação variável principal da combinação em questão.

As cargas permanentes devem ser sempre consideradas em todas as combinações geradas.

De acordo com a Equação (1), a partir dessas ações de cálculo, se geram as solicitações de cálculo nas peças estruturais a serem comparadas com a resistência de cálculo do material, conforme apresentado na próxima parte nestas notas, a Parte 2.

Em outro ponto deste curso, se retoma o tema para os estados Limites de Serviço, ELS.

2. Propriedades mecânicas da Madeira

A **resistência** é a aptidão do material suportar tensões, e é determinada, convencionalmente, pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos de prova isentos de defeitos do material considerado ou elementos estruturais, até o aparecimento de fenômenos particulares de comportamento, além dos quais há restrição de emprego do material em elementos estruturais. De modo geral, estes fenômenos são os de ruptura ou de deformação específica excessiva.

A **rigidez** dos materiais é medida pelo valor médio do módulo de elasticidade, determinado na fase de comportamento elástico-linear. O módulo médio de elasticidade na direção paralela às fibras é obtido no ensaio de flexão (E_m) no caso de ensaios em peças estruturais) ou no ensaio de compressão paralela às fibras ($E_{co,med}$) no caso de ensaios em corpos de prova isentos de defeitos).

A **densidade** básica da madeira é a massa específica convencional obtida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado. A massa seca é determinada mantendo-se os corpos de prova em estufa a 103 °C até que a massa do corpo de prova permaneça constante. O volume saturado é determinado em corpos de prova submersos em água até atingirem peso constante. A densidade aparente da madeira é a massa específica obtida pelo quociente da massa pelo volume, ambos à mesma umidade.

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. O enquadramento de peças de madeira nas classes de resistência é especificado na Tabela 2 e na Tabela 3, e no fluxograma da Figura 1, todas da NBR 7190:2022. Cabe mencionar que se consideram duas famílias de espécies de madeiras, as **coníferas** (pinhos), madeiras claras e moles, cujas classes são indicadas pela letra **C**, e as **folhosas** (dicotiledôneas), madeiras escuras e duras, pela letra **D**.



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

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 ³
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 resistência MPa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	6	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	16	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,6	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	f_{vk}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
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
Densidade kg/m³																					
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	465	530	540	560	620	700	800
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1	Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																				
Nota 2	Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %																				

Neste curso, por simplicidade, em todos os exemplos se adotarão os valores fornecidos na Tabela 2 para espécies folhosas.

Resistência de Cálculo

A resistência de cálculo (MPa) a ser adotada em cada projeto, parte da escolha da classe de resistência das Tabelas 2 e 3 e a aplicação da expressão (5):

$$f_d = K_{mod} \frac{f_k}{\gamma_w} = K_{mod1} K_{mod2} \frac{f_k}{\gamma_w} \quad (5)$$

onde o coeficiente minorador da resistência da madeira γ_w será sempre adotado como 1,4.

Na Eq. (5), tem-se o coeficiente modificador K_{mod1} , devido à classe do carregamento aplicado sobre a peça estrutural da madeira, conforme a Tabela 4 da NBR 7190:2022, a seguir.

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

Neste curso, se adotará sempre carregamento de longa duração, com a exceção já mencionada de esforços devidos ao vento.

Na Eq. (5), tem-se o coeficiente modificador K_{mod2} , devido à classe de umidade ambiente, segundo Tabelas 1 e 5 da NBR 7190:2022, a seguir.

Tabela 1 – Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio máxima da madeira 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}

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

^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).

Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade na direção paralela às fibras (E_0) é definido em ensaios de flexão e tem os valores apresentados na Tabela 3. No caso do uso da Tabela 2, deve ser considerada a igualdade entre os valores médios obtidos na flexão e na compressão paralela às fibras ($E_{0,med} = E_{c0,med}$).

Nas verificações de estados limites últimos referentes à estabilidade de peças comprimidas e flexocomprimidas, deve ser utilizado o valor característico para o módulo de elasticidade ($E_{0,05}$).

No caso do uso da Tabela 2 o valor característico pode ser utilizado como sendo igual a 70 % do valor médio do módulo de elasticidade, conforme a seguinte equação:

$$E_{0,05} = 0,7 E_{c0,med} \quad (6)$$

Nas verificações de estados-limite últimos, referentes à estabilidade lateral de vigas, deve ser considerado o valor efetivo para o módulo de elasticidade (E_{ef}), calculado conforme a seguinte equação:

$$E_{0,ef} = K_{mod1} K_{mod2} E_{0,med} \quad (7)$$

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.

Tração paralela às fibras

No caso de se utilizar os dados da Tabela 2, o valor de cálculo da resistência à tração paralela às fibras pode ser considerado igual ao valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras. Para as madeiras classificadas a partir de ensaios em peças estruturais, o valor característico da resistência à tração paralela às fibras deve ser obtido a partir da Tabela 3. Deve-se evitar o uso da madeira à tração perpendicular às fibras, reforçando-a por dispositivos adequados (em geral, metálicos).

Compressão perpendicular às fibras

Os esforços resistentes correspondentes à compressão perpendicular às fibras são determinados com a hipótese de comportamento elastoplástico da madeira, devendo considerar a extensão (a') do carregamento, medida paralelamente à direção das fibras (ver Tabela 6, usando interpolação linear). Se a força estiver aplicada a menos de 7,5 cm da extremidade da peça ou $a' \geq 15$ cm, admite-se $\alpha_n = 1$. A Tabela 6 é também aplicada no caso de arruelas, tomando-se como extensão do carregamento distribuído o seu diâmetro ou lado, não sendo necessário descontar-se o diâmetro do pino.

Tabela 6 – Valores de α_n

Extensão (a') do carregamento perpendicular às fibras, medida paralelamente a estas cm	Coefficiente α_n
1	2,00
2	1,70
3	1,55
4	1,40
5	1,30
7,5	1,15
10	1,10
15	1,00

Resistência às tensões normais inclinadas em relação às fibras da madeira

Permite-se ignorar a influência da inclinação α das tensões normais em relação às fibras da madeira até o ângulo $\alpha = 6^\circ$. Para inclinações maiores, é preciso considerar a redução de resistência, conforme a chamada fórmula de Hankinson:

$$f_\alpha = \frac{f_0 f_{90}}{f_0 \sin^2 \alpha + f_{90} \cos^2 \alpha} \quad (8)$$