



Universidade de São Paulo
Escola Politécnica – Departamento de
Engenharia de Estruturas e Geotécnica

PEF 2402 – Estruturas metálicas e de madeira

Prof. Eduardo M. B. Campello
Prof. Pedro Wellington G. N. Teixeira

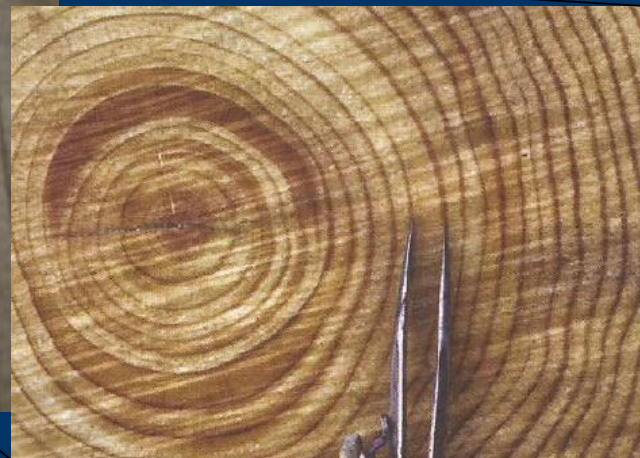
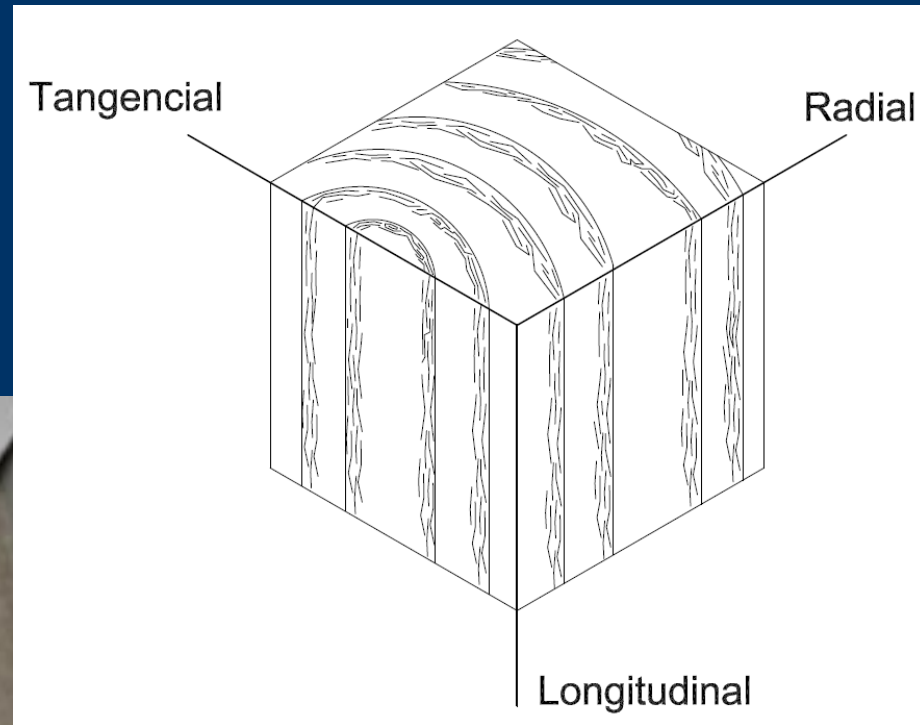




I – Propriedades da madeira

- Classificação das madeiras:
- Estrutura e crescimento:
 - Seção transversal de um tronco;
 - Fibras da madeira;
- Propriedades físicas:
 - Anisotropia;
 - Umidade;
 - Retração e inchamento;
 - Deterioração da madeira;
- Defeitos das madeiras:
 - Naturais;
 - Decorrentes da fabricação;

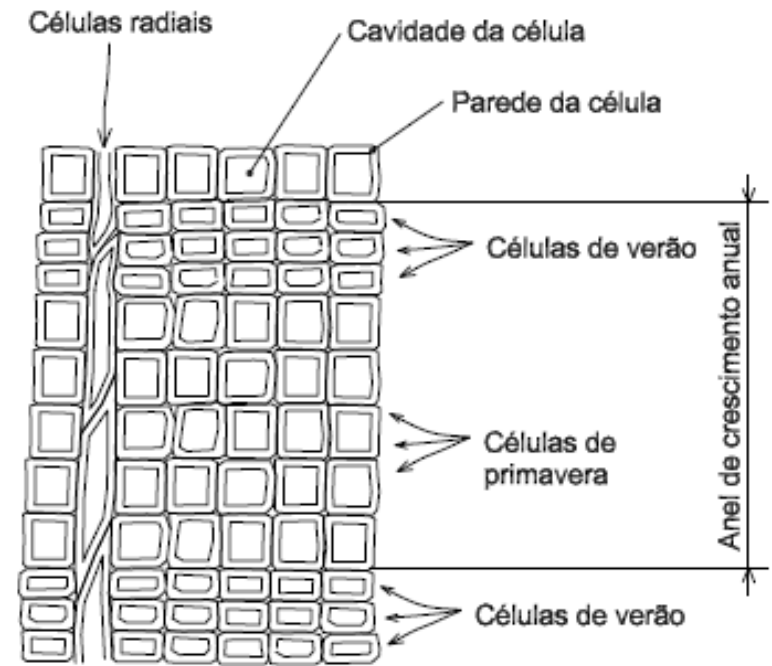
Seção transversal de um tronco



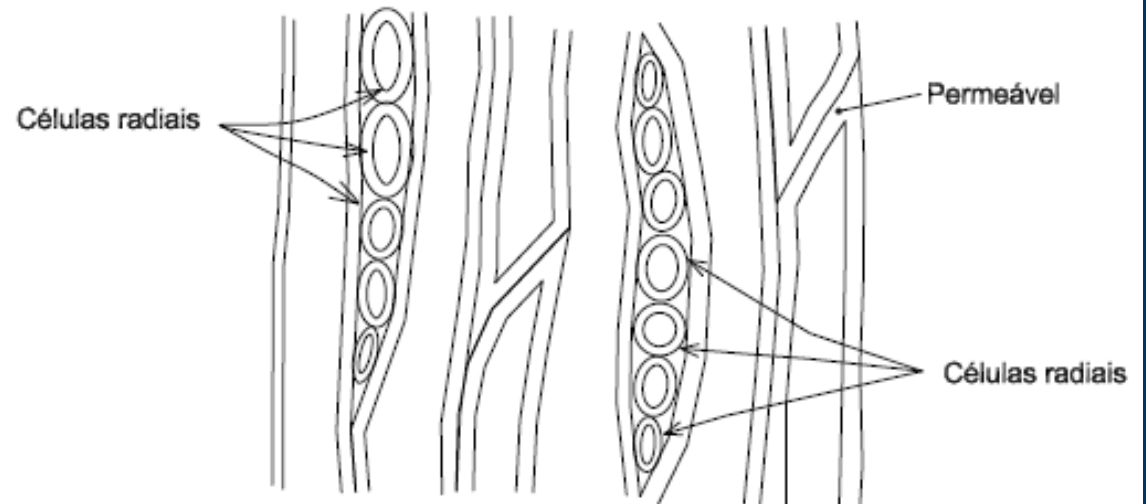
Fibras da madeira



Seção transversal



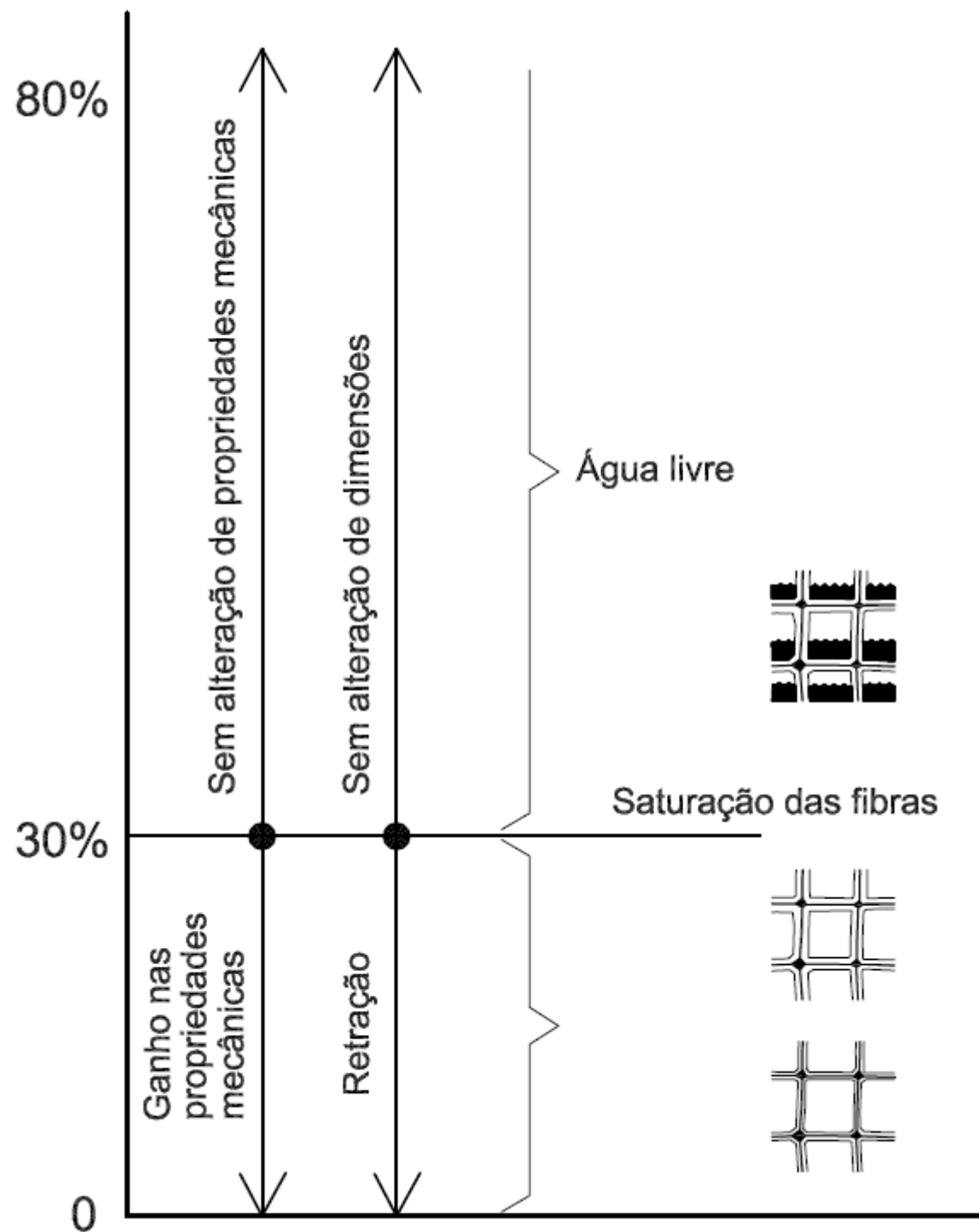
Seção tangencial



Densidade da substância que compõe a célula = 1,54

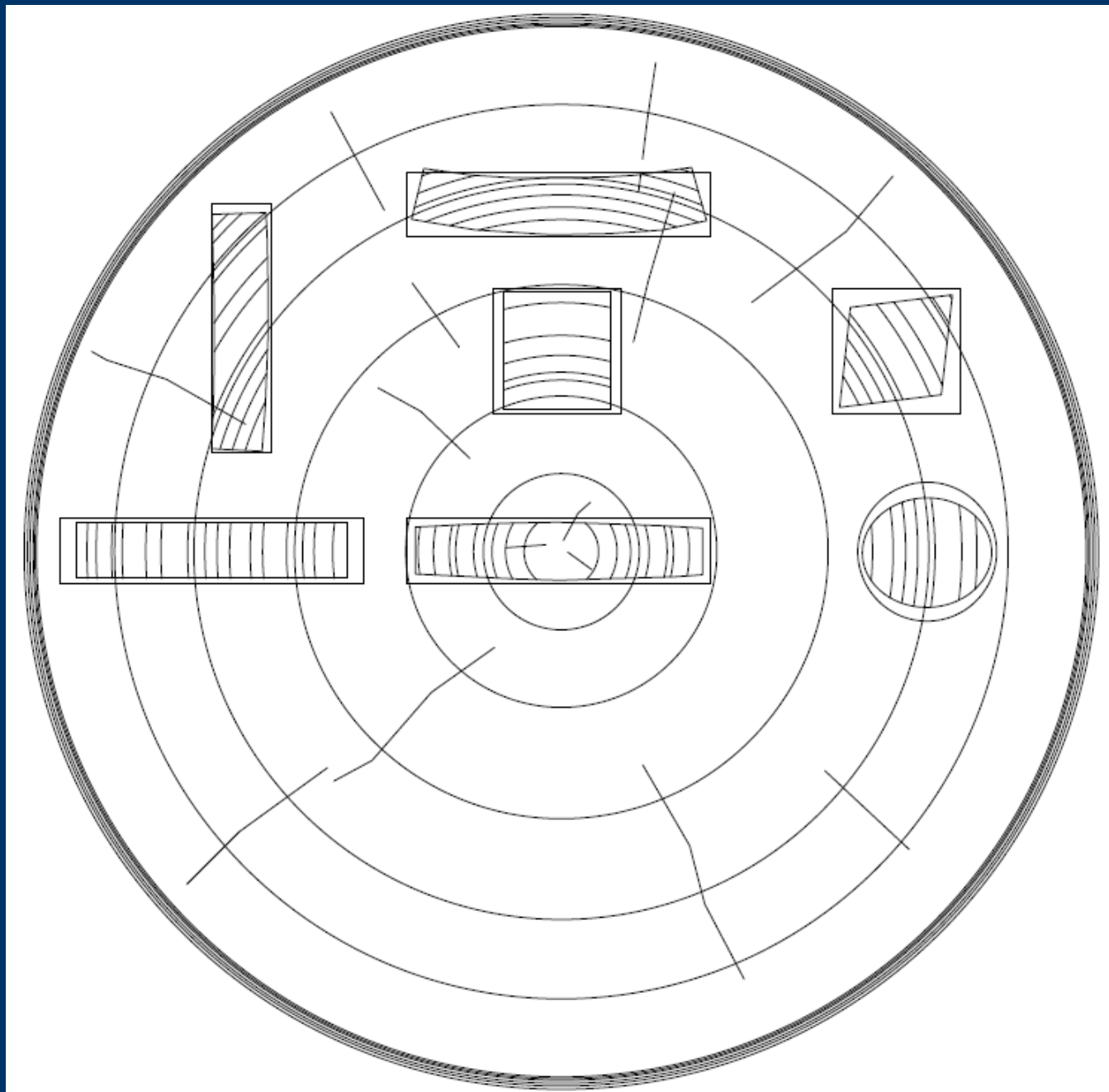
Umidade

- $U (\%) = 100 \times (P_i - P_s) / P_s$
- $f_{12} = f_U [1 + 0,03(U - 12)]$
- $E_{12} = E_U [1 + 0,02(U - 12)]$



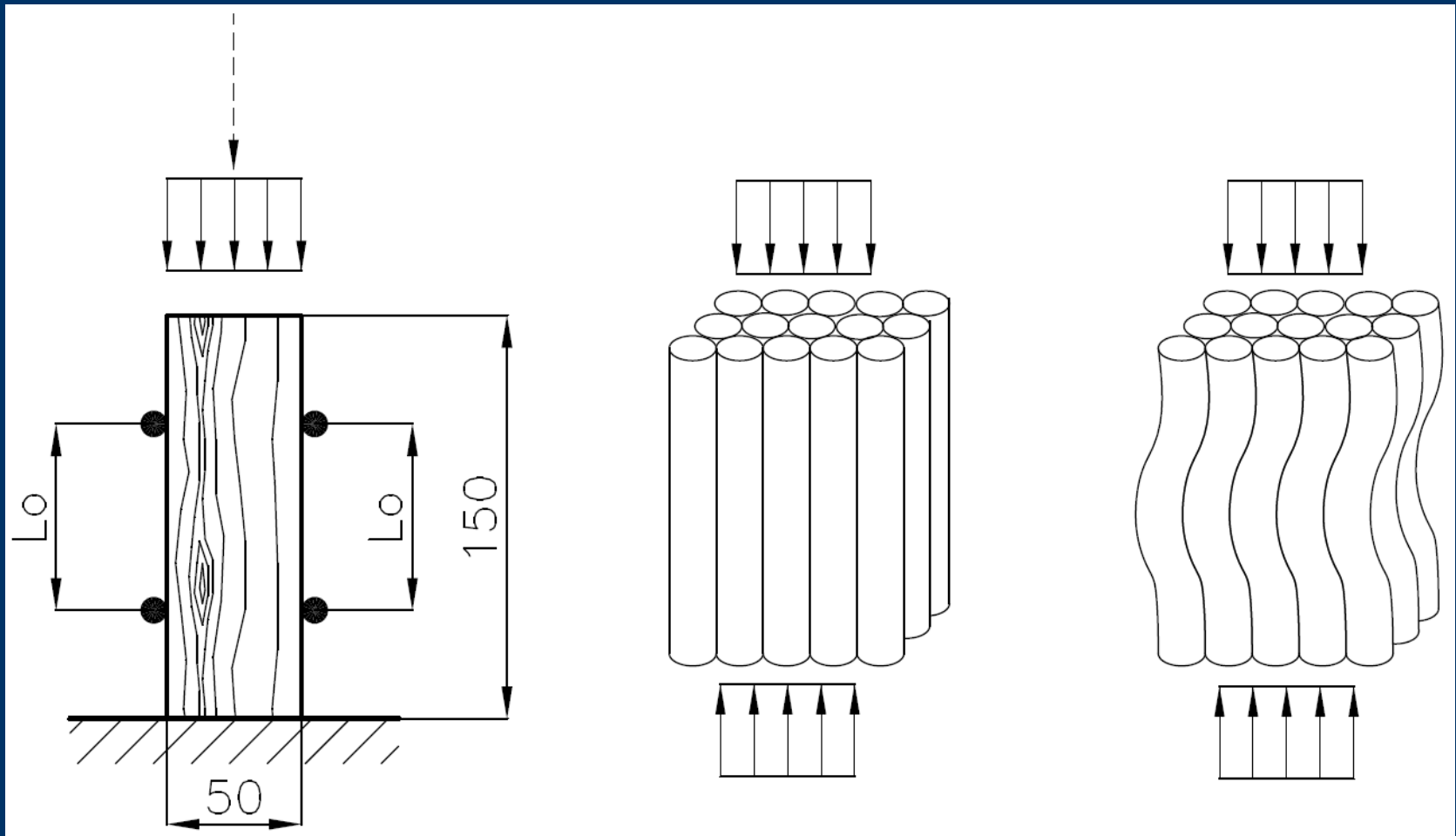
Retração e inchamento

- $R = 3\%$ a 6%
- $T = 7\%$ a 14%
- $L = 0,1\%$ a $0,4\%$



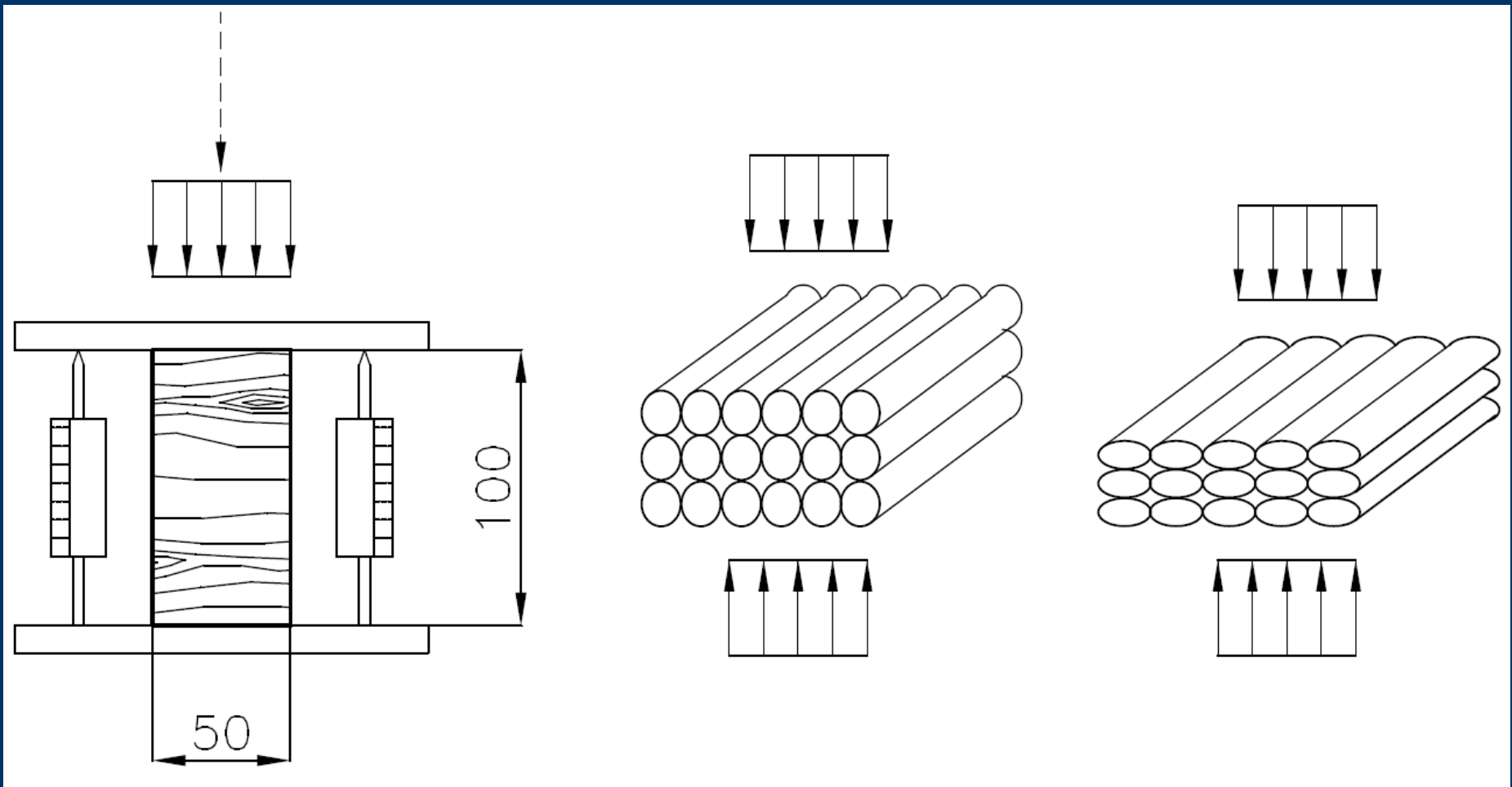
Determinação das propriedades mecânicas

Ensaio de compressão paralela às fibras

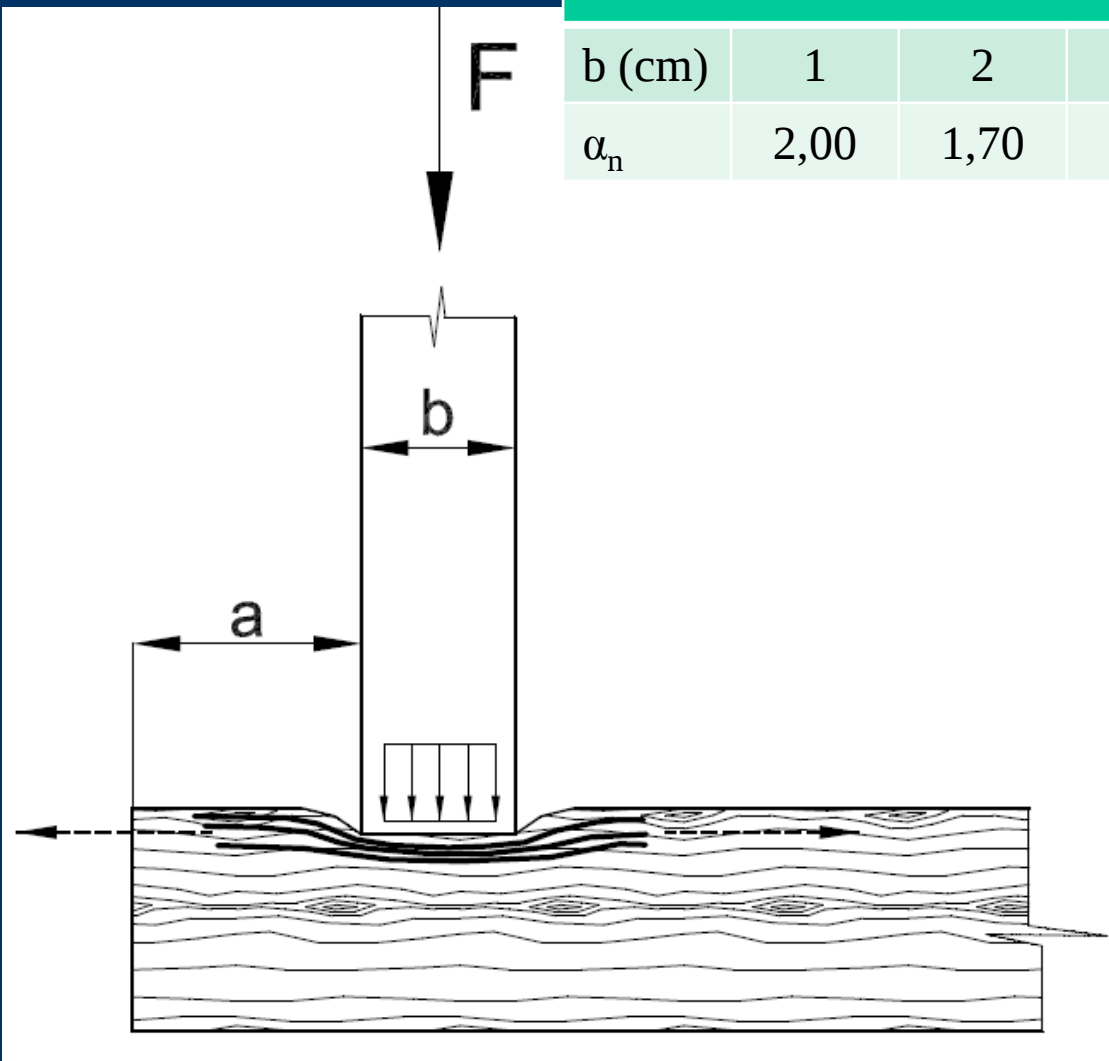


Determinação das propriedades mecânicas

Ensaio de compressão normal às fibras



ACRÉSCIMO DE RESISTÊNCIA PARA COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

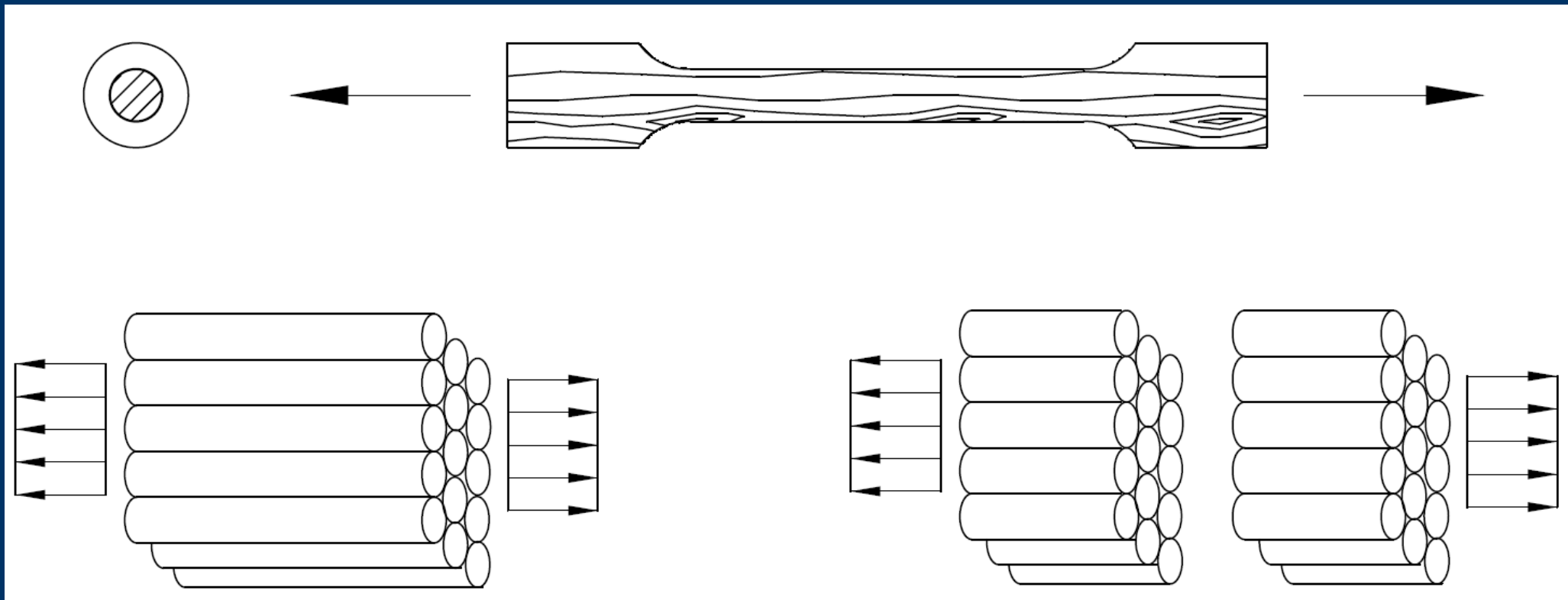


Multiplicador da resistência (α_n)								
b (cm)	1	2	3	4	5	7,5	10	15
α_n	2,00	1,70	1,55	1,40	1,30	1,15	1,10	1,00

Observação:
 $\alpha_n > 1$ para $b < 15$ cm e $a > 7,5$ cm

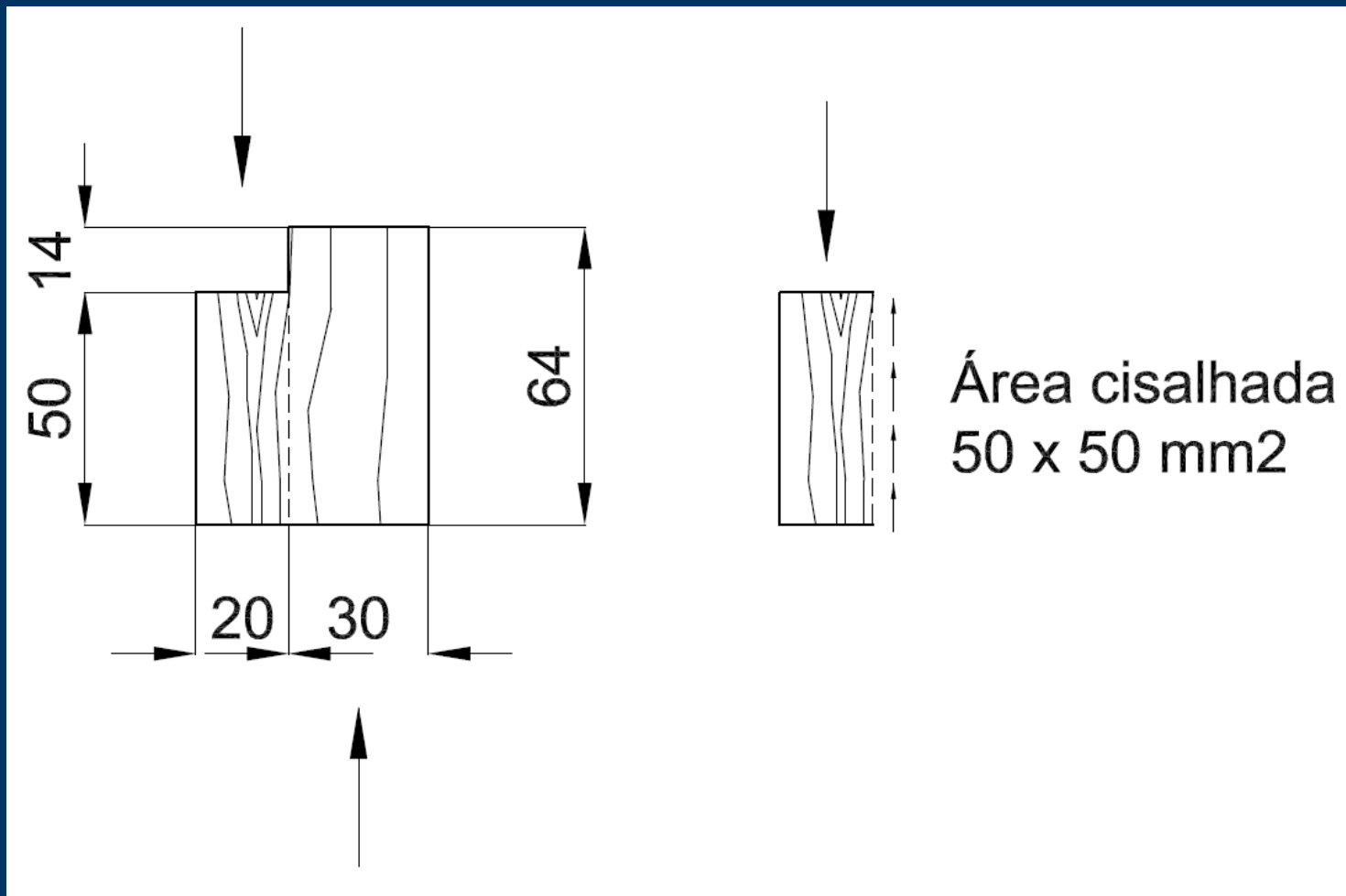
Determinação das propriedades mecânicas

Ensaio de tração normal às fibras



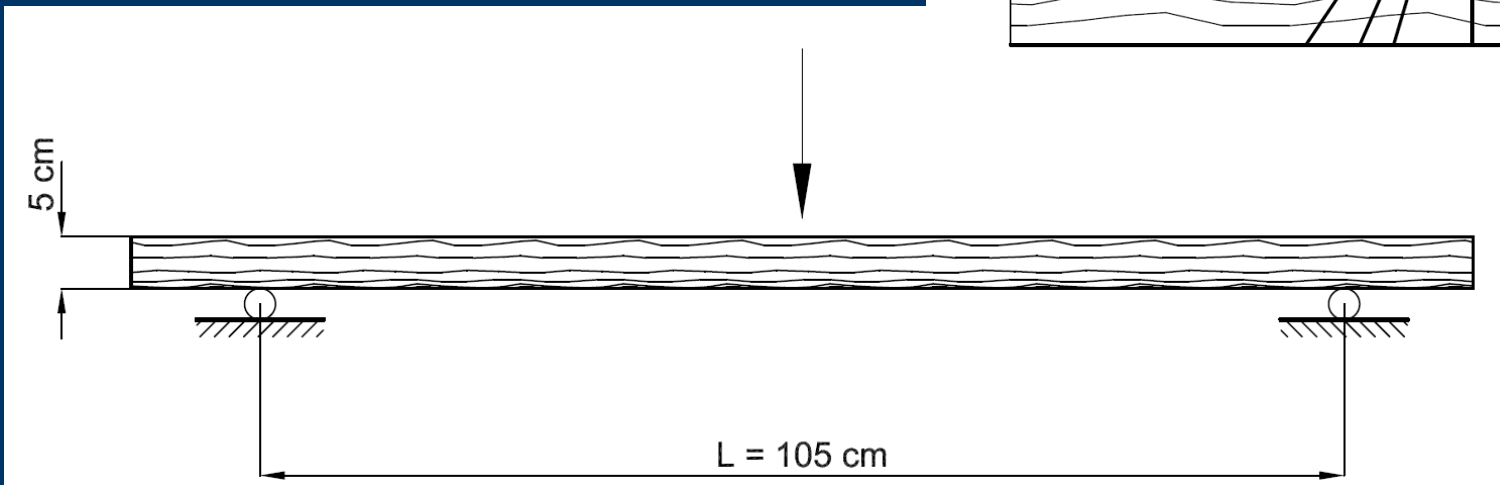
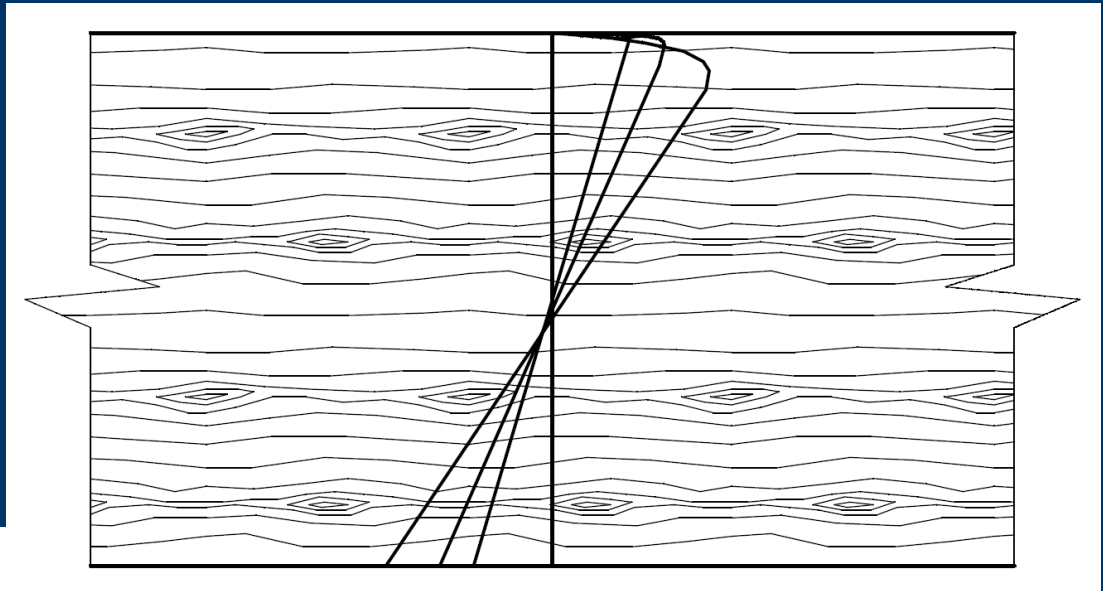
Determinação das propriedades mecânicas

Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras



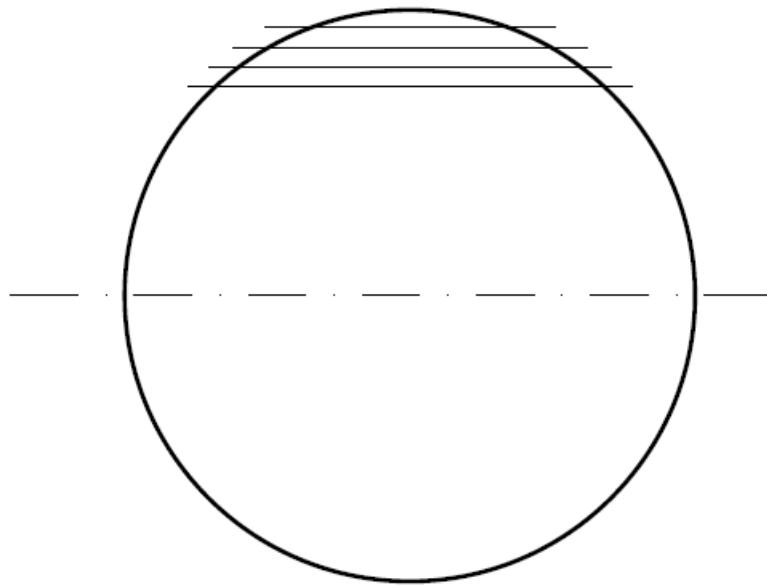
Determinação das propriedades mecânicas

Ensaio de flexão

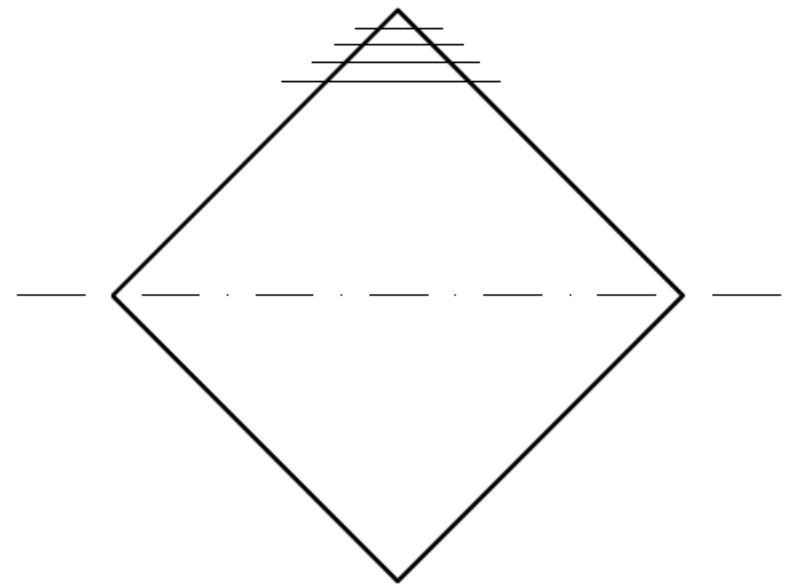


Forma e dimensão da seção

- Seções muito altas (> 30 cm) suportam tensão máxima menor: $C_d = 0.81(h^2 + 143)/(h^2 + 88)$ – cf. Hoyle, 1972, com “h” em polegadas;
- Seção circular suporta tensão máxima maior que a teórica;
- Seção quadrada fletida em torno da diagonal suporta tensão máxima maior que a teórica;



1.18 W



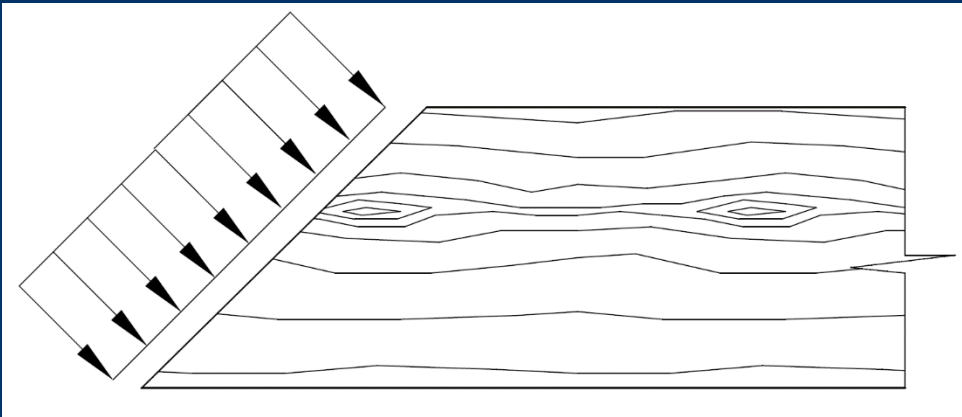
1.414 W

Aspectos a serem considerados sobre a flexão (efeito da força cortante nos deslocamentos – Hoyle, 1972)

	Deslocamentos devidos à força cortante como porcentagem dos deslocamentos associados ao momento fletor					
L / h	Carga uniforme			Carga concentrada no meio do vão		
	E/G = 6%	E/G = 13%	E/G = 20%	E/G = 6%	E/G = 13%	E/G = 20%
5	23,0	50,0	76,8	18,8	62,0	96,0
10	6,8	12,6	19,2	7,2	15,5	24,0
15	2,6	5,5	8,5	3,2	7,0	10,9
21	1,3	2,8	4,5	1,7	3,5	5,4
25	1,0	2,0	3,2	1,1	2,4	3,8
35	0,5	1,0	1,6	0,6	1,2	1,9

Correlação entre resistências

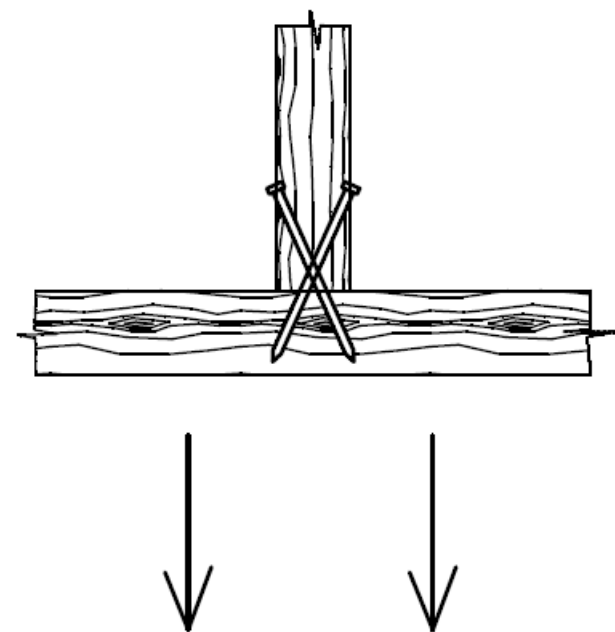
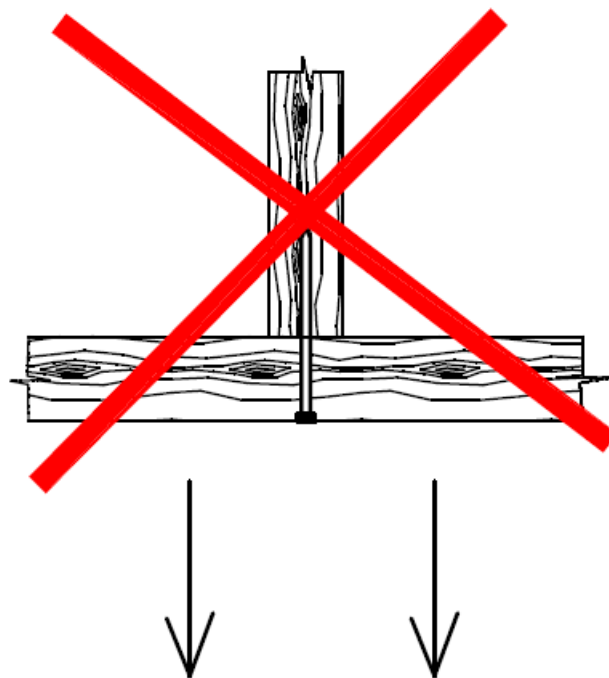
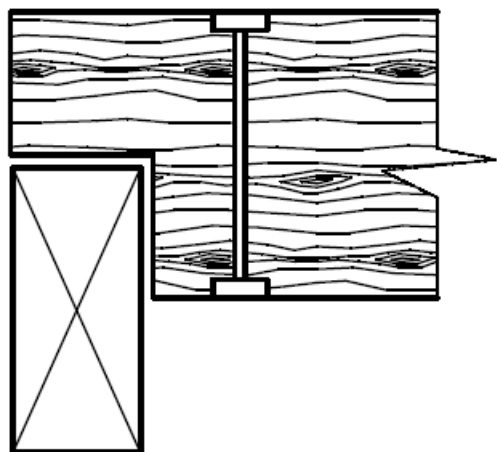
Relação entre valores característicos de tensões resistentes	
$f_{c,k} / f_{t,k}$	0,77
$f_{M,k} / f_{t,k}$	1,0
$f_{cn,k} / f_{c,k}$	0,25
$f_{v,k} / f_{c,k}$ (coníferas)	0,15
$f_{v,k} / f_{c,k}$ (dicotiledôneas)	0,12



$$f_{c\beta} = \frac{f_c \times f_{cn}}{f_c \sin^2 \beta + f_{cn} \cos^2 \beta}$$

Outras correlações e observações

- $E_M = 0,85 \times E_c$ coníferas
 - $E_M = 0,90 \times E_c$ dicotiledôneas
 - $E_n \approx 5\% E_c$
 - $G_{lt} \approx G_{lr} \approx 7\% E$
 - Tração normal às fibras:
 - A segurança não deve depender diretamente deste parâmetro;
 - Quando as tensões atingirem valores significativos, deverão ser empregados dispositivos que impeçam a ruptura decorrente dessas tensões.
-
-



Resistência à torção

NBR 7190 (Item 7.4.4)

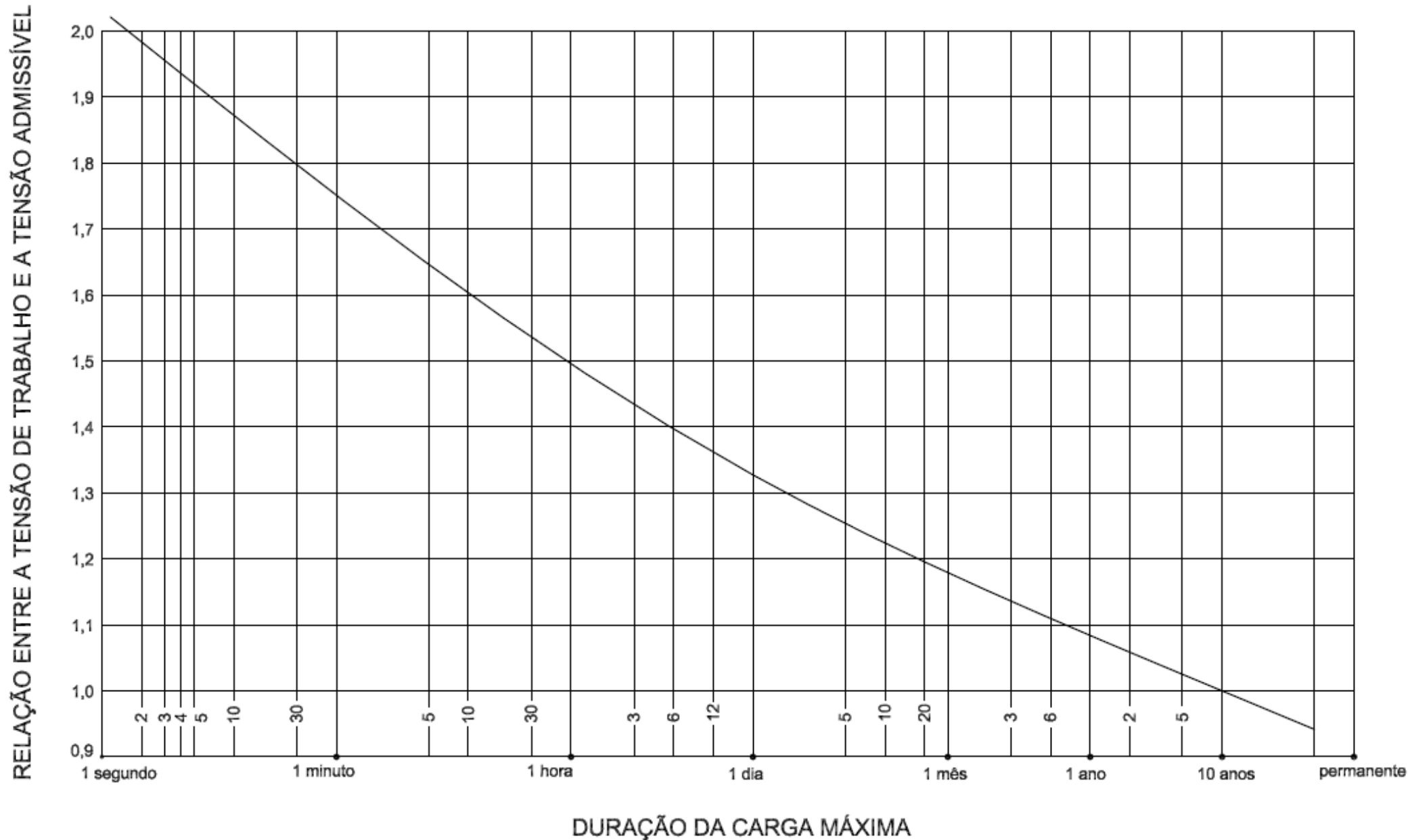
“Recomenda-se evitar torção de equilíbrio em peças de madeira, em virtude do risco de ruptura por tração normal às fibras...”.

“Quando o equilíbrio... depender dos esforços de torção... $\tau_{td} \leq f_{v0,d}$

PFEIL:

7.5.3. Flambagem lateral de viga *I* e viga celular. Em estruturas metálicas, as vigas em forma de caixa não apresentam flambagem lateral devido à sua grande rigidez à torção. Em vigas de madeira, devido à anisotropia do material, não se considera a resistência à torção e se verificam as vigas em forma de caixa como se fossem vigas *I*.

Efeito da duração do carregamento



II – Produtos de madeira

- Madeira roliça;
- Madeira serrada;
- Madeira beneficiada;
- Painéis;
- Madeira estrutural composta (madeira “engenheirada”);
- Outros;



Produtos de madeira serrada

Publicação IPT; 3010 (2009)

Produto	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Pranchão	Maior que 70	Maior que 200	Variável
Prancha	40 – 70	Maior que 200	Variável
Viga	Maior que 40	110 – 200	Variável
Vigota	40 – 80	80 – 110	Variável
Caibro	40 – 80	50 – 80	Variável
Tábua	10 – 40	Maior que 100	Variável
Sarrafo	20 – 40	20 – 100	Variável
Ripa	Maior que 20	Menor que 100	Variável
Dormente	160 – 170	220 – 240	2,00 – 5,60 / 2,80 – 5,60
Pontalete	75	75	Variável
Bloco	Variável	Variável	Variável

Usos da madeira serrada na Construção Civil

Publicação IPT; 3010 (2009)

Consumo de madeira serrada, amazônica, na Construção Civil, no Estado de São Paulo (2001)	Consumo	
	m ³	%
Estrutura de cobertura	891.700	50
Andaimes e formas para concreto	594.400	33
Forros, pisos e esquadrias	233.500	13
Casas pré-fabricadas	63.700	4
TOTAL	1.783.000	100

Painéis de madeira

Publicação IPT; 3010 (2009)

- Compensado;
- Chapas de fibra: chapa dura (Eucatex e Duratex são marcas bem conhecidas);
- Chapas de fibra: MDF (chapa de densidade média: 800 kg/m^3);
- Chapas de partículas:
 - Aglomerado (ambientes internos secos);
 - MDP (média densidade: $950 \text{ a } 1000 \text{ kg/m}^3$);
 - OSB: painéis de partículas orientadas;

Painel compensado

- Composto por lâminas desenroladas, unidas perpendicularmente entre si, sempre em número ímpar de camadas (de forma que uma compense a outra), com adesivo e eventualmente também com prensagem;
- Maior estabilidade, possibilitando melhores propriedades mecânicas que a madeira original;
- Espessuras entre 3 mm e 35 mm;
- Dimensões planas:
 - 2,10 m x 1,60 m;
 - 2,75 m x 1,22 m;
 - 2,20 m x 1,10 m (dimensão mais comum);

III – Critérios de projeto

- NBR 7190
 - Classificação de madeiras por classes de resistências:
 - Três classes (C 20, C 25 e C 30) para as coníferas;
 - Quatro classes (C 20, C 30, C 40 e C 60) de dicotiledôneas;
 - A classe é definida pela resistência à compressão da madeira dada em MPa;
 - Método de dimensionamento em estados limites:
 - $R_d \geq S_d$
 - $R_d = k_{mod} \frac{R_{nk}}{\gamma_w}$
 - k_{mod} = coeficiente que considera: tipo de produto de madeira; tempo de duração da carga; efeito da umidade; classificação estrutural da madeira;
 - γ_w = coeficiente de minoração da resistência da madeira;

Classes de resistência de dicotiledôneas (NBR 7190)

Classes de resistência (propriedades à unidade padrão U = 12%)					
Classe	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C20	20	4	9.500	500	650
C30	30	5	14.500	650	800
C40	40	6	19.500	750	950
C60	60	8	24.500	800	1000

Classes de resistência de coníferas (NBR 7190)

Classes de resistência (propriedades à umidade padrão U = 12%)

Classe	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C20	20	4	3.500	400	500
C25	25	5	8.500	450	550
C30	30	6	14.500	500	600

Coeficiente de ajuste (k_{mod})

Valores do coeficiente k_{mod1}		
Tipo de produto de madeira		
Classe de carregamento da combinação de ações	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

Classes de carregamento	
Classe	Período acumulado de tempo de atuação da carga variável principal de uma combinação de ações
Permanente	Vida útil da construção
Longa duração	Mais de seis meses
Média duração	1 semana a 6 meses
Curta duração	Menos de uma semana
Instantânea	Muito curta

Coeficiente de ajuste (k_{mod})

Valor do coeficiente k_{mod2}		
Tipo de produto de madeira		
Classe de umidade	Madeira serrada Madeira laminada e colada Madeira compensada	Madeira recomposta
1 e 2	1,0	1,0
3 e 4	0,8	0,9

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	$\geq 25\%$

Coeficiente de ajuste (k_{mod})

Valores do coeficiente k_{mod3}

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

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

Valores de γ_w

Esforço	f_k / f_m	γ_w
Compressão paralela às fibras	0,7	1,4
Tração paralela às fibras	0,7	1,8
Cisalhamento paralelo às fibras	0,54	1,8

Exemplo de caso usual (PFEIL, 2007):

- Madeira serrada de 2^a categoria e combinação de ações de longa duração:
 - Classes de umidade 1 e 2:
 - $k_{mod} = 0,7 \times 1,0 \times 0,8 = 0,56$
 - Classes de umidade 3 e 4:
 - $k_{mod} = 0,7 \times 0,8 \times 0,8 = 0,45$

Recomendações para projeto com madeira serrada (geral):

- Deve sempre ser elaborado o projeto;
 - Especificação:
 - Evitar excessos de cortes e emendas;
 - Adequar o projeto às peças padronizadas, atentando sobretudo para comprimentos e larguras disponíveis, ao especificar as dimensões das peças:
 - NBR 7203 – Madeira serrada;
 - NBR 9480 – Classificação de madeira serrada de folhosas;
 - NBR 12498 – Madeira serrada – dimensões e lotes;
-
-

Recomendações para projeto com madeira serrada (especificação da madeira a ser empregada)

- Especificar tipo de madeira adequado ao projeto por seu nome popular ou comercial associado ao nome científico (ver fichas IPT, p. ex.);
- Controlar o recebimento por inspeção da anatomia (em laboratório especializado, por exemplo) – recomendado pela grande variabilidade de madeiras;
- NBR 7190 – especificação apenas pela classe de resistência:
 - Apesar disso, há ainda a necessidade de controlar espécie quando se precisa empregar madeiras naturalmente resistentes ou permeáveis a tratamentos;

Recomendações para projeto com madeira serrada (umidade)

- Madeira seca: teor de umidade em equilíbrio com a umidade relativa do ambiente onde será usada;
- Madeira verde: teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras (p.s.f.), que é da ordem de 30%;
- Especificação da umidade:
 - Especificar o teor de umidade médio e os valores mínimo e máximo, considerando o local de uso da madeira;
 - Verificar o teor de umidade por lotes;

Recomendações para projeto com madeira serrada (umidade de equilíbrio)

Cidade	U (%)	T (° C)	U _{eq} (%)
Belém	86,5	26,0	15,2
Teresina	77,5	26,5	14,9
Brasília	67,6	21,2	12,5
São Paulo	78,4	19,3	15,5
Porto Alegre	76	19,5	14,8

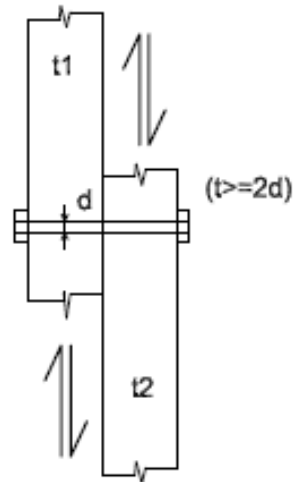
Ligações

- Pinos metálicos;
 - Cavilhas;
 - Conectores de anel metálico ou de chapas prensadas;
 - Entalhes
-
-

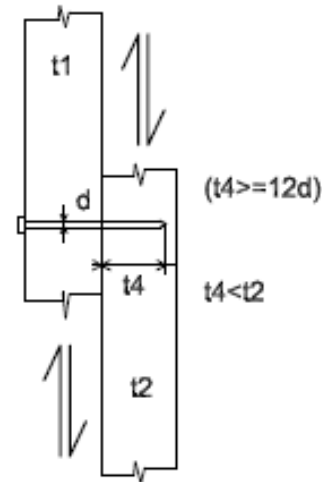
Pinos metálicos

Pinos em corte simples

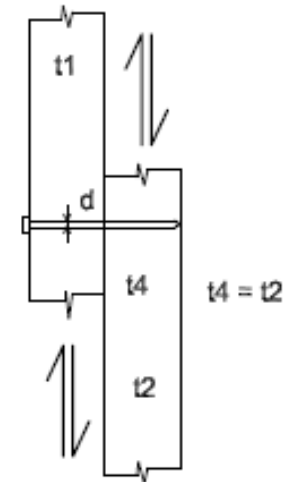
t é o menor valor entre t_1 e t_2



Parafusos

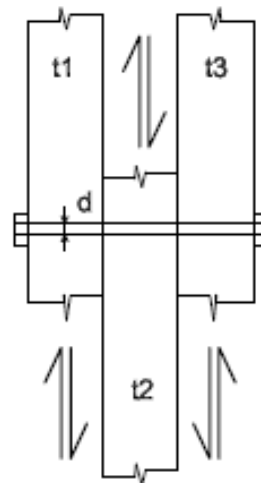


Pregos

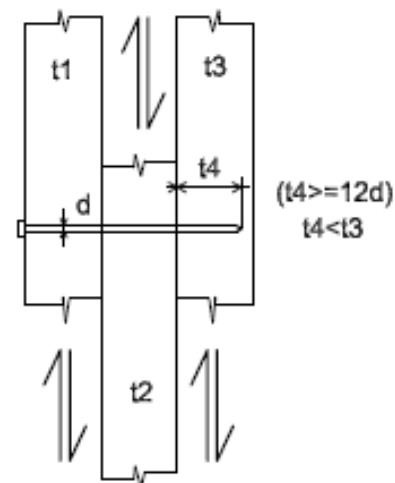


Pinos em corte duplo

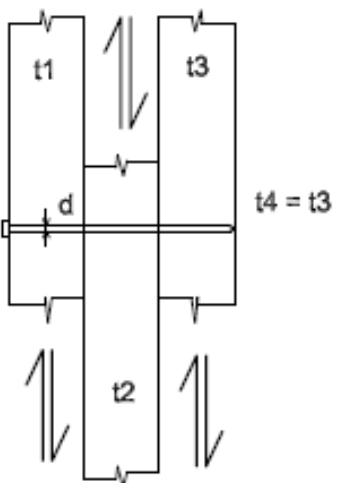
t é o menor valor entre t_1 e t_2



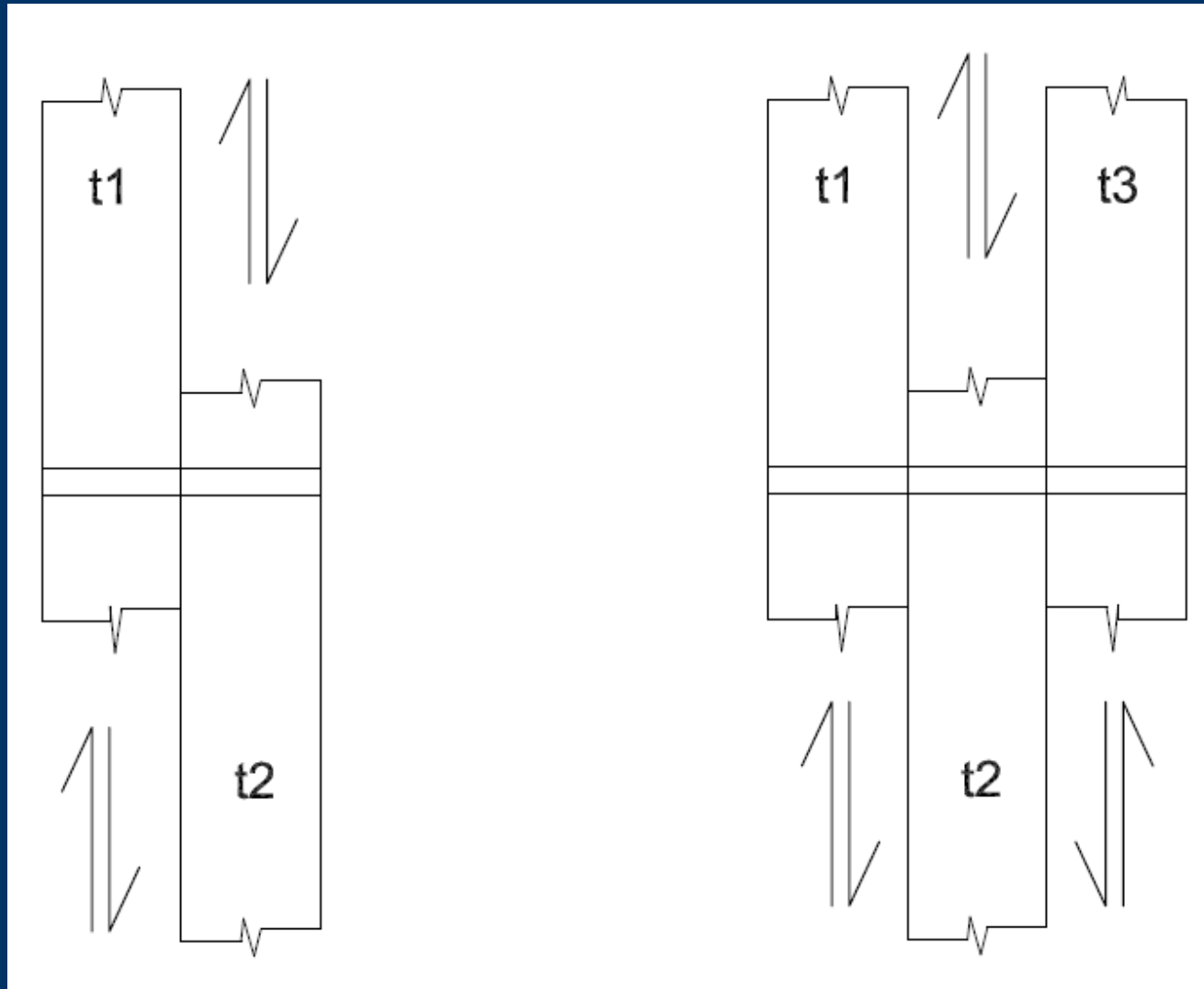
Parafusos



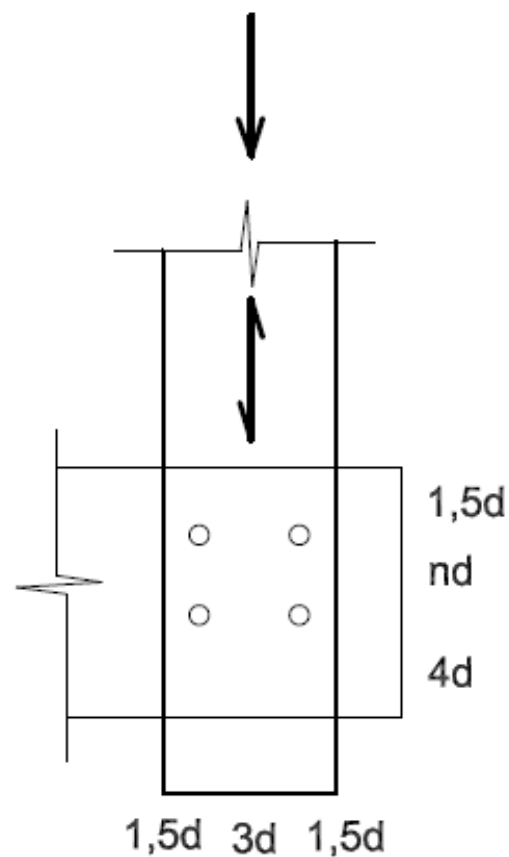
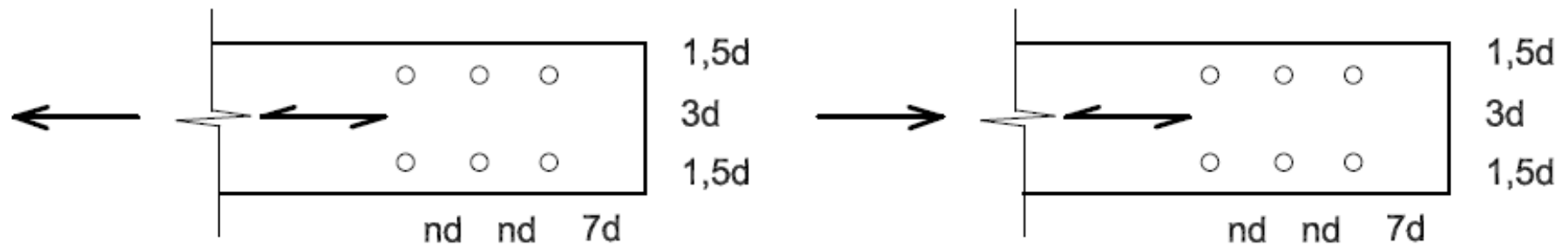
Pregos



Cavilhas

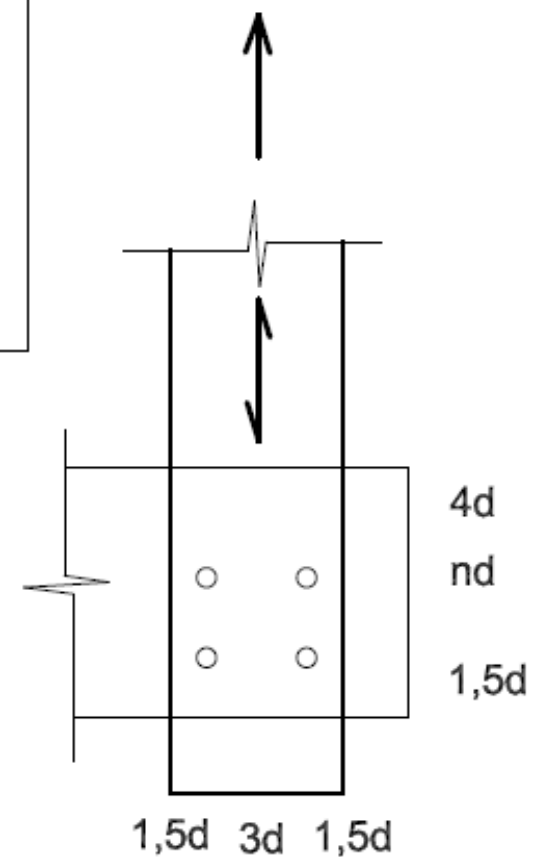


Espaçamentos entre pinos

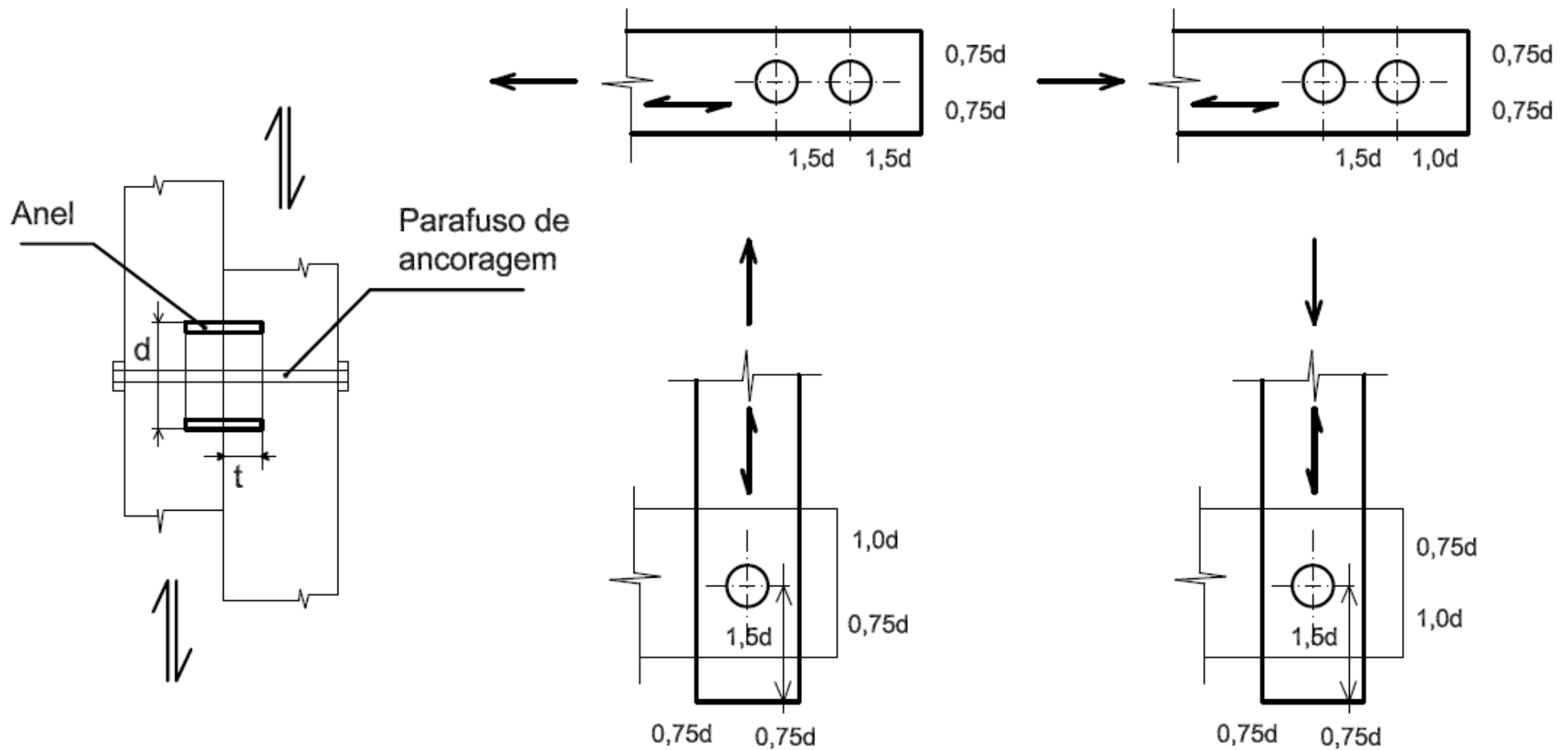


Pregos, cavilhas e
parafusos ajustados
 $n = 6$

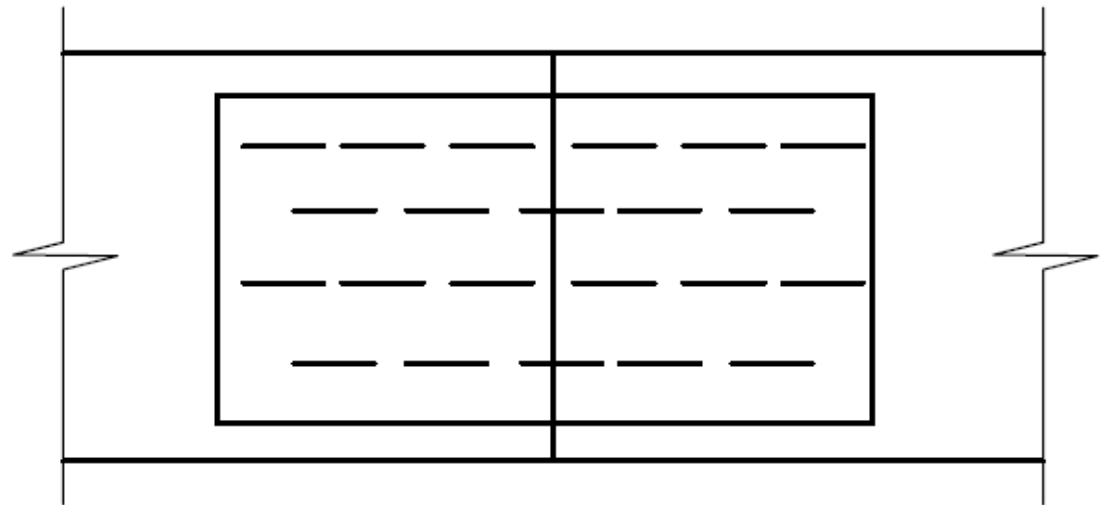
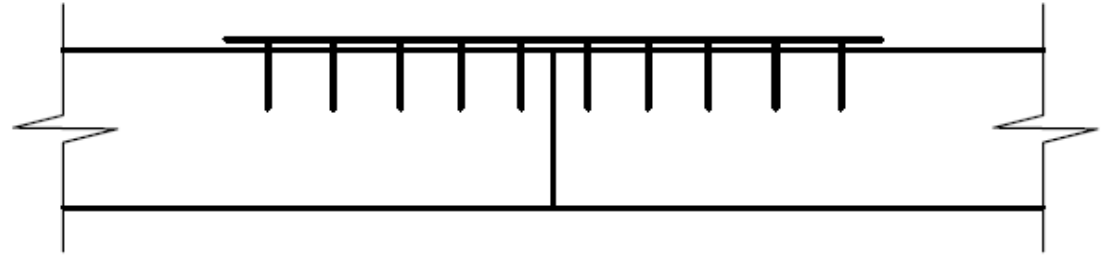
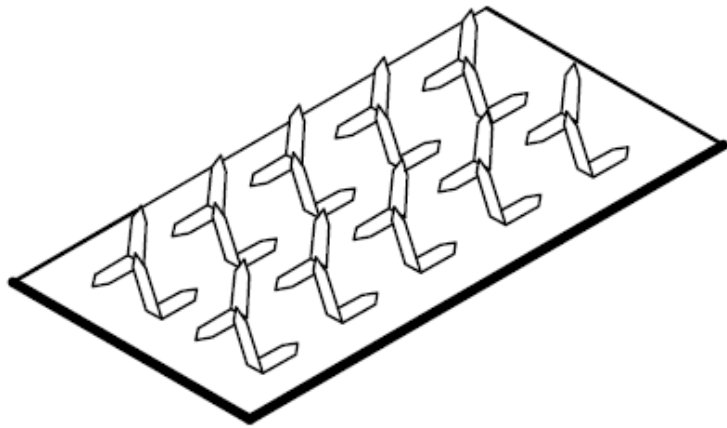
Parafusos
 $n = 4$



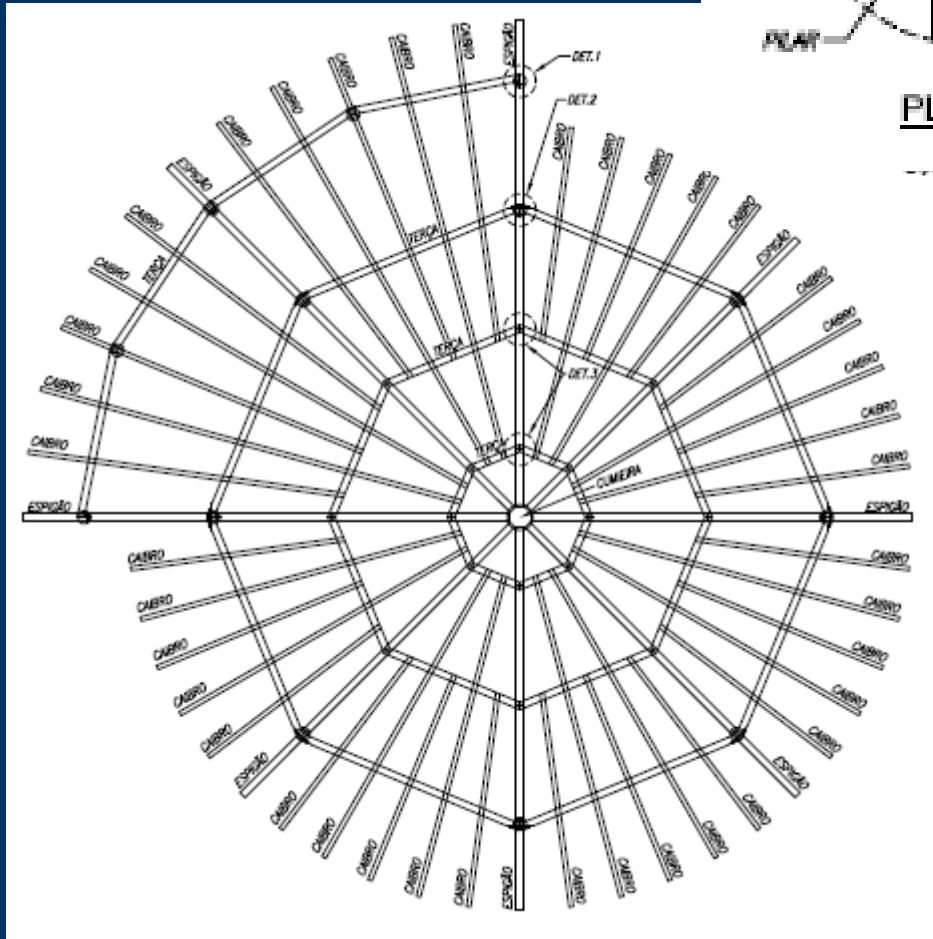
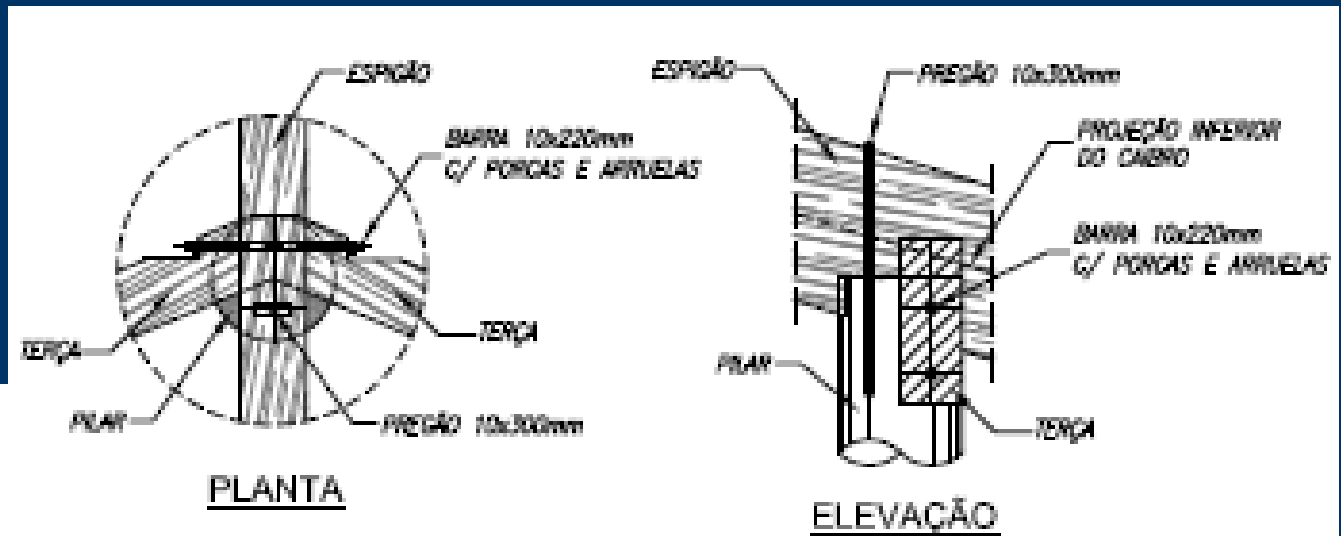
Ligações com anéis metálicos



Chapas com dentes estampados

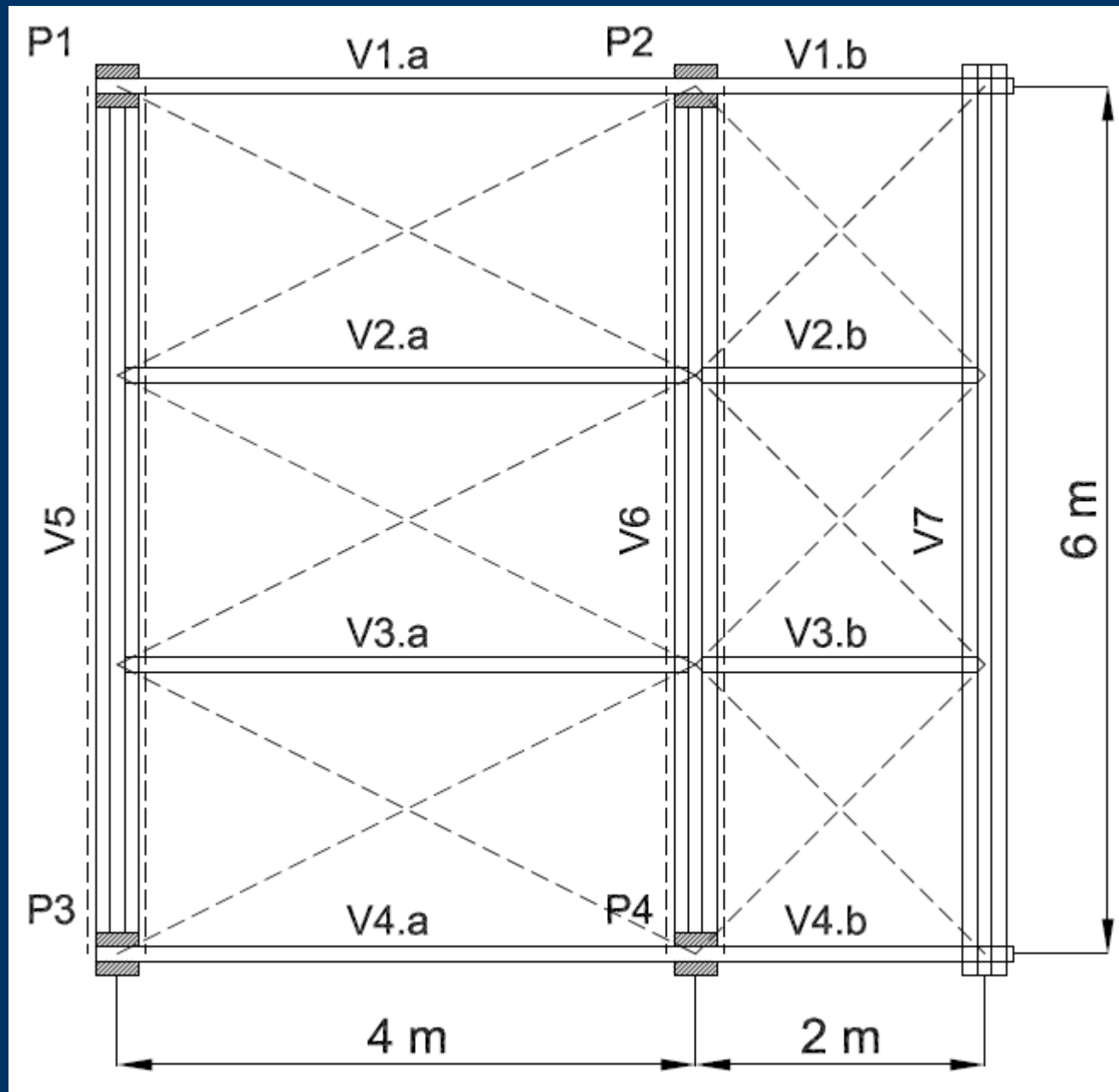


Entalhes

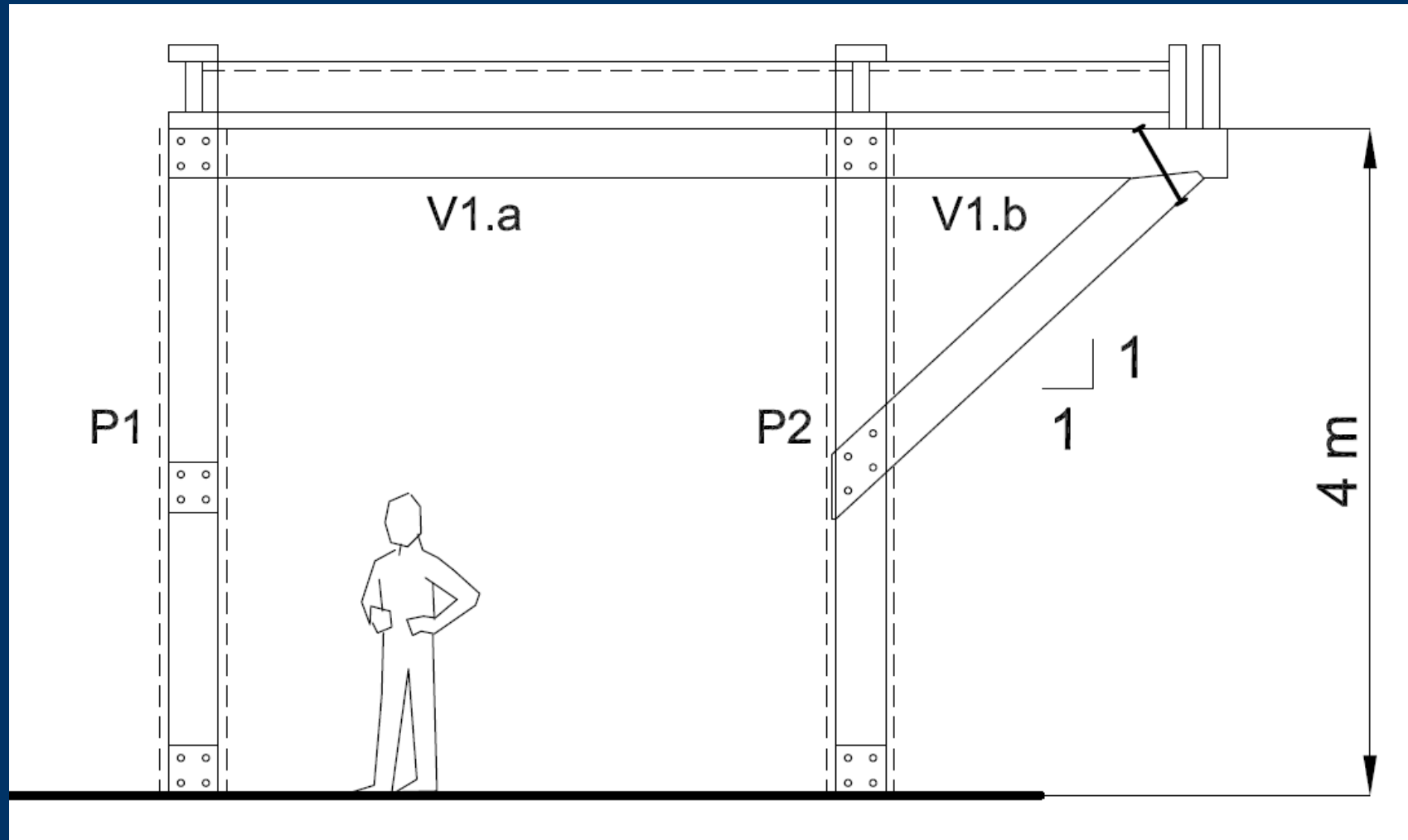




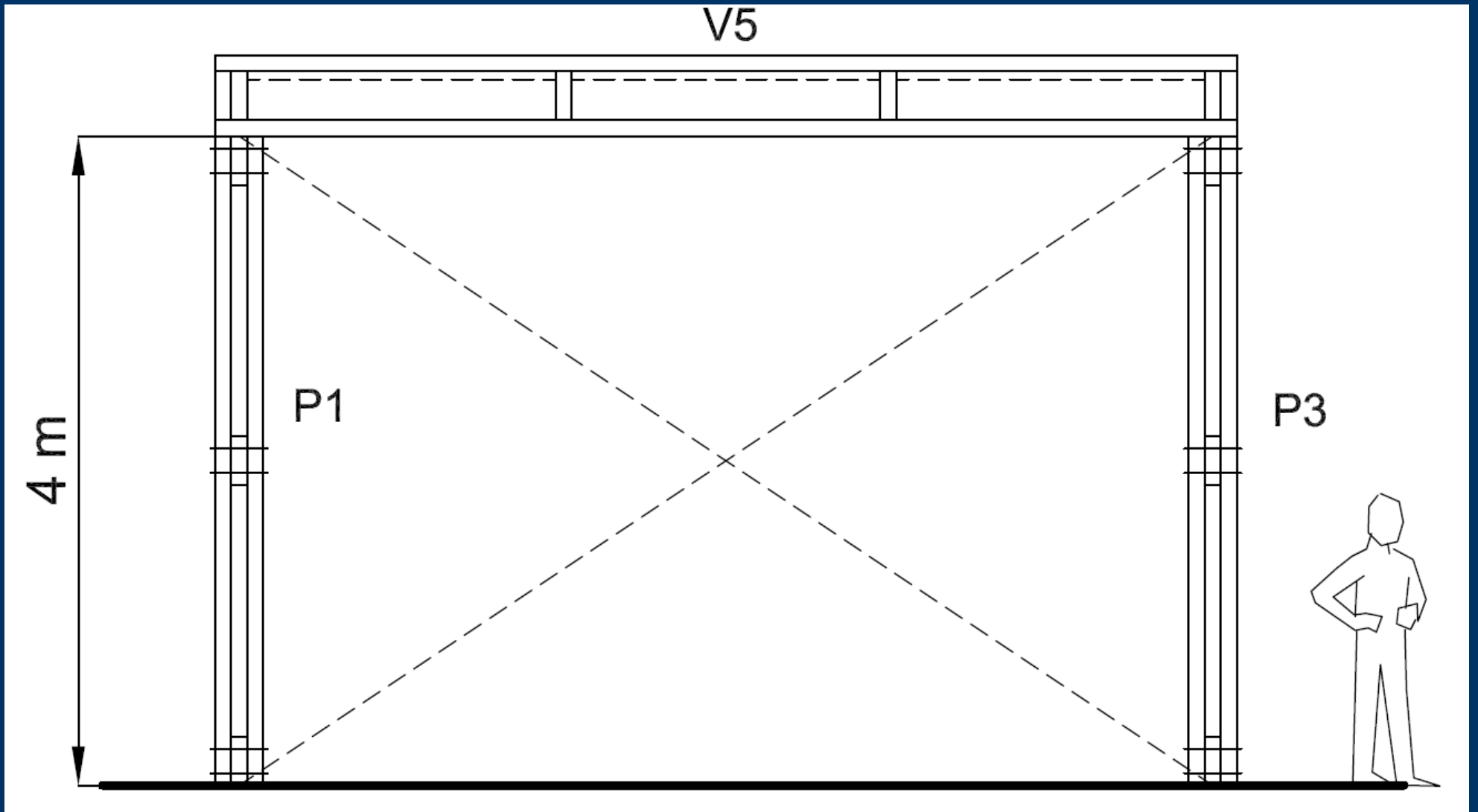
Exemplo de aplicação



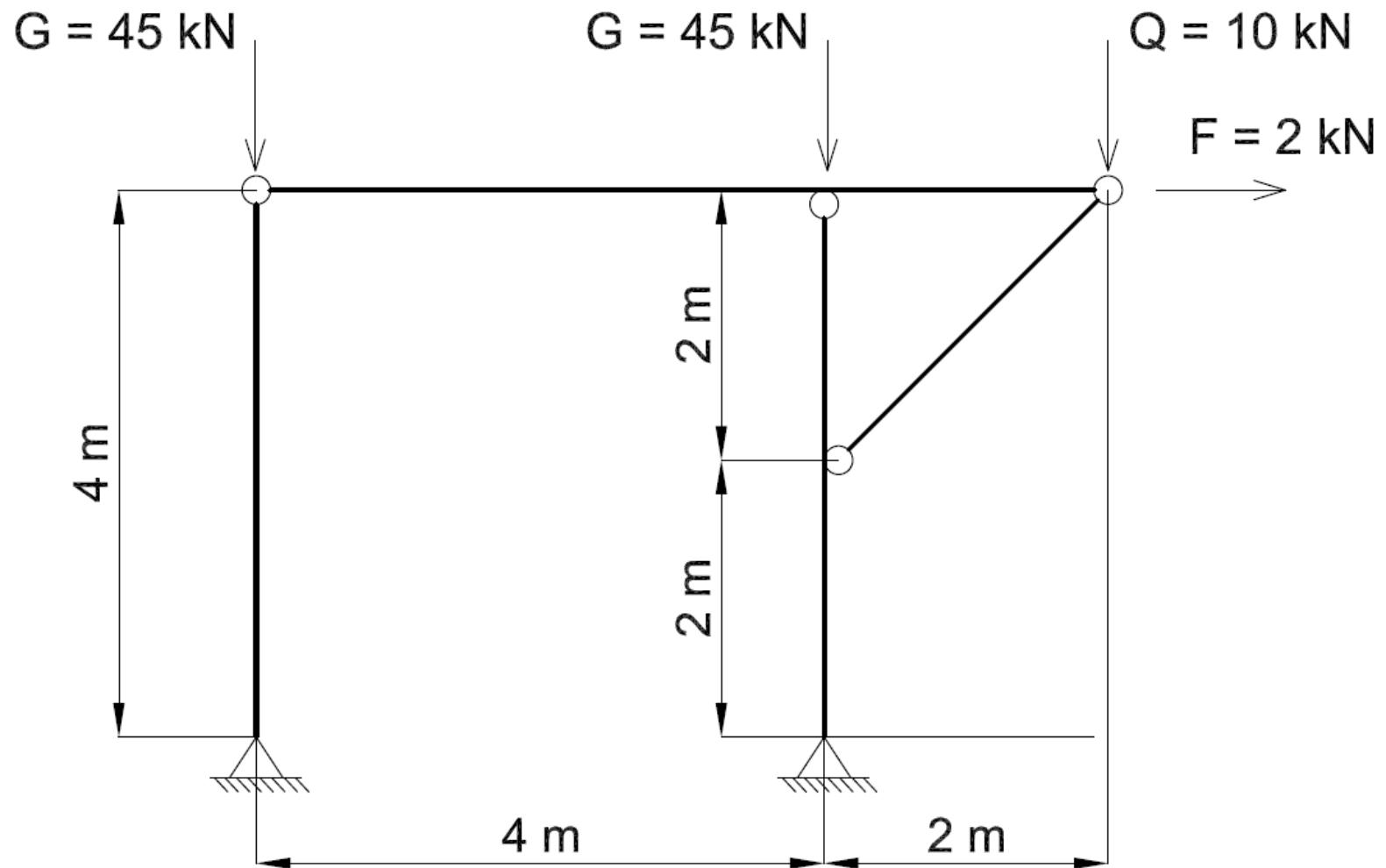
Elevações

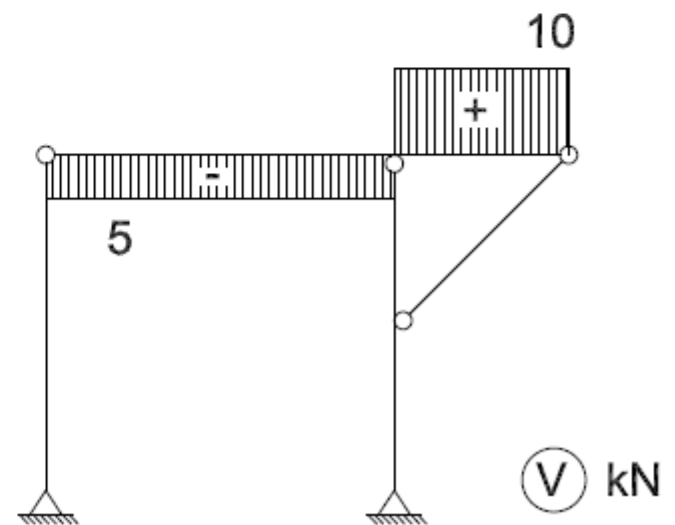
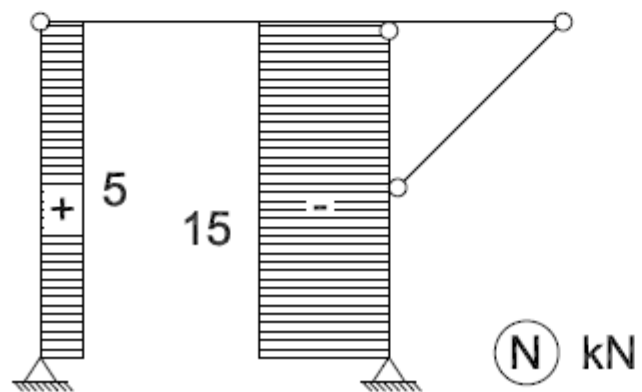
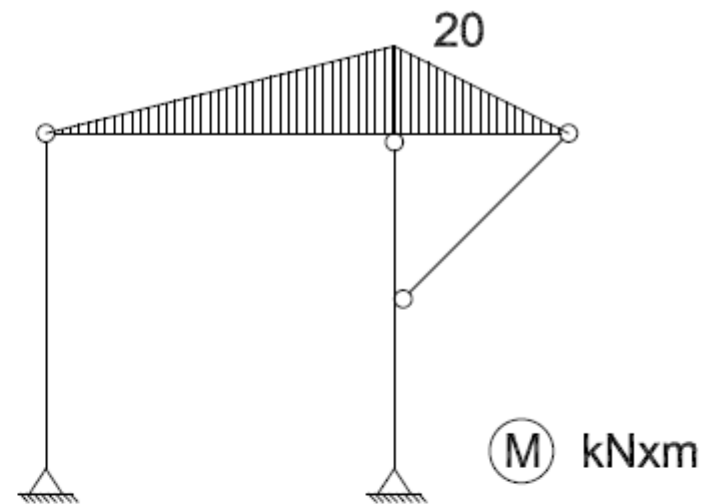
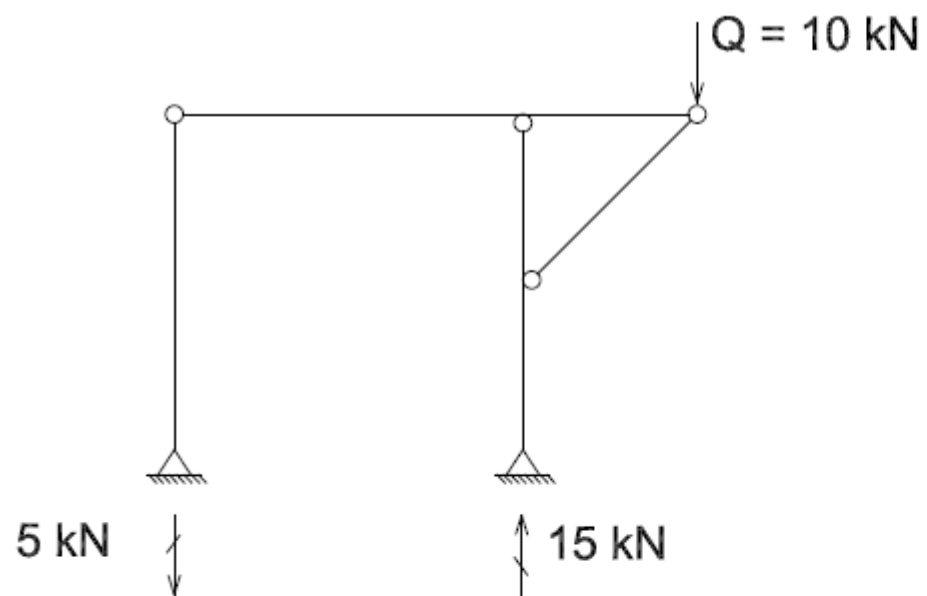


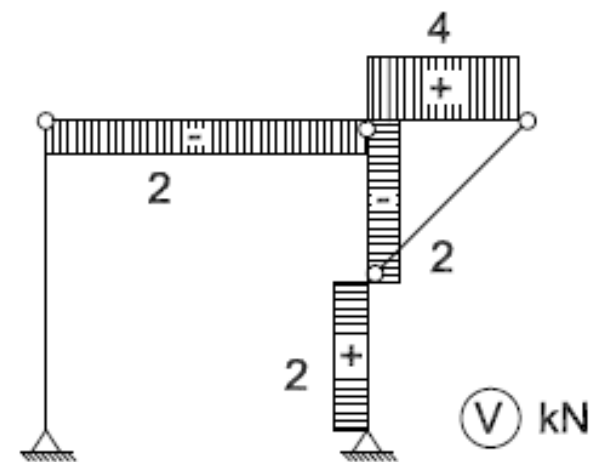
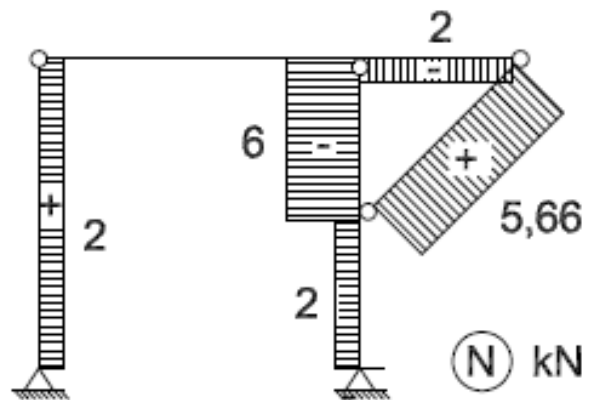
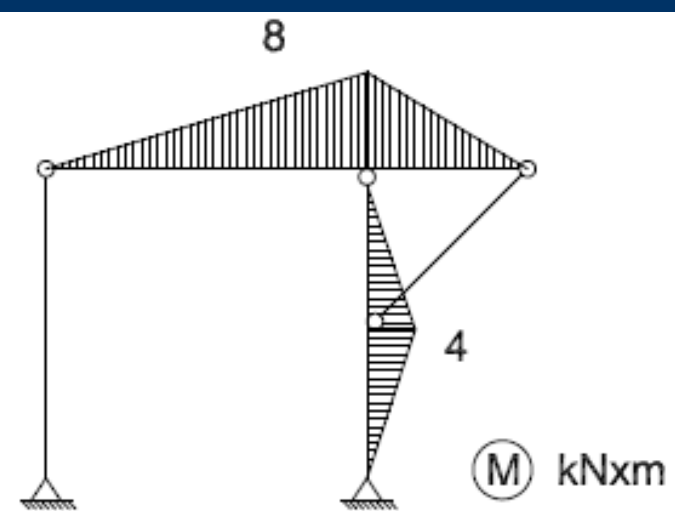
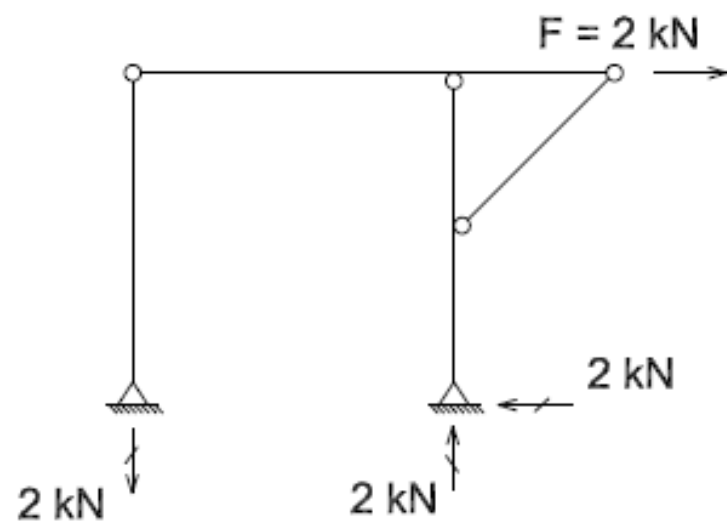
Elevações



Ações

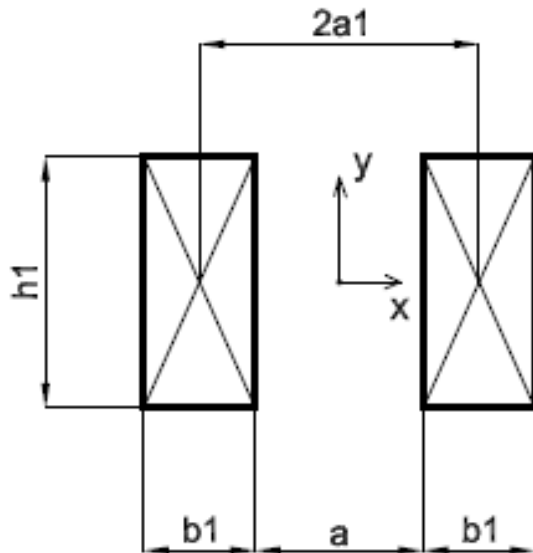






Dados do material

- Dicotiledônea Classe C 40
 - $f_{c0k} = 40 \text{ MPa}$
 - Cargas de longa duração; madeira de segunda categoria; classes de umidade 1 e 2;
 - $f_{c0d} = 0,56 \times 40/1,4 = 16 \text{ MPa (1,6 kN/cm}^2\text{)}$
 - $E_{c0,m} = 19500 \text{ MPa}$
 - $E_{c0,ef} = 0,56 \times 19500 = 10920 \text{ MPa (1092 kN/cm}^2\text{)}$
 - $f_{vk} = 6 \text{ MPa}$



b_1 (cm)	8
h_1 (cm)	18
a (cm)	12
a_1 (cm)	10
A_1 (cm ²)	144
A (cm ²)	288
I_1 (cm ⁴)	3888
I_2 (cm ⁴)	768
I_x (cm ⁴)	7776
I_y (cm ⁴)	30336

m	4
α_{fay}	1,25

Pilar P1

Beta1	0,24
$I_{y,ef}$ (cm ⁴)	7424
$E_{c0,ef}$ (kN/cm ²)	532
L_0 (cm)	400
F_{ey} (kN)	244
F_{ex} (kN)	255
r_x (cm)	5,20
r_y (cm)	5,08

Lambdax	77
Lambay	79

Direção y	
N_d (kN)	63
e_a (cm)	1,33
e_i (cm)	0
e_d (cm)	2,28
M_d (kNxcn)	143,54
Tensão (kN/cm ²)	0,38