

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

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 5

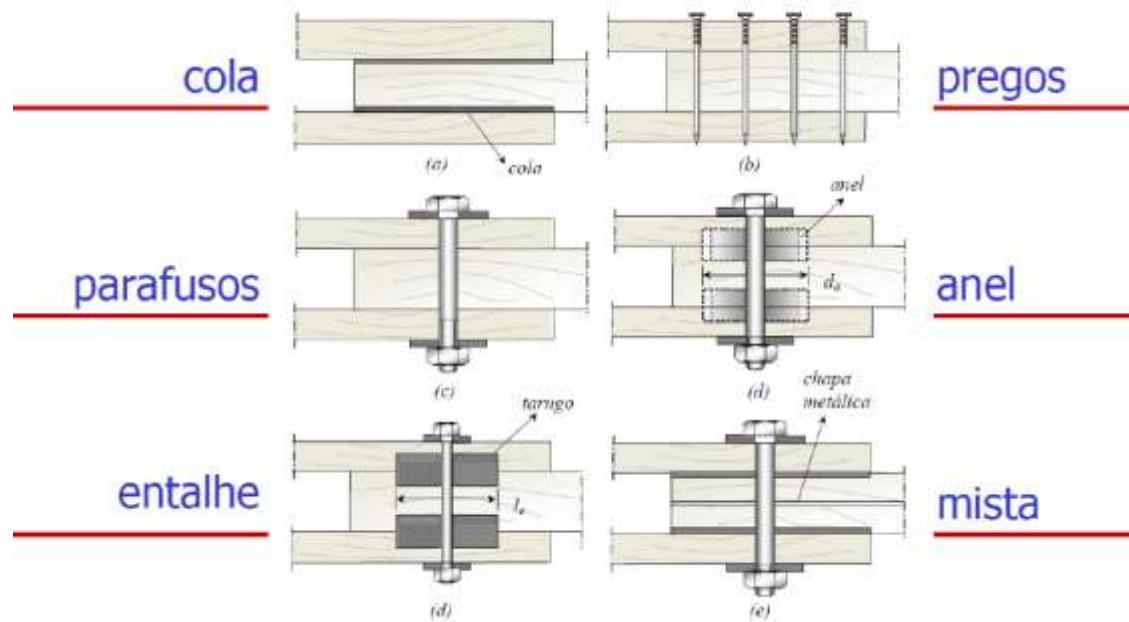
Ligações

1. Generalidades

As ligações mecânicas tradicionais em peças de madeira podem ser divididas em quatro grupos em função do modo de transmissão da força entre os elementos conectados:

- a) ligações por pinos metálicos;
- b) ligações por anéis metálicos e chapas com dentes estampados;
- c) ligações por sambladuras ou entalhes;
- d) ligações coladas.

▪ Dispositivos de ligação:



As ligações por pinos possuem comportamento rígido por um misto de flexão do pino e/ou embutimento do pino na madeira. Se enquadram no primeiro grupo as ligações com parafusos passantes com porcas e arruelas (sextavado e francês), parafusos de rosca soberba, pregos e pinos metálicos ajustados.

As ligações por anéis metálicos e chapas com dentes estampados transmitem as forças entre os elementos de madeira de forma distinta da anterior, caracterizadas por grandes áreas de contato.

As ligações por sambladuras ou entalhes são aquelas cujo esforço é transmitido diretamente de um elemento de madeira ao outro por compressão em uma área determinada, mediante uma geometria que permita essa transferência de esforços. Nessas ligações deve-se verificar a resistência à compressão nesse contato, em ambos os elementos, levando-se em consideração a inclinação dessa compressão em cada elemento. Deve-se avaliar também os esforços de cisalhamento na região dessas ligações. Elementos com seções reduzidas pelos entalhes devem ser verificados aos esforços solicitantes com essa seção reduzida.

As ligações coladas são aquelas formadas pela união entre elementos de madeira serrada por meio de adesivos estruturais. As peças de madeira serrada podem ser coladas de face a face, borda a borda e entre as extremidades (na direção longitudinal). A ligação entre as extremidades, realizada por meio da colagem estrutural de peças usinadas por emendas denteadas (ou finger-joint em inglês) produzidas sob controle de qualidade industrial, devem atender aos requisitos do fabricante do adesivo e a ABNT NBR 7190-6:2022. Os valores de resistência mecânica de peças de madeira serrada unidas por emendas denteadas devem ser apresentados pelo fornecedor de acordo com os valores da Tabela 3. As peças de madeira serrada unidas por emendas denteadas podem ser utilizadas como peças simples de madeira serrada em sistemas estruturais redundantes (por exemplo o woodframe) ou empregadas no processo de fabricação de peças estruturais de MLC e MLCC.

No cálculo das ligações, não é permitido considerar os esforços transmitidos por elementos secundários como estribos, braçadeiras ou grampos.

2. Critérios de dimensionamento

O dimensionamento dos elementos de ligação para os estados-limite últimos deve atender às condições de segurança conforme a seguir:

$$R_d \geq S_d \quad (4)$$

onde

R_d é o valor de cálculo da resistência da ligação;

S_d é o valor de cálculo das solicitações nela atuantes.

O valor de cálculo da resistência da ligação é definido a partir do valor característico da resistência da ligação, calculado conforme a seguinte equação:

$$R_d = k_{mod1} k_{mod2} \frac{R_k}{\gamma_{lig}} \quad (5)$$

O valor do coeficiente de minoração das propriedades de resistência da ligação é definido como sendo $\gamma_{lig} = 1,4$.

2.1 Ligações com pinos metálicos

Os elementos de ligações por pinos metálicos devem respeitar a Tabela 13 da NBR 7190:2022, a seguir.

Tabela 13 – Materiais usados em pinos metálicos

Especificação do pino metálico	Classificação	$f_{y,k}$ MPa	$f_{u,k}$ MPa	Diâmetro nominal mínimo
Prego liso com cabeça padrão ABNT NBR 6627	ABNT NBR 5589	-	635	$3,00 \geq \text{mm } d \geq 3,54 \text{ mm}$
		-	600	$3,55 \geq \text{mm } d \geq 4,99 \text{ mm}$
		-	490	$5,00 \geq \text{mm } d \geq 10,00 \text{ mm}$
Parafuso passante padrão ASTM	A307	250	415	$d \geq 3/8 \text{ pol ou } d \geq 10 \text{ mm}$
	A325	635	825	
	A490	895	1 035	
Parafuso passante padrão ISO 898-1	Classe 4.6	235	400	$d \geq 10 \text{ mm}$
	Classe 8.8	640	800	
	Classe 10.9	900	1 000	
Parafuso de rosca soberba		250	415	$d \geq 3/8 \text{ pol ou } d \geq 9,5 \text{ mm}$

Espaçamento entre Pinos Metálicos

Observam-se as disposições da Tabela 14 da NBR 7190:2022, a seguir, conforme explicações dadas na Figura 18 da mesma Norma.

Tabela 14 – Espaçamentos e distâncias mínimas para ligações com pinos metálicos

Espaçamento ou distância	Ângulo α	Pregos com pré-furação	Parafusos passantes, parafusos de rosca soberba e parafusos ajustados	Pinos lisos
Espaçamento a_1 (paralelo às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + 3 \cos \alpha) d$	$(4 + 3 \cos \alpha) d$	$(3 + 3 \cos \alpha) d$
Espaçamento a_2 (perpendicular às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 6 \sin \alpha) d$	4 d	3.d
Distância $a_{3,t}$ (extremidade carregada)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(7 + 5 \cos \alpha) d$	Maior entre 7 d e 80 mm	Maior entre 7 d e 80 mm
Distância $a_{3,c}$ (extremidade não carregada)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	7 d	$(1 + 6 \sin \alpha) d$	Maior entre $[(a_{3,t} \sin \alpha) d]$ e d
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	7 d	4 d	3d
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	7 d	$(1 + 6 \sin \alpha) d$	Maior entre $[(a_{3,t} \sin \alpha)] d$ e d
Distância $a_{4,t}$ (borda lateral carregada)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	Para $d < 5$ mm: $(3 + 2 \sin \alpha) d$	Maior entre $(2 + 2 \sin \alpha) d$	Maior entre $(2 + 2 \sin \alpha) d$
		Para $d \geq 5$ mm: $(3 + 4 \sin \alpha) d$	e 3 d	e 3 d)
Distância $a_{4,c}$ (borda lateral não carregada)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3 d	3 d	3 d

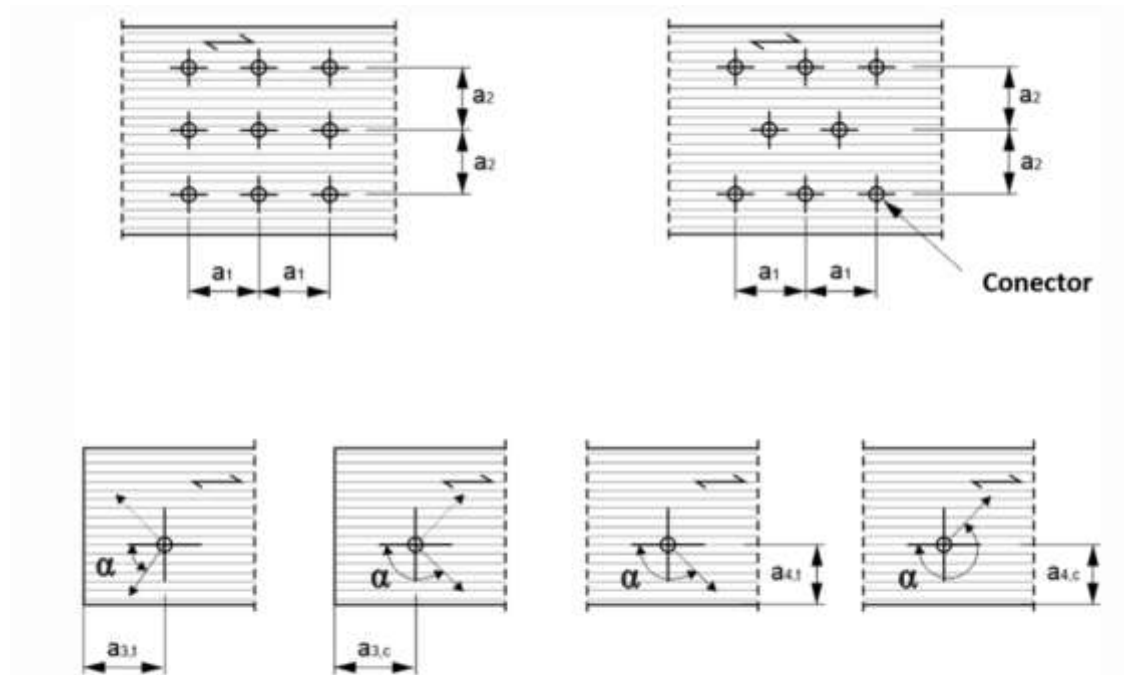


Figura 18 – Espaçamentos e distâncias mínimas para ligações com conectores metálicos

Pré-furação

Em uniões por pinos metálicos, deve ser feita pré-furação de acordo com a Tabela 16 da NBR 7190:2022, a seguir.

Tabela 16 – Diâmetro de pré-furação para ligações em madeira

Pino metálico	Diâmetro de pré-furação
Pregos	Coníferas $d_0 = 0,85 d$ Folhosas: $d_0 = 0,98 d$
Parafusos passantes	$d \leq d_0 \leq d + 1\text{mm}$
Parafusos com rosca soberba	$d_0 = 0,70 d$

Em estruturas provisórias de madeira de baixa densidade, como formas, esse cuidado é dispensado no uso de pregos.

Resistência de embutimento da madeira

Os esforços resistentes à solicitação de compressão de pinos embutidos em orifícios da madeira são determinados por ensaio específico de embutimento, realizado conforme ABNT da NBR 7190-3. Na ausência de determinação experimental específica, permite-se a utilização das equações nesta subseção.

Para determinação da resistência de embutimento, são necessários os valores da densidade característica. Na falta de informações mais precisas provenientes da caracterização mecânica, é utilizada a seguinte relação

entre a densidade média e a densidade característica, em elementos de madeira serrada e LVL, para qualquer ângulo em relação às fibras:

$$\rho_k = \frac{\rho_{med}}{1,2} \quad (6)$$

Para pregos com diâmetro menor que 8 mm, deve-se aplicar as seguintes equações para cálculo do valor característico da resistência ao embutimento, em elementos de madeira serrada e LVL:

- Sem pré-furação:

$$f_{e,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \quad (\text{em N/mm}^2 = \text{MPa})$$

- Com pré-furação:

$$f_{e,k} = 0,081 (1 - 0,01 d) \rho_k \quad (\text{em N/mm}^2) = \text{MPa}$$

Para pregos com diâmetro maior que 8 mm e parafusos de até 30 mm de diâmetro, dispostos com ângulo α em relação às fibras, deve-se aplicar os valores característicos para o cálculo da resistência ao embutimento do item 6.2.5 da Norma.

Resistência do pino metálico

A resistência de ligações com pinos metálicos deve atender a ABNT NBR 7190-5. No caso de impossibilidade de realização do ensaio, pode-se estimar a resistência característica da ligação pela seguinte equação:

$$R_k = F_{v,Rk} n_{sp} n_{ef} \quad (7)$$

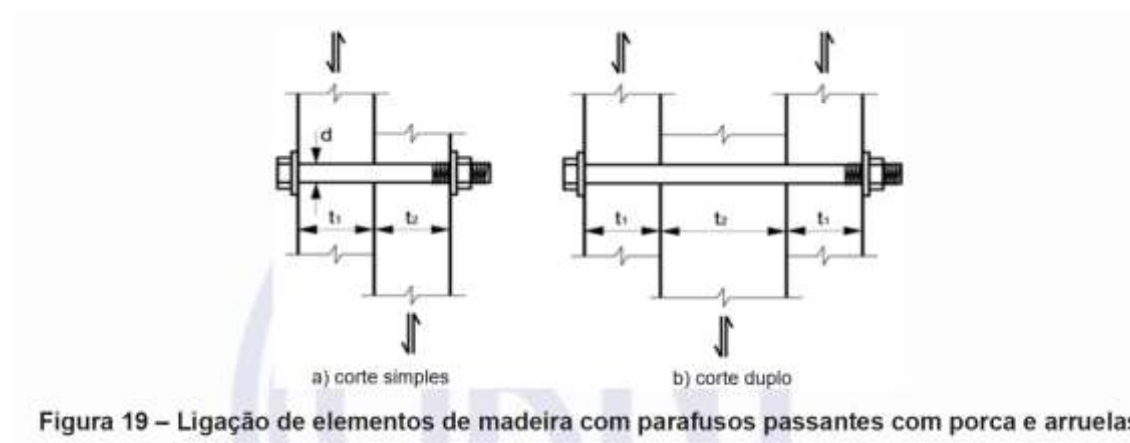
onde

n_{sp} é a quantidade de seções de corte por pino metálico, n_{ef} é o número efetivo de pinos por ligação;

$F_{v,Rk}$ é a resistência característica de um pino, correspondente a uma dada seção de corte.

Para que a ligação possa ser considerada resistente, devem ser atendidas as especificações de espaçamentos e de pré-furação, e as seguintes:

a) tanto na configuração em corte simples como na configuração em corte duplo, o diâmetro efetivo do parafuso passante não pode exceder a metade da menor espessura dos elementos de madeira interligados. A Figura 19 ilustra a configuração de corte simples e duplo para ligações com parafusos passantes com porca e arruela;



- b) o diâmetro efetivo do prego não pode ser maior que um quinto da menor espessura dentre as peças de madeira ligadas. Permite-se que o diâmetro efetivo do prego seja maior que um quarto da espessura da peça de madeira mais delgada, desde que o diâmetro da pré-furação seja igual ao diâmetro efetivo do prego;
- c) a penetração do prego em qualquer uma das peças ligadas não pode ser menor que a espessura da peça mais delgada. Caso contrário, o prego é considerado não resistente;
- d) em ligações localizadas, a penetração da ponta do prego na peça de madeira mais distante de sua cabeça deve ser de pelo menos $12d$ ou igual à espessura dessa peça. Em ligações corridas, como em peças compostas ligadas continuamente, esta penetração pode ser limitada ao valor de t_1 . A Figura 20 ilustra a configuração de corte simples e duplo para ligações com pregos;

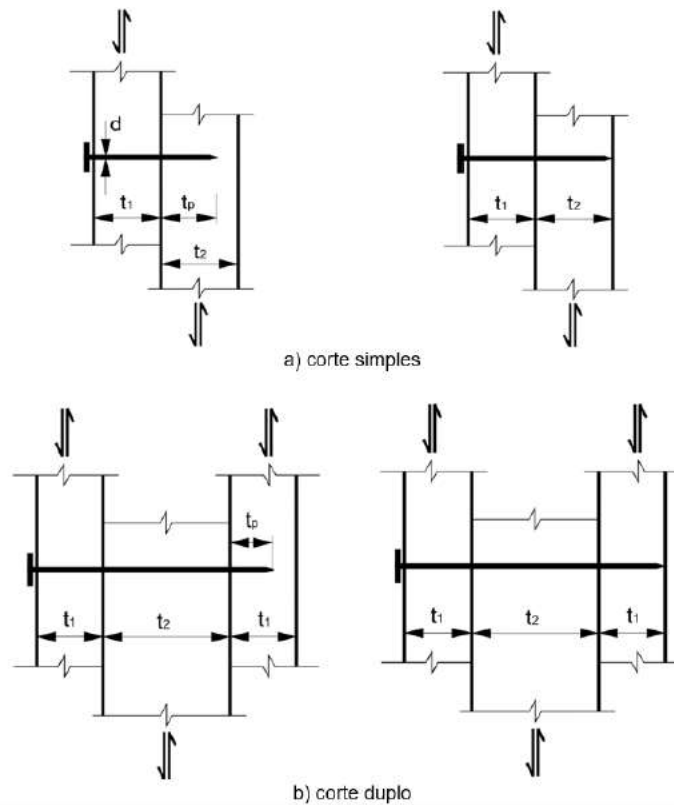


Figura 20 – Ligações de elementos de madeira com pregos

A resistência característica de uma seção de corte de um prego é determinada como o menor valor dentre os obtidos pelas Equações indicadas na Tabela 17 ou Tabela 18, que são regidas pelos diferentes modos de falha, em função da resistência de embutimento e da espessura dos elementos de madeira interligadas, do momento resistente do prego metálico e do diâmetro efetivo do prego.

Tabela 18 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos (uma seção de corte) (continua)

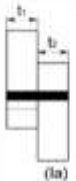
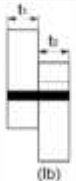
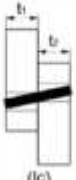
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
 <p>(la)</p>	$F_{V,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d$
 <p>(lb)</p>	$F_{V,Rk2} = f_{e1,k} t_2 d \beta$
 <p>(lc)</p>	$F_{V,Rk3} = \frac{f_{e1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Tabela 18 (conclusão)

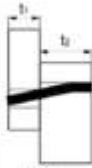


Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
 <p>(IIa)</p>	$F_{v,Rk4} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(IIb)</p>	$F_{v,Rk5} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(III)</p>	$F_{v,Rk6} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
<p>$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos seis modos de falha.</p>	

Tabela 19 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos (duas seções de corte) (continua)

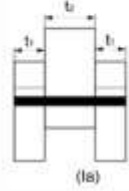
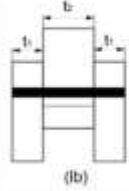
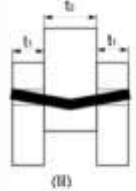
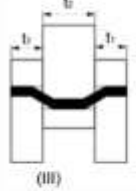
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
 <p>(1a)</p>	$F_{V,RK1} = f_{e1,k} t_1 d$
 <p>(1b)</p>	$F_{V,RK2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta$

Tabela 19 (conclusão)

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
 <p>(II)</p>	$F_{V,RK3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(III)</p>	$F_{V,RK4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
$F_{V,RK}$ é o menor valor dentre os resultados dos quatro modos de falha.	

Adota-se $\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{21,k}}$, em função as resistências ao embutimento das duas peças de madeira sendo ligadas.

Momento resistente do pino metálico

O momento resistente característico do pino metálico $M_{y,k}$ em N·mm deve ser determinado pela seguinte equação:

$$M_{yRk} = 0,3 f_{uk} d^{2,6} \quad (8)$$

onde

f_{uk} resistência última característica à tração do aço do pino metálico, conforme as ABNT NBR ISO 898-1, ASTM A-307, ASTM A-325, ASTM A-490 e ABNT NBR 5589 (MPa);

d diâmetro nominal do pino metálico conforme a ABNT NBR 8800 (mm)

Para o caso de ligações com parafusos passantes, o valor $F_{ax,Rk}$ pode ser estimado pelo menor valor dentre a resistência de tração do parafuso e a resistência ao embutimento da arruela na madeira.

Para o caso de ligações com pregos, o valor $F_{ax,Rk}$ pode ser estimado pelo menor valor dentre a resistência de tração do prego e a resistência ao embutimento da cabeça do prego na lateral externa da peça de madeira.

Para o caso de ligações com parafusos de rosca soberba, o valor $F_{ax,Rk}$ pode ser estimado pelo menor valor dentre a resistência de tração do parafuso e a resistência ao embutimento da cabeça do parafuso na lateral externa da peça de madeira.

2.2 Ligações com anéis metálicos

A resistência característica de ligações com anéis metálicos é dada por:

$$R_k = F_{v,Rk} n_a \quad (8)$$

onde

n_a quantidade de anéis empregados na ligação;

$F_{v,Rk}$ resistência característica de um anel metálico, correspondente a uma dada seção de corte.

A resistência de um anel metálico correspondente a uma dada seção de corte da ligação entre duas peças de madeira é determinada em função das resistências ao cisalhamento longitudinal $f_{v0,d}$ das duas madeiras interligadas.

O valor de cálculo da resistência ao cisalhamento da madeira correspondente a um anel metálico é calculado conforme a seguir e indicado pelo menor dos valores entre as duas equações.

$$F_{v,Rk} = \frac{\pi d_a^2}{4} f_{v0k} \quad \text{ou} \quad F_{v,Rk} = t_a d_a f_{c\alpha,k} \quad (9)$$

onde

t_a profundidade de penetração do anel em cada peça de madeira;

d_a diâmetro interno do anel;

$f_{c\alpha,k}$ valor característico da resistência à compressão inclinada de α .

Vide Figura 17 da Norma

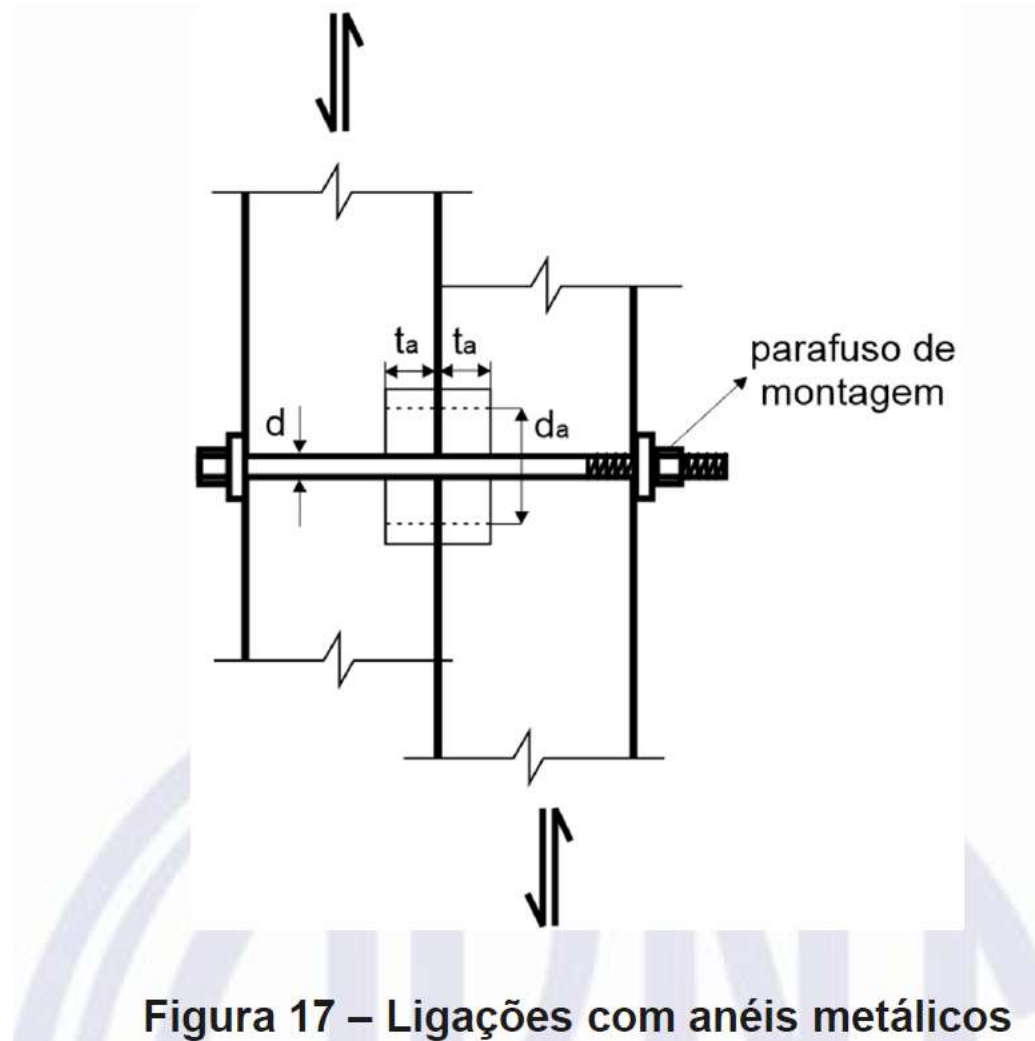
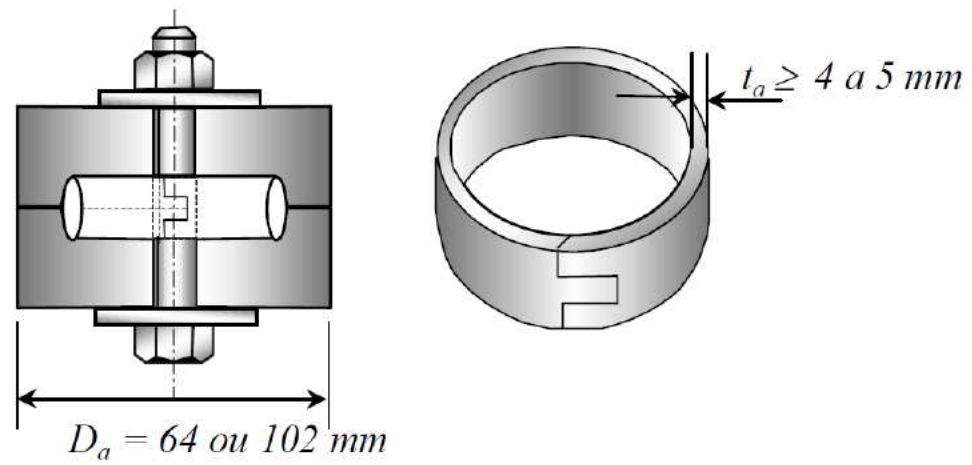
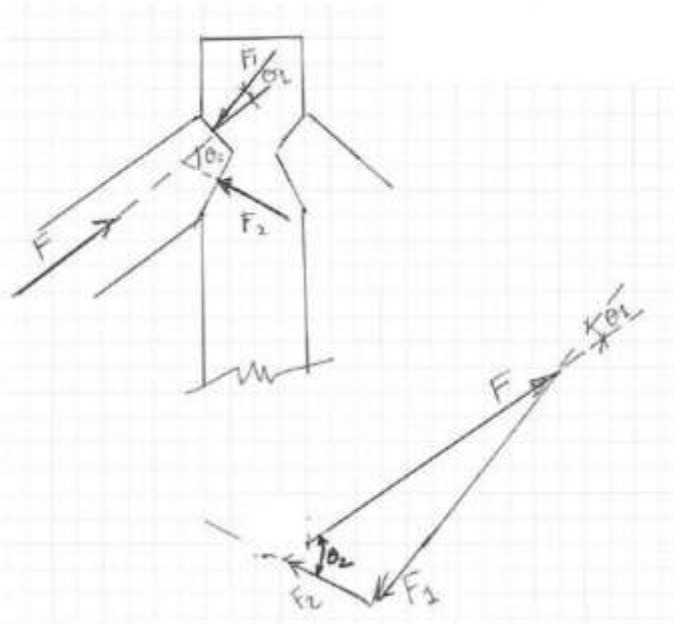


Figura 17 – Ligações com anéis metálicos



Anéis metálicos

2.3 Sambladuras



Decompondo F_1 e F_2 na direção F

$$F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 = F$$

Decompondo F_1 e F_2 na direção perpendicular a F

$$F_1 \sin \theta_1 - F_2 \sin \theta_2 = 0$$

Duas equações a duas incógnitas, resultando

$$F_1 = \frac{F \sin \theta_2}{\Delta} \quad F_2 = \frac{F \sin \theta_1}{\Delta}$$

$$\Delta = \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_2 \sin \theta_1$$

3. Programa Matlab para verificação ligações por pinos metálicos

```
%pino_NBR7190_2022.m
%verificação de resistência de ligação por pino metálico
%14/09/2022
%Prof. Reyolando Brasil
%
clc
clear
%
nsp=2;%junta tracionada duas seções de corte
nef=8;%número efetivo de pinos adotado na ligação
%
Ntd=50000;%força de tração de cálculo, Newton
%
%pino de aço passante
%
d=10;%diâmetro do pino, mm
fuk=400;%resistência última aço, MPa
Myk=0.3*fuk*d^(2.6);%momento resistente característico pino, Nmm
%
%madeiras unidas
%
kmod1=0.7;%carga longa duração
kmod2=0.9;%unidade ambiente entre 65 e 75%
gama_lig=1.4;%coef. de minoração da ligação
%
rom1=1000;%densidade média, madeira 1 folhosa D60, kg/m³
rom2=1000;%densidade média, madeira 2 folhosa D60, kg/m³
rok1=rom1/1.2;%densidade característica, madeira 1
rok2=rom2/1.2;%densidade característica, madeira 2
fe1k=0.082*(1-0.01*d)*rok1;%resistência embutimento madeira 1, MPa
fe2k=0.082*(1-0.01*d)*rok2;%resistência embutimento madeira 2, MPa
t1=60;%espessura da madeira 1, mm
```

```

t2=60;%espessura da madeira 2, mm
b=fe2k/felk;
%
%força característica por pino e por plano de corte, Tabela 19 NBR7190:2022
%
F(1)=felk*t1*d;
F(2)=0.5*felk*t2*d*b;
F(3)=1.05*felk*t1*d/(2+b)*sqrt(2*b*(1+b)+4*b*(2+b)*Myk/(felk*d*t1^2))-b;
F(4)=1.15*sqrt(2*b/(1+b))*sqrt(2*Myk*felk*d);
%
%Desconsiderada contribuição da compressão de arruelas. arrancamento
% de pregos ou parafusos,ou embutimento de suas cabeças
%
FvRk=min(F);%menor resistência entre os 4 modos de falha
Rk=FvRk*nsp*nef;%resistência característica da ligação
Rd=kmod1*kmod2*Rk/gama_lig;%resistência de cálculo da ligação
if Rd>=Ntd
    disp('OK!')
else
    disp('Não OK!')
end
%

```