

Ensaio de ligações aparafusadas em estruturas de madeira. Influência do teor de água e força de aperto dos ligadores

Test of bolted timber joints. Influence of moisture content and fastener tightening

Helena Cruz
Cláudia Santos

Resumo

Os ensaios de ligações aparafusadas realizados no LNEC no âmbito do projeto de investigação TimQuake abrangeram várias combinações de espécie (*Pinus sylvestris* e *Picea abies*) e teor de água da madeira, geometria da ligação (madeira-aço-madeira ou aço-madeira-aço), regime de carregamento e nível de tração axial do ligador.

Este artigo apresenta o programa experimental e discute os resultados obtidos nos ensaios monotónicos, à luz do dimensionamento das ligações segundo o Eurocódigo 5 (EC5).

Conforme previsto, as ligações com parafusos menos esbeltos apresentaram maior propensão para desenvolverem rotura frágil, mesmo seguindo a pormenorização recomendada no Eurocódigo 5. Os resultados dos ensaios confirmaram a influência do aperto dos parafusos e do teor de água da madeira no comportamento da ligação.

Abstract

Tests of bolted timber joints conducted at LNEC in the scope of the TimQuake research project covered several combinations of timber species (*Pinus sylvestris* e *Picea abies*) and moisture content, joint geometry (timber-steel-timber or steel-timber-steel), loading regime and fasteners axial load.

This paper presents the experimental program and discusses the results of monotonic load tests, in the light of the joints design according to the Eurocode 5 (EC5).

As expected, the joints made with less slender bolts were more prone to suffer brittle failure, despite being designed in accordance with the Eurocode 5. Test results confirmed the influence of the bolts tightening and of timber moisture content in the joints' performance.

Palavras-chave: Estruturas de madeira / Ligações aparafusadas / Ensaios monotónicos

Keywords: Timber structures / Bolted joints / Monotonic tests

Na presente versão foi retificada a expressão (3). Esta versão substitui a publicada em julho de 2023

Helena Cruz

Investigadora Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
helenacruz@lnec.pt

Cláudia Santos

Bolseira
Laboratório Nacional de Engenharia Civil,
Lisboa, Portugal
cfsantos@lnec.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CRUZ, H. [et al.] – Ensaio de ligações aparafusadas em estruturas de madeira. Influência do teor de água e força de aperto dos ligadores. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 22. ISSN 2183-8488. (julho 2023) 89-98.

1 Introdução

A madeira é um material essencialmente frágil, pelo que a eventual exploração de ductilidade em estruturas de madeira terá de ser conseguida à custa das suas ligações.

O programa de ensaios levado a cabo no LNEC pretendeu avaliar a influência da massa volúmica da madeira e do seu teor de água, na resistência, na rigidez e na capacidade de dissipação de energia (ductilidade) de ligações estruturais.

Foi decidido contemplar as ligações aparafusadas madeira-aço, tipologia comumente usada em estruturas de madeira lamelada colada, em duas configurações distintas de elementos alinhados (chapa de aço central, ou chapas de aço exteriores).

2 Geometria das ligações aparafusadas

2.1 Dimensionamento segundo o Eurocódigo 5

Na atual versão do Eurocódigo 5 [1], o dimensionamento de ligações realizadas com ligadores do tipo cavilha (cavilhas, parafusos, pregos, agrafos) baseia-se na Teoria de *Johansen* ou *European Yield Model* (EYM) que explica a componente principal da capacidade resistente de uma ligação como sendo uma função da geometria dessa ligação em carga, ou seja, pela forma como a madeira sofre esmagamento e os ligadores se deformam quando a ligação é solicitada.

Desta forma, o valor característico da capacidade resistente de ligações, por plano de corte e por ligador, corresponde ao mínimo dos valores dados por um conjunto de expressões que traduzem os diversos mecanismos de rotura possíveis, nomeadamente envolvendo o esmagamento da madeira em contacto com o ligador que permanece indeformado, ou envolvendo a criação de uma ou mais rótulas plásticas no ligador e o esmagamento da madeira sob a ação deste.

Os mecanismos de rotura a considerar em cada caso dependem da geometria da ligação e dos materiais envolvidos (um ou mais planos de corte, ligação madeira-madeira ou aço-madeira, e, neste último caso, elementos exteriores de aço ou de madeira).

Nas equações correspondentes aos modos de rotura em que ocorre a formação de uma ou mais rótulas plásticas do ligador, ao valor dado pelo EYM acresce um outro termo que traduz a componente lateral do esforço de tração desenvolvido segundo o eixo do ligador quando este deforma e o consequente atrito mobilizado entre os membros em contacto na ligação (“efeito de corda”), contribuição essa que dependerá do tipo de ligador usado e da adoção de disposições construtivas adequadas.

O tipo de rotura que ocorre efetivamente numa dada ligação e a sua capacidade resistente serão determinados pela espessura do(s) elemento(s) de madeira, pela resistência ao esmagamento localizado da madeira sob a ação do ligador (embedding strength), pelo momento de cedência plástica do ligador e pelo respetivo diâmetro. Neste documento não é contabilizada a resistência ao esmagamento do aço nem a espessura da(s) chapa(s) envolvidas na ligação.

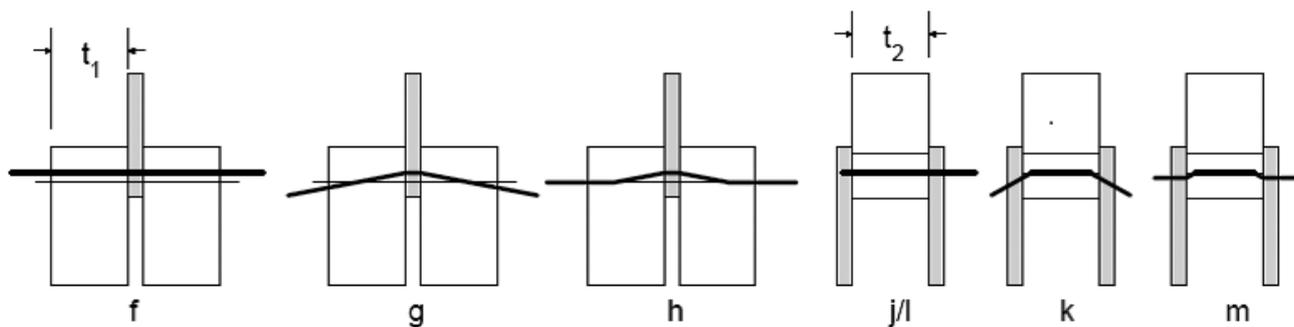


Figura 1 Mecanismos de rotura para dois planos de corte [1]

Segundo o EC5 [1], para parafusos até 30 mm de diâmetro, a resistência ao esmagamento localizado da madeira na direção do fio é calculada através da expressão (1)

$$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad (1)$$

em que:

$f_{h,0,k}$ é o valor característico da resistência ao esmagamento na direção do fio, em N/mm²;

ρ_k é o valor característico da massa volúmica do material;

d é o diâmetro do ligador, em mm.

O valor característico do momento de cedência do ligador é definido em [1] como:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (2)$$

em que:

$M_{y,Rk}$ é o valor característico do momento de cedência do ligador, em Nmm;

$f_{u,k}$ é o valor característico da resistência à tração do aço do ligador, em N/mm²;

d é o diâmetro do ligador, em mm.

No caso de ligações madeira-aço em corte duplo, os mecanismos de rotura previstos pelo EC5 [1] são os indicados na Figura 1 (f a m) e descritos pelas equações seguintes.

- Para uma placa de aço, com uma espessura qualquer, como membro central de uma ligação de corte duplo:

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (f) \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (g) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (h) \end{cases} \quad (3)$$

- Para placas de aço finas como membros externos da ligação de corte duplo:

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (j) \\ 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases} \quad (4)$$

- Para placas de aço espessas como membros externos da ligação de corte duplo:

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (l) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (m) \end{cases} \quad (5)$$

em que:

$F_{V,Rk}$ é o valor característico da capacidade resistente da ligação, por plano de corte e por ligador;

$f_{h,k}$ é o valor característico da resistência ao esmagamento localizado da madeira;

t_1 é a espessura de cada membro exterior de madeira;

t_2 é a espessura do membro central de madeira;

d é o diâmetro do ligador;

$M_{y,Rk}$ é o valor característico do momento de cedência;

$F_{ax,Rk}$ é o valor característico da resistência ao arrancamento do ligador.

O desenvolvimento, em alternativa, dos mecanismos k ou m dependerá da espessura das chapas de aço (t_a), ocorrendo o primeiro para chapas finas ($t_a \leq 0,5d$) e o segundo para chapas espessas ($t_a \geq d$). A resistência para espessuras t_a intermédias é obtida por interpolação linear.

Para ligações com parafusos de porca, o EC5 [1] estabelece, no entanto, que a contribuição do termo $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ das equações (3), (4) e (5) não deve exceder 25% da parcela de Johansen.

O valor característico F_k da capacidade resistente da ligação será assim o mínimo dos valores dados pelas equações aplicáveis (mecanismo de rotura condicionante), multiplicado pelo número de planos de corte existentes na ligação e pelo número efetivo de parafusos utilizados.

O teor de água da madeira da ligação será depois tido em conta na determinação do valor de cálculo F_d da capacidade resistente da ligação, a partir do valor característico correspondente, através da equação (6), em que γ_M é um coeficiente de segurança relativo ao material e o fator de modificação k_{mod} reflete conjuntamente o efeito da duração da combinação de ações em causa e o efeito do teor de água da madeira (classe de serviço de utilização da estrutura).

$$F_d = F_k \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \quad (6)$$

2.2 Influência da geometria no comportamento das ligações

Com base nas equações acima, foi estimado o valor característico da capacidade resistente de ligações aparafusadas, por plano de corte e por ligador, para dois tipos de ligação (Figura 2).

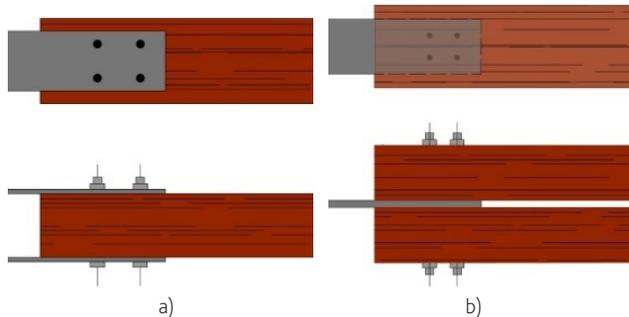


Figura 2 Geometria das ligações consideradas: ligação a); ligação b)

As espécies de madeira consideradas foram o Espruce (*Picea abies*) e a Casquinha - Scots pine (*Pinus sylvestris*). Para cada uma destas espécies considerou-se os quantilhos 5%, 50% e 95% da massa volúmica, designados seguidamente por ρ_5 , ρ_{50} , ρ_{95} (Quadro 1).

Quadro 1 Massa volúmica de Pinho, Espruce e Casquinha considerada na simulação

Massa volúmica	Espruce [kg/m³]	Casquinha [kg/m³]
ρ_5	385	433
ρ_{50}	420	530
ρ_{95}	455	631

As Figuras 3 e 4 mostram o andamento das equações aplicáveis a cada ligação, em função da espessura do(s) elemento(s) de madeira, nas duas situações:

- com chapas exteriores, com espessura nominal de 6mm cada, e parafusos com 12 mm de diâmetro;
- com chapa interior de 12 mm, e parafusos com 8mm de diâmetro.

Com base nesta informação, será previsível que a resistência de uma ligação do tipo a) cujo elemento de madeira tenha espessura $t_m \geq 90$ mm seja condicionada pelo mecanismo de rotura **k** (Figura 1) e que a resistência de uma ligação do tipo b) cujos elementos de madeira tenham $t_m \geq 80$ mm cada, seja condicionada pelo mecanismo de rotura **h** (Figura 1), envolvendo em ambos os casos a formação de duas rótulas plásticas dos parafusos no interior do(s) elemento(s) de madeira. Em ambos os casos, o subsequente aumento da espessura do(s) elemento(s) de madeira não deverá refletir-se num aumento da resistência da ligação.

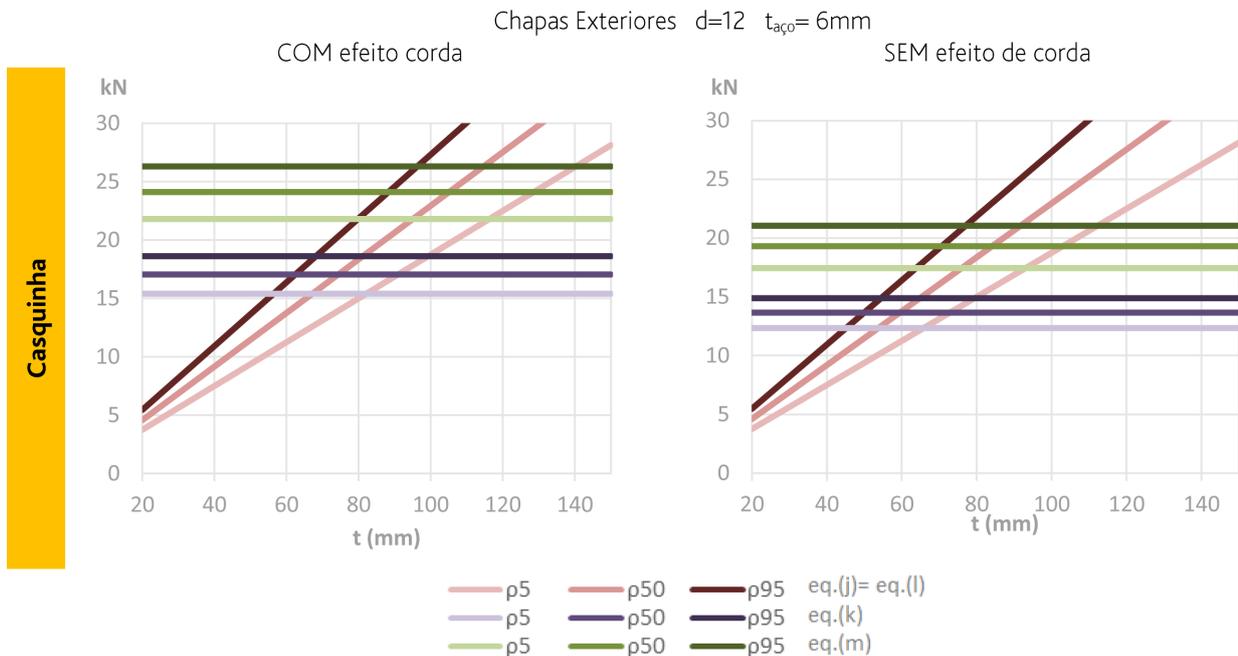


Figura 3 Valor característico da capacidade resistente de ligações aparafusadas (chapas exteriores), com parafusos $d = 12$ mm, por plano de corte e por ligador, em função do elemento de madeira (espécie, massa volúmica e espessura)

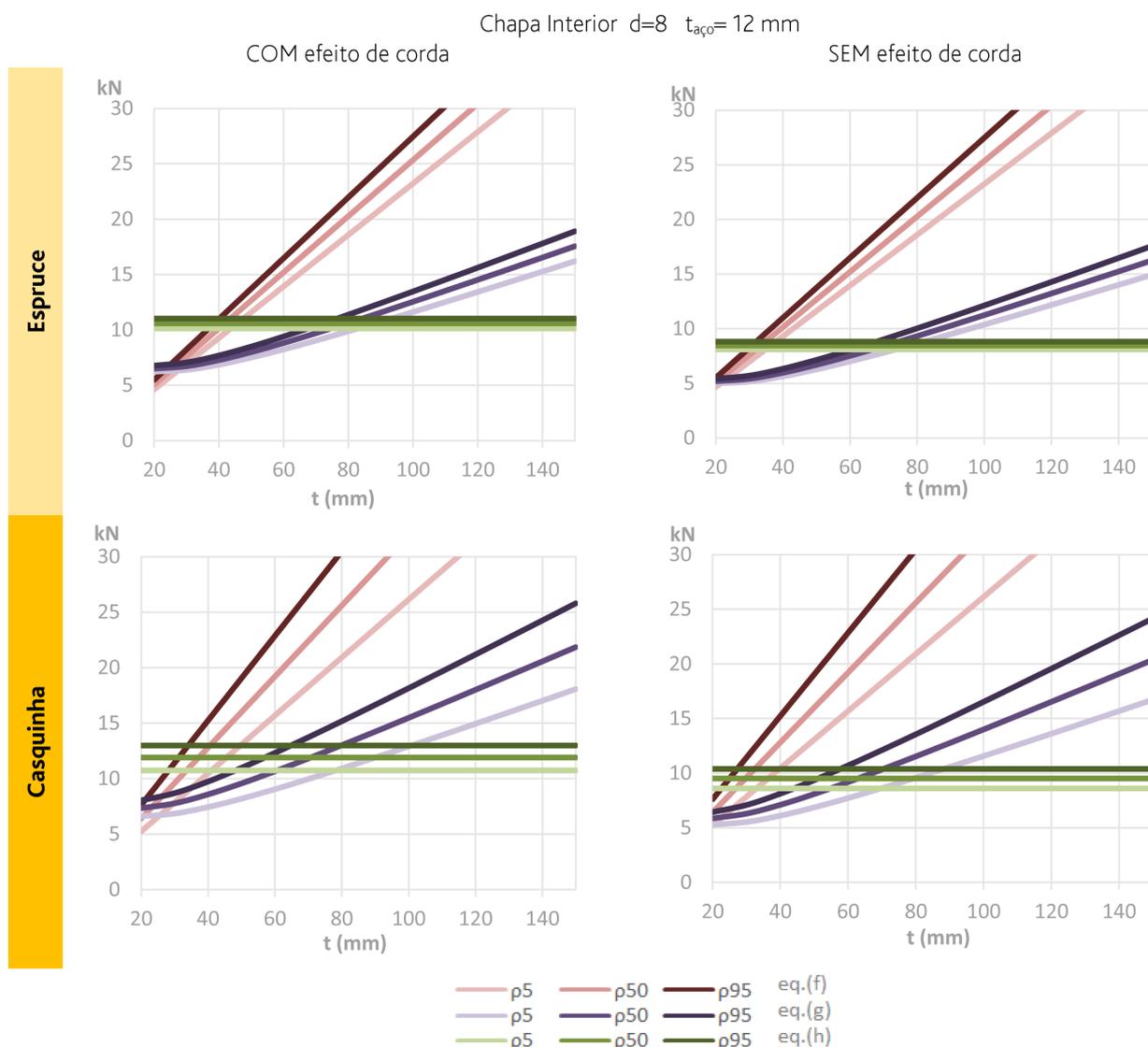


Figura 4 Valor característico da capacidade resistente de ligações aparafusadas (chapa interior) com parafusos $d = 8$ mm, por plano de corte e por ligador, em função dos elementos de madeira (espécie, massa volúmica e espessura)

3 Programa de ensaios

O programa de ensaios estabelecido no âmbito do projeto pretendeu explorar a influência, da massa volúmica da madeira e do seu teor de água, na resistência e na rigidez das ligações, e ainda na energia dissipada em ensaios cíclicos de tração-compressão (Quadro 2).

Os ensaios abrangeram várias combinações de espécie (*Pinus sylvestris* e *Picea abies*) e teor de água da madeira (correspondentes às Classes de Serviço 1 ou 2 definidas no EC5), geometria da ligação (madeira-aço-madeira ou aço-madeira-aço) e esbelteza dos parafusos, carregamento (monotónico e cíclico), bem como diferentes níveis do “efeito de corda” (associado à tração axial

do ligador e conseqüente atrito entre membros), conseguidos pela presença ou ausência de porcas (de forma simplificada, respetivamente designados por “com” e “sem” efeito de corda). No presente artigo apenas são analisados os resultados dos ensaios monotónicos (em tração).

Refira-se que, nos grupos A e B, todos ensaiados com as porcas apertadas para mobilizar o efeito de corda, os provetes AS e BS tinham 4 parafusos em cada ligação. Dado que estes provetes tiveram todos roturas frágeis, por corte ou tração perpendicular às fibras da madeira, sem exibir ductilidade, foi decidido ensaiar dois conjuntos de provetes apenas com dois parafusos cada, mAS e mBS, garantindo maior distância dos parafusos ao topo do elemento.

Quadro 2 Programa de ensaios

Tipo de ligação	Geometria	Espécie	Ensaio	Teor de água montagem/ensaio	Efeito de corda		
					Sim	Não	
Chapas exteriores	d = 12 mm t _m = 90 mm t _a = 6 mm t _m /d = 7,5	Casquinha (<i>Pinus sylvestris</i>)	Monotónico	A	CS 1	(4p) (2p)	
				B	CS 2	(4p) (2p)	
			Cíclico	C	CS 1	(2p)	(2p)
				D	CS 2	(2p)	(2p)
Chapa interior	d = 8 mm t _m = 80 mm t _a = 12 mm t _m /d = 10	Espruce (<i>Picea abies</i>)	Monotónico	E	CS 1	(4p)	(4p)
			Cíclico	F	CS 1	(4p)	(4p)
		Casquinha (<i>Pinus sylvestris</i>)	Monotónico	G	CS 1	(4p)	
				H	CS 2	(4p)	(4p)
			Cíclico	J	CS 1	(4p)	
				M	CS 2	(4p)	(4p)

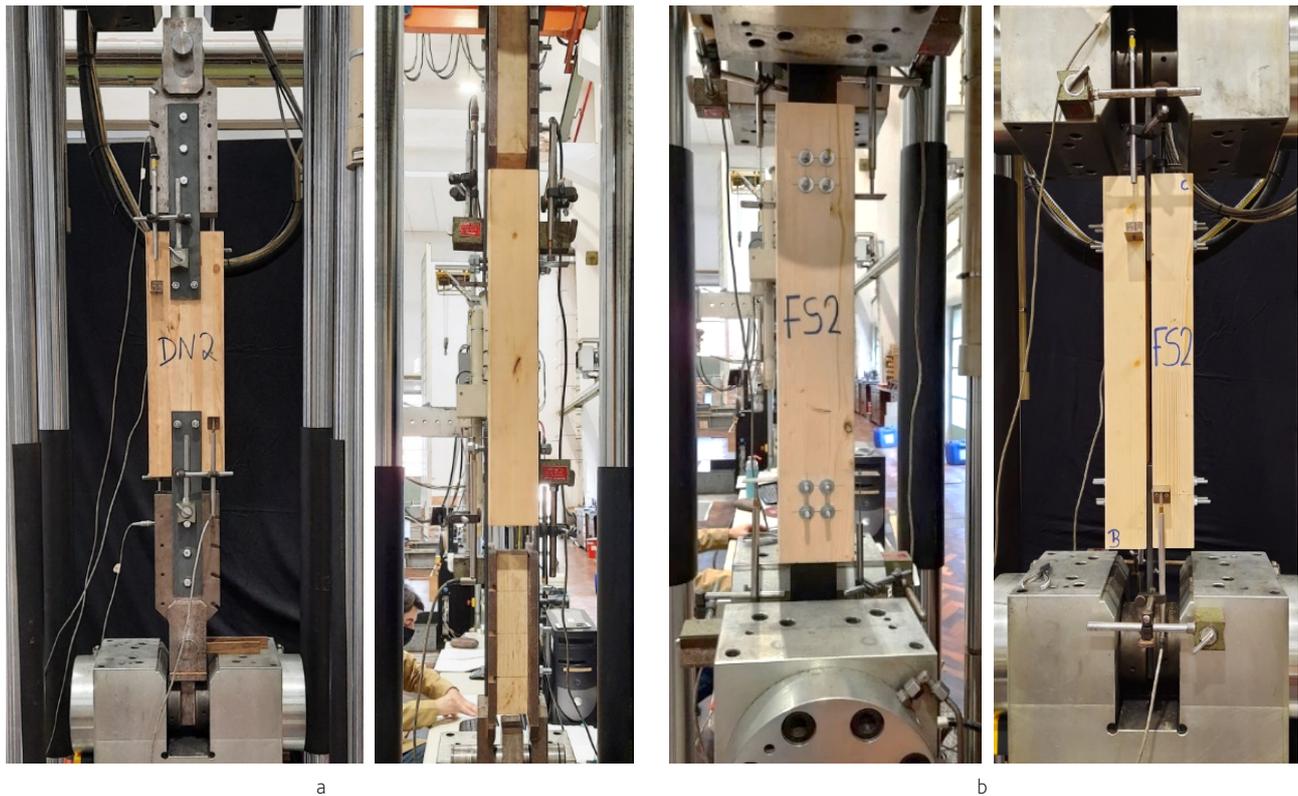


Figura 5 Ensaio de ligações com chapas de aço exteriores a) e com chapa de aço interior b)

Foram ensaiadas seis ligações de cada tipo, correspondendo a três provetes com duas ligações cada, instrumentadas de forma independente (Figura 5).

A pormenorização das ligações teve em conta os valores mínimos recomendados pelo EC5 relativamente ao espaçamento entre ligadores e à distância destes ao bordo e ao topo dos elementos de madeira.

Os ensaios monotónicos seguiram a norma EN 26891 [2] (Figura 6).

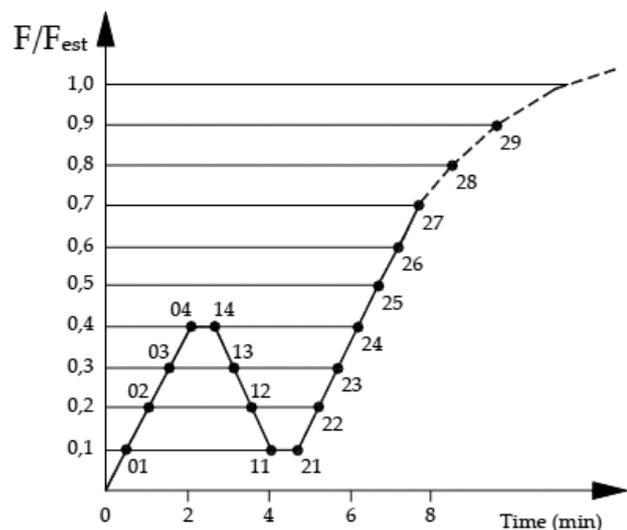


Figura 6 Protocolo de ensaio monotónico [2]

4 Materiais

Os provetes A a D eram compostos por uma peça de madeira com dimensões nominais 90 mm x 200 mm x 800 mm e quatro chapas de aço S235 com dimensões nominais 6 mm x 80 mm x 500 mm. Os provetes E a M eram compostos por duas peças de madeira com dimensões nominais 80mm x 120mm x 800mm, e duas chapas de aço S235.

A decisão de utilizar madeira de Espruce (*Picea abies*) e de Casquinha (*Pinus sylvestris*) tinha em vista a obtenção de madeira de espécies comerciais de utilização corrente e massa volúmica relativamente uniforme dentro de cada espécie. Além disso, no caso da Casquinha procurou-se adquirir madeira do tipo "Scots pine" (com massa volúmica média esperada igual a 530 kg/m³), tendo-se verificado, no entanto, que a madeira fornecida tinha massa volúmica inferior.

A massa volúmica média da madeira ensaiada de Casquinha era 490,5 kg/m³ e a de Espruce era 435,2 kg/m³, mais próximas entre si do que o inicialmente pretendido.

A composição dos provetes e constituição dos grupos procurou garantir: i) madeira limpa na zona da ligação; ii) pares de peças o mais semelhantes possíveis, em termos de massa volúmica, tipo e orientação dos anéis, no caso de provetes com chapa interior; iii) grupos de provetes com valores próximos de massa volúmica média, de forma a minimizar esse fator de variabilidade.

Os provetes foram mantidos em ambiente controlado, entre a montagem da ligação e a data de ensaio, para minimizar as variações de teor de água nesse período. Estes ambientes conduziram, respetivamente, a valores médios de teor de água de 12,8% (provetes A, E e G) e 19,9% (provetes B e H), Quadros 3, 4 e 5.

Quadro 3 Massa volúmica e teor de água médio da madeira (provetes A e B, Casquinha)

Proвете	Massa volúmica do provete (kg/m ³)	Massa volúmica média do grupo (kg/m ³)	Teor de água médio do provete (%)	Teor de água médio do grupo (%)
AS1	458,73		13,32	
AS2	487,29	481,87	12,59	12,92
AS3	499,58		12,81	
BS1	468,54		19,80	
BS2	490,00	486,11	19,37	19,79
BS3	499,79		20,20	
mAS1	486,17		12,26	
mAS2	492,60	501,07	12,61	12,49
mAS3	524,44		12,61	
mBS1	475,42		20,24	
mBS2	495,63	491,88	21,11	20,68
mBS3	504,58		20,71	

Quadro 4 Massa volúmica e teor de água médio da madeira (provetes E, Espruce)

Provete	Massa volúmica média do provete (kg/m³)	Massa volúmica média do grupo (kg/m³)	Teor de água médio do provete (%)	Teor de água médio do grupo (%)
ES1	418,10		12,75	
ES2	432,42	438,05	13,35	12,92
ES3	463,62		12,67	
EN1	408,30		12,39	
EN2	430,47	432,28	13,29	12,87
EN3	458,07		12,94	

Quadro 5 Massa volúmica e teor de água médio da madeira (provete G e H, Casquinha)

Provete	Massa volúmica média do provete (kg/m³)	Massa volúmica média do grupo (kg/m³)	Teor de água médio do provete (%)	Teor de água médio do grupo (%)
GS1	459,31		12,85	
GS2	470,74	493,89	12,69	12,73
GS3	551,63		12,64	
HS1	470,31		20,41	
HS2	477,21	483,09	19,27	19,89
HS3	501,76		20,00	
HN1	467,90		19,84	
HN2	480,86	495,55	19,04	19,40
HN3	537,89		19,33	

5 Resultados

Os diagramas força-escorregamento obtidos nos ensaios são apresentados na Figura 7 (grupos A e B), na Figura 8 (grupos E) e na Figura 9 (grupos G e H).

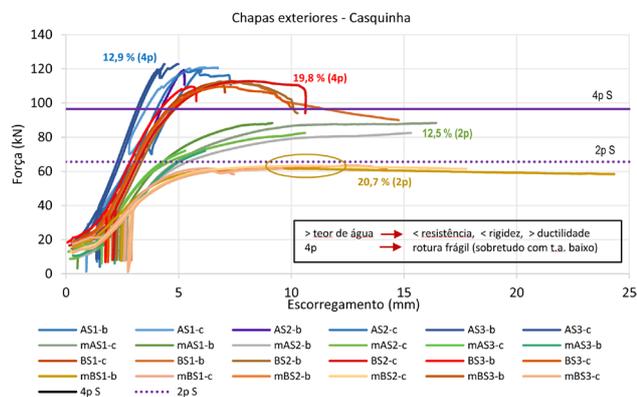


Figura 7 Resultados de ensaios de ligações com chapas exteriores – Casquinha

As retas sobrepostas aos diagramas indicam o correspondente valor característico da capacidade resistente da ligação segundo o EC5 [1], para 2 ou 4 parafusos (2p e 4p), contabilizando ou não o efeito de corda (respetivamente, S ou N).

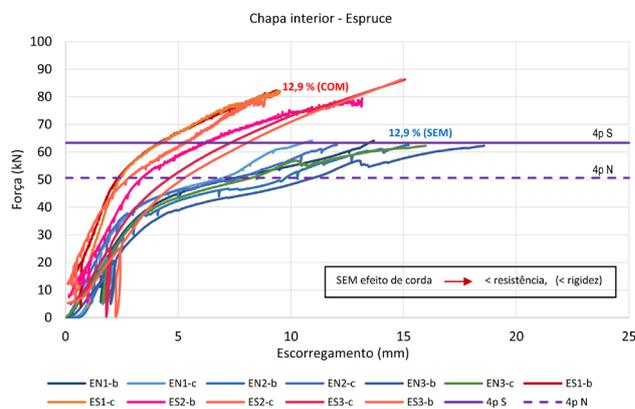


Figura 8 Resultados de ensaios de ligações com chapa interior – Espruce

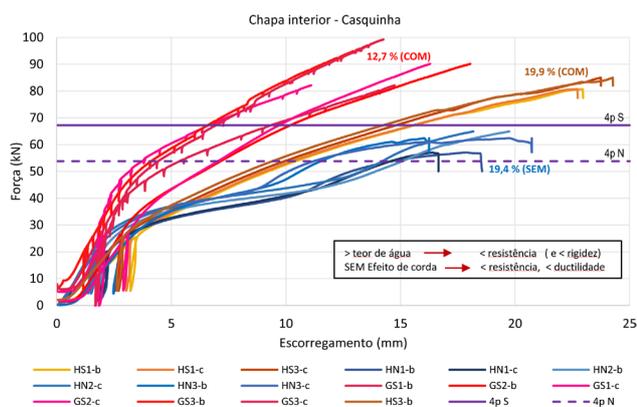


Figura 9 Resultados de ensaios de ligações com chapa interior – Casquinha

6 Análise e conclusões

No caso das ligações A e B, verifica-se que as ligações com quatro parafusos exibem rotura frágil, com reduzida capacidade de deformação, muito mais evidente no caso da madeira com menor teor de água (AS) do que no caso da madeira mais húmida (BS).

O valor médio da força máxima atingida pelos provetes AS é da ordem de 120 kN, sendo ligeiramente menor (cerca de 110 kN) no caso dos provetes BS.

As ligações com 2 parafusos (mAS e mBS) desenvolveram muito maior deformação plástica do que as anteriores, especialmente no caso dos provetes com teor de água mais elevado.

O valor médio da força máxima atingida pelos provetes mAS é da ordem de 80kN, sendo ligeiramente menor (cerca de 60kN) no caso dos provetes BS.

A relação entre as forças máximas atingidas pelas ligações AS e mAS, tal como a relação entre as forças máximas atingidas pelas ligações BS e mBS é da ordem do valor n_{ef} (número efetivo de ligadores) correspondente a dois parafusos alinhados segundo as fibras da madeira ($n_{ef} = 1,47$ segundo [1]).

Apenas no caso das ligações com 2 parafusos e madeira com teor de água mais elevado, os resultados obtidos nos ensaios são ligeiramente inferiores aos valores estimados com base na Figura 3 (considerando 2 planos de corte \times 2 parafusos, no caso de mAS e mBS; 2 planos de corte \times 2 linhas de parafusos \times n_{ef} , para AS e BS), traduzidos nas retas sobrepostas aos diagramas de ensaio.

Contrariamente às ligações dos tipos A e B, os diagramas de ensaio das ligações dos tipos E, G e H apresentam um troço claramente ascendente após a cedência, mais acentuado no caso da Casquinha do que no Espruce.

A diferença entre os provetes ES e EN (Espruce com baixo teor de água, Figura 8) reside no facto de o segundo grupo ter sido ensaiado sem os parafusos apertados (ausência de porcas). Do mesmo modo, a diferença entre os provetes HS e HN (Casquinha com teor de água elevado, Figura 9) é a falta de aperto dos parafusos neste último grupo. Em ambos os casos, os diagramas de ensaio refletem o contributo significativo do efeito de corda.

A diferença entre os grupos GS e HS (Figura 9) reside no teor de água mais elevado no caso das ligações HS, traduzido num decréscimo acentuado da capacidade de carga.

Comparando os diagramas apresentados na Figura 8 e na Figura 9 com as simulações da Figura 4, ou com as retas sobrepostas a estes diagramas, verifica-se que nas ligações com a chapa interior estudadas (E, G e H) a força máxima atingida nos ensaios excedeu a capacidade resistente estimada para as ligações correspondentes, para valores de deformação mais elevados do que no caso da geometria anterior (ligações A e B).

Em conclusão, o dimensionamento e pormenorização de acordo com o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1) não garante por si só a ductilidade das ligações, tal como se verificou no caso da geometria estudada, com chapas exteriores e 4 parafusos. Importa, assim, evitar ligadores pouco dúcteis, cumprir (e, se possível, aumentar) a distância dos parafusos ao topo dos elementos, bem como prever o reforço da madeira relativamente à tração perpendicular às fibras, por exemplo mediante a introdução de parafusos autorroscantes nessa direção.

O aumento do teor de água reflete-se numa redução da resistência e da rigidez da ligação, embora lhe corresponda uma menor tendência para rotura frágil (maior ductilidade). Note-se que, em projeto, o teor em água da madeira é tido em conta na determinação do valor de cálculo da ligação, a partir do respetivo valor característico, pela aplicação do factor k_{mod} (que assume valores entre 0,6 e 0,9). No entanto, alguns ensaios realizados com teor de água correspondente à Classe de Serviço 2 apresentaram resistência característica R_k inferior à prevista no Eurocódigo 5, o que significa que ao valor de cálculo usado no projeto corresponderá uma reserva de segurança inferior à segurança regulamentar.

O aperto dos parafusos é fundamental para mobilizar o “efeito de corda”. Os ensaios confirmaram que as ligações com parafusos mal apertados têm menor rigidez e menor resistência do que ligações devidamente apertadas. Isto salienta a importância do projeto (por exemplo, a necessidade de dotar as ligações de anilhas devidamente dimensionadas), da montagem (teor de água adequado da madeira da ligação e aperto devido dos parafusos/porcas) e ainda da manutenção das estruturas (garantindo o reaperto de parafusos, após secagem da madeira em serviço, se necessário).

Agradecimentos

O trabalho apresentado foi realizado no âmbito do projeto de investigação TimQUAKE – Desempenho Estrutural de Ligações e Estruturas de Madeira Sob Sismos (POCI-01-0145-FEDER-032031).

Referências

- [1] EN 1995-1-1:2004/AC:2006+A1:2008 – “Eurocode 5: Design of timber structures – part 1-1: General – Common rules and rules for buildings”. CEN, Bruxelas.
- [2] EN 26891: 1991 – “Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics”. CEN, Bruxelas.

