

Avaliação experimental de ligações aparafusadas em Pinho bravo e Câmbala

Jorge M. Branco

PhD, Professor Auxiliar, Dep. Engenharia Civil,
Universidade do Minho (Guimarães, Portugal)

jbranco@civil.uminho.pt



Ricardo Braz

Eng. Civil, Técnico-Comercial
Rotho Blaas srl (Portugal)

ricardo.braz@rothoblaas.com



Catarina V. Silva

MSc, Arquitecta, Dep. Engenharia Civil
Universidade do Minho (Guimarães, Portugal)

catarina.vilaca.silva@gmail.com



Palavras-chave – Ligações aparafusadas, avaliação experimental, pinho e câmbala

Keywords – Screwed connections, experimental evaluation, pine and iroko

RESUMO

No presente trabalho avaliaram-se experimentalmente ligações aparafusadas, aferindo a aplicabilidade do Eurocódigo 5 em relação às duas espécies de madeira seleccionadas, Câmbala (*Milícia excelsa*) e Pinho bravo (*Pinus pinaster*). Como ligador, utilizaram-se parafusos auto-perfurantes HBS da Rotho Blaas.

Para além do ensaio de ligações aparafusadas em corte simples, a campanha experimental teve como objectivo avaliar os vários mecanismos de resistência considerados pela metodologia de cálculo sugerida pelo Eurocódigo 5 para este género de ligações, nomeadamente: a) resistência ao arrancamento do parafuso do elemento que recebe a ponta; b) resistência ao atravessamento da cabeça do parafuso; c) esmagamento localizado da madeira; e d) flexão do parafuso.

Os resultados experimentais demonstram a fiabilidade da metodologia de cálculo proposta pelo Eurocódigo 5 e atestam o bom comportamento garantido por ligações aparafusadas com parafusos HBS utilizando Pinho bravo e Câmbala.

ABSTRACT

In the present study, screwed connections have been experimentally evaluated, checking the applicability of Eurocode 5 for the two species of wood selected, Iroko (*Milícia excelsa*) and Maritime pine (*Pinus pinaster*). As connector, self-drilling screws of HBS Roth Blaas have been used. Single shear screwed connections have been tested moreover, the experimental campaign aimed to evaluate various mechanisms of resistance considered by the calculation method suggested by Eurocode 5 for this kind of connections, including: a) axial withdrawal capacity of the screw, b) pull through parameter for screws, c) local embedment of wood, and d) yield moment of the screw. The experimental results demonstrate the reliability of the calculation methodology proposed by the Eurocode 5 and certify the good behavior guaranteed by screwed connections with HBS screws in the case of Maritime pine and Iroko.

1. Introdução

As ligações são os pontos fracos das estruturas de madeira, representando uma redução da sua continuidade e da resistência, levando à necessidade de elementos sobredimensionados. Cerca de 80% dos colapsos observados em estruturas de madeira são causados pelas ligações (Itany, 1984).

As ligações tipo-cavilha são as mais frequentes em estruturas de madeira. O termo cavilha refere-se genericamente a pregos, parafusos de porca, parafusos auto-perfurantes, pinos e cavilhas propriamente ditas. Normalmente, estes elementos de ligação são submetidos a esforços de flexão e de corte. A transferência de carga é conseguida por flexão do ligador, por pressão diametral e corte da madeira ao longo do seu comprimento.

O cálculo da capacidade resistente de ligadores do tipo cavilha, sujeitos ao corte, como são exemplo as ligações aparafusadas, baseia-se na Teoria de Johansen (Johansen, 1949). O modelo que Johansen propôs e os pós-desenvolvimentos originaram o EYM (European Yield Model), que consta em inúmeras normas, como o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004) O EYM é um modelo de análise que permite determinar a capacidade resistente de ligações do tipo cavilha entre dois ou três membros de madeira e baseia-se no equilíbrio das tensões aplicadas no ligador inserido num elemento de madeira. É um método simples, mas o tratamento deste método sobre o complexo comportamento das ligações revela uma elevada fiabilidade na quantificação prática da sua capacidade resistente. Além das características geométricas da ligação, existem dois parâmetros essenciais: a resistência ao esmagamento localizado da madeira e o momento de cedência do ligador, os quais têm um comportamento plástico.

A validade da Teoria de Johansen foi verificada através dos resultados das campanhas de ensaios realizadas por Trayer (1932), Wilkinson (1972), McLain (1983) e Soltis (1986), entre outros. Segundo esta, a resistência ao esmagamento localizado da madeira e o momento de cedência plástica do ligador são as propriedades que governam a resistência de ligações tipo cavilha. Diversos estudos têm analisado a resistência ao esmagamento localizado de madeira e derivados de madeira.

Whale (1987) realizou um extenso estudo da resistência ao esmagamento localizado de madeiras resinosas, folhosas e contraplacados utilizando pregos e parafusos como ligadores. Ehlbeck (1992) conduziu um estudo da resistência ao esmagamento localizado de madeira folhosa sob vários ângulos de aplicação da carga relativamente ao fio da madeira. Estes dois estudos, que constituem a base do EC5, apenas lidam com o valor último da resistência ao esmagamento localizado, não apresentando qualquer informação relativamente ao limite elástico. Kawamoto (1993) avaliou experimentalmente a resistência ao esmagamento localizado na direcção perpendicular às fibras de madeira lamelada colada. Harada (1999) e Hwang (1999) avaliaram a relação entre o diâmetro da cavilha e o esmagamento localizado de madeira lamelada colada e derivados de madeira, respectivamente.

Sawata (2002) conduziu uma vasta campanha experimental para a quantificação da resistência ao esmagamento localizado da madeira na sua direcção paralela e perpendicular às fibras. Recentemente, Santos (2009) avaliou a resistência ao esmagamento de madeira de Pinho bravo na direcção paralela ao fio.

As ligações aparafusadas representam um excelente solução para as estruturas de madeira perante a facilidade da sua aplicação, bom comportamento mecânico, melhor rigidez que as ligações pregadas e, por evidenciarem resistência ao arrancamento que pode ser importante em determinadas situações de projecto. Nos últimos anos têm surgido vários tipos de parafusos, com diferentes formas e materiais, que têm merecido a atenção da comunidade científica e técnica. Contudo, raros são os estudos de ligações com parafusos auto-perfurantes utilizando o Pinho bravo ou madeiras africanas, como é exemplo a Câmbala.

2. Programa experimental

Neste ponto apresentam-se os principais passos de uma vasta campanha experimental realizada com o objectivo de avaliar ligações aparafusadas com parafusos auto-perfurantes e usando duas espécies distintas: Pinho bravo e Câmbala.

Para além das ligações aparafusadas propriamente ditas, foram avaliados por ensaios os diferentes parâmetros que influenciam a capacidade resistente destas ligações. Assim, realizaram-se ensaios para a avaliação do esmagamento localizado da madeira, ensaios de arrancamento do parafuso para as três direcções principais da madeira (longitudinal, tangencial e radial) com diferentes penetrações na madeira, avaliou-se a resistência ao atravessamento da cabeça do parafuso e estudou-se o momento de cedência plástica do próprio parafuso. Na Tabela 1 resumem-se os ensaios realizados.

Ensaio		Número de ensaios			
Esmagamento localizado EN 383:2007	Direcção		Pinho bravo	Câmbala	
	Paralelo às fibras		50	50	
	Perpendicular às fibras		50	50	
Arrancamento UNI EN 1382:2002	Direcção		Penetração		
	Tangencial	8d		7	7
		10d		7	7
		12d		4	5
	Radial	8d		7	7
		10d		7	7
		12d		2	5
	Paralelo	8d		8	8
		10d		4	4
12d		4	4		
Atravessamento da cabeça UNI EN 1383:2002			24	25	
Parafuso à flexão EN 409:1993			5		
Ligações em corte simples UNI EN 26891:2001			20	24	

Tabela 1 – Ensaios realizados

2.1. Materiais

As ligações aparafusadas usam parafusos auto-perfurantes do tipo HBS, fornecidos pela Rotho Blaas, com um diâmetro nominal de 6 mm e um comprimento desde a cabeça até à ponta de 160 mm. O fuste é parcialmente roscado num comprimento de 75 mm, medidos desde a ponta, ao qual se segue uma zona de transição de aproximadamente 10 mm de comprimento, que tem a função de absorver os esforços de torção, facilitando o aparafusamento, por fim, o restante fuste até à cabeça, é liso. A cabeça é plana e redonda e tem um diâmetro de 12 mm, sendo a transição do fuste para a cabeça, cónica. Na ponta roscada apresenta um rasgo que tem a função de facilitar o aparafusamento.

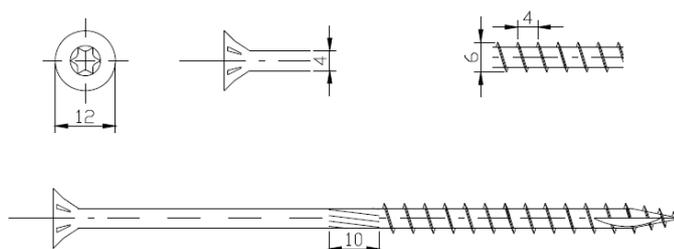


Figura 1 – Geometria do parafuso HBS 6x160 utilizado na campanha experimental (mm)

As ligações analisadas são em madeira de Pinho bravo (*Pinus pinaster*) e de Câmbala (*Milícia excelsa*). Todos os elementos de madeira, depois de serrados, foram colocados em câmara climática para a sua estabilização sob condições controladas e de referência (humidade relativa de 65% e temperatura de 20°C).

2.2. Ensaio de esmagamento localizado da madeira

A resistência ao esmagamento localizado (f_h) de uma dada madeira é igual ao valor máximo da tensão de compressão suportado por uma peça, exercida nesta por um elemento rígido do tipo cavilha que a atravesse numa dada secção. A sua quantificação pode ser realizada por dois métodos diferentes, com base em ensaios de acordo com a EN 383:2007 ou através de expressões propostas pelo Eurocódigo 5.

Embora o procedimento de carga, ou até mesmo os cálculos a efectuar a partir dos resultados experimentais, sejam os mesmos, a avaliação através de ensaios da resistência ao esmagamento localizado distingue-se segundo a sua direcção relativamente às fibras. De acordo com a EN 383:2007, as dimensões do provete, o tipo e localização do ligador devem obedecer a determinadas relações pré-estabelecidas em função da direcção relativamente às fibras.

No que se refere à campanha experimental, são utilizados um total de três transdutores em cada ensaio, sendo que, um deles, o transdutor interno do actuador, cuja capacidade de curso vai até aos 200 mm, é usado no controlo por deslocamentos do procedimento de carga definido na EN 383:2007. Os outros dois, cuja capacidade de curso varia de $\pm 2,5$ mm, visam medir o deslocamento da cavilha, ao longo do percurso em que a madeira vai sendo esmagada.

Na Fig. 2 apresentam-se as dimensões dos provetes utilizados na avaliação experimental da resistência ao esmagamento localizado da madeira na direcção paralela e normal das fibras, apresentando também o aspecto geral do esquema de ensaio implementado para cada um dos casos.

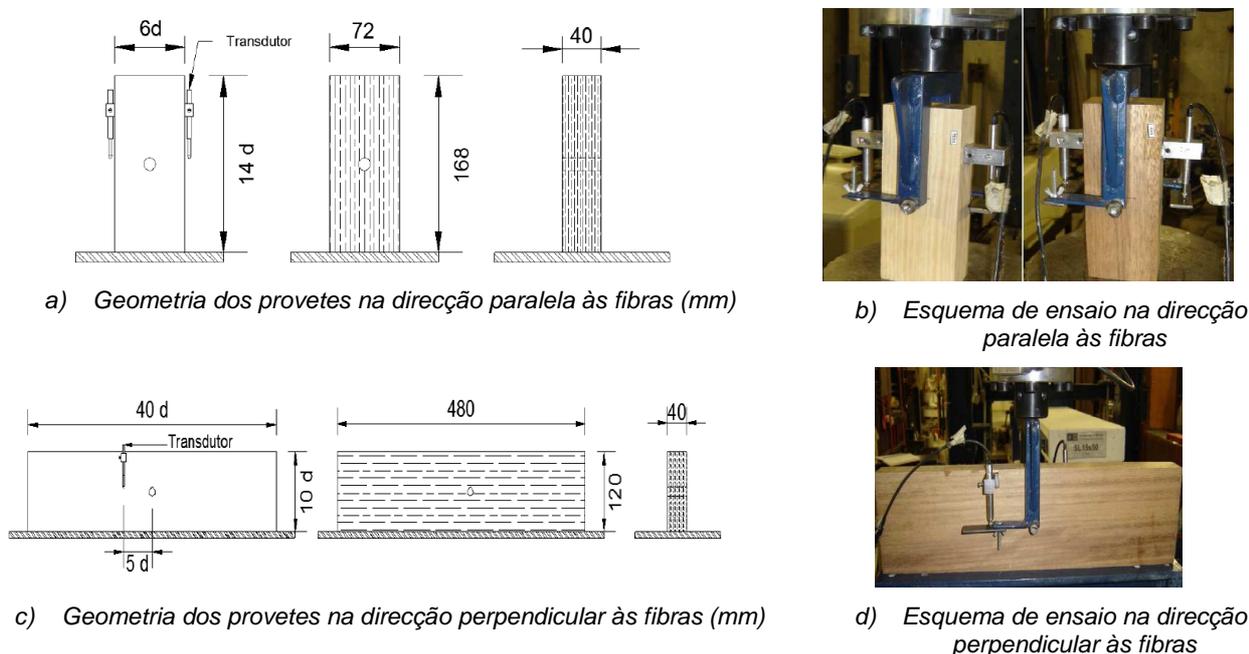


Figura 2 – Geometrias dos provetes e esquemas de ensaios usados na avaliação experimental da resistência ao esmagamento localizado da madeira na direcção paralela e perpendicular às fibras

Por outro lado, com base nas expressões propostas pelo Eurocódigo 5 para a quantificação do valor característico da resistência ao esmagamento localizado da madeira ($f_{h,k}$), foi necessário conhecer o valor característico da massa volúmica (ρ_k), o diâmetro do ligador (d) e a sua orientação relativamente às fibras (α). Desta forma, procedeu-se à quantificação da massa volúmica (ρ) de cada um dos provetes utilizados na avaliação experimental de f_h através da metodologia definida em NP 616:1973.

De modo a consolidar a avaliação analítica, foi ainda registado o teor em água (w), devido à sua influência no desempenho da madeira, de cada um dos provetes utilizados na avaliação de f_h , através do método da pesagem definido pela NP 614:1973.

Na Fig. 3 ilustram-se os principais passos efectuados para a quantificação de ρ e w , nomeadamente o corte de uma pequena amostra do provete, secagem em estufa e arrefecimento das amostras num exsiccador com sílica.



Figura 3 – Principais passos efectuados para a quantificação da massa volúmica (ρ) e teor de água (w) dos provetes usados na avaliação do esmagamento localizado da madeira (f_h)

2.3. Ensaio de arrancamento do parafuso

O ensaio de arrancamento é efectuado seguindo as instruções indicadas pela norma EN 1382:2002 “Resistência à extracção de um elemento de ligação mecânica”. Como o nome indica o objectivo deste ensaio é avaliar a resistência à extracção da ponta do parafuso de um provete de madeira, tal como ilustrado nas Fig. 4 e 5.

O parafuso é aparafusado a uma peça de madeira, com as dimensões estabelecidas na norma, com diversas profundidades de penetração na madeira e com diversas orientações do parafuso em relação à orientação das fibras. É então aplicado à cabeça do parafuso uma força de extracção.

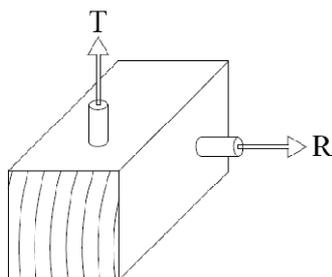


Figura 4 - Esquema de ensaios utilizado para avaliação da resistência ao arrancamento na direcção tangencial (T) e radial (R) às fibras com provetes (100x100x180 mm)

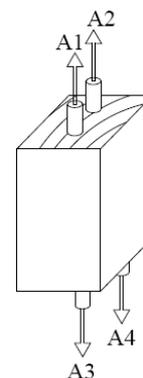


Figura 5 - Esquema de ensaios utilizado na avaliação da resistência ao arrancamento na direcção paralela às fibras (longitudinal), com provetes (100x180x100 mm)

Os parafusos são inseridos na amostra de madeira, sem pré-furação, na direcção paralela (L), radial (R) e tangencial (T) às fibras; sendo avaliada a força máxima necessária para o arrancamento do parafuso aparafusado à amostra de madeira à profundidade de 8, 10 e 12 vezes o diâmetro nominal do parafuso (6 mm), ou seja, 48 milímetros, 60 milímetros e 72 milímetros, respectivamente.

A carga é aplicada por uma luva de extracção de metal com uma ponta apropriada para fazer o arrancamento do parafuso. A amostra é colocada por trás de placas de ferro que a prendem ao mecanismo de ensaio, existente nos Laboratórios de Engenharia Civil da Universidade do Minho. A força foi aplicada de baixo para cima com a peça de madeira colocada sobre a superfície de trabalho, utilizando umas mandíbulas apropriadas para puxar o parafuso (ver Fig. 6).

2.4. Ensaio de atravessamento da cabeça do parafuso

O atravessamento da cabeça do parafuso é uma rotura possível nas ligações aparafusadas, sendo por isso necessário considerá-la na quantificação da capacidade resistente destas ligações.

Realizaram-se 49 ensaios, 25 para Cãmbala e 24 para Pinho bravo, seguindo as recomendações da norma EN 1383:2002, utilizando os parafusos já descritos.

Na realização destes ensaios o parafuso é inserido no centro de uma das faces de maior área do provete, na direcção perpendicular à mesma face. Com o parafuso inserido no provete, este é colocado num mecanismo com a parte de madeira presa a uma placa de ferro, em concordância

com as dimensões impostas na norma considerada para este ensaio. Em seguida, o ensaio é realizado quando uma espécie de garra (a mesma descrita nos ensaios de arrancamento) segura a ponta do parafuso, puxando-o, até que a cabeça deste trespassse a placa de madeira à qual estava aparafusado. Por fim, é feita a recolha de resultados para posterior análise (Fig. 7).



Figura 6 - Esquema de ensaio utilizado no arrancamento do parafuso



Figura 7 - Esquema de ensaio utilizado no atravessamento da cabeça do parafuso

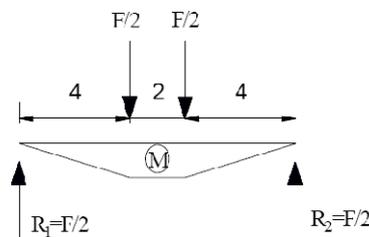
2.5. Ensaio à flexão do parafuso

Foram realizados ensaios de flexão seguindo as recomendações da norma EN 409:1991. Esta norma serve para a caracterização do momento de cedência plástica de pregos, mas na ausência de norma específica, foi adoptada para a caracterização do momento de cedência plástica dos parafusos HBS 6x160.

Neste ensaio o parafuso é colocado, na horizontal, sobre dois apoios distanciados de 10 cm sob efeito de um carregamento a meio-vão por intermédio de duas cargas pontuais espaçadas 2 cm (Fig. 8). A aplicação da carga é feita a velocidade de deslocamento constante sobre o parafuso até este romper ou até uma deformação entre pontos de aplicação da carga de 45°. A velocidade deve ser escolhida de modo que o tempo de ensaio decorra entre 5 e 15 segundos.



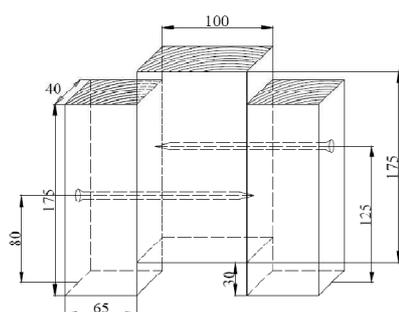
Figura 8 - Esquema de ensaio utilizado no ensaio à flexão do parafuso (cm)



2.6. Ensaios ao corte simples de ligações aparafusadas

Depois de realizados os ensaios de arranque, de atravessamento da cabeça do parafuso e de flexão do parafuso, finalmente, realizaram-se os ensaios das ligações propriamente ditas. A rotura associada a este tipo de ensaio resulta de uma conjugação de todos os parâmetros e respectivas roturas, estudadas anteriormente.

Na definição da geometria dos provetes representativos das ligações teve-se em consideração as prescrições geométricas sugeridas pelo Eurocódigo 5 no caso de ligações aparafusadas (Fig. 9).



a) Geometria dos provetes



b) Esquema de ensaio incluindo sistema de aquisição

Figura 9 – Ensaio de ligações aparafusadas em corte simples (mm)

O procedimento de ensaio seguido é o descrito na norma EN 26891:1991. Ou seja, primeiro imprime-se um carregamento progressivo de compressão ao provete, durante 2 minutos, até que se atinja 40% da força estimada (F_{est}). Após se atingir esse patamar de força, este é mantido durante 30 segundos. Em seguida, e durante 1 minuto e meio, reduz-se a força aplicada até se atingir $0,1 F_{est}$, mantendo esta força durante 30 segundos. Por fim, imprime-se um carregamento à velocidade constante de deslocamento até atingir a força máxima (F_{max}) da ligação. É de notar que F_{max} corresponde ao valor máximo da força registada até que se verifique um deslocamento relativo entre elementos de madeira de 15 milímetros. No caso de ocorrer rotura da ligação considera-se a força máxima registada até ao momento da rotura. A velocidade de deslocamento deve ser tal que permita atingir a F_{max} num intervalo de tempo total de ensaio entre os 10 e os 15 minutos.

3. Apresentação e análise dos resultados experimentais

Nesta secção apresentam-se, de forma resumida, os principais resultados experimentais obtidos na campanha de ensaios realizada. Os resultados experimentais são apresentados com mais detalhe em Ribeiro (2010) e Barros (2010).

3.1. Esmagamento localizado da madeira

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios dos principais resultados retirados dos ensaios de esmagamento localizado da madeira realizados. Apresenta-se a massa volúmica (ρ), o tempo de ensaio, o valor estimado (F_{est}) e o valor máximo (F_{max}) da força de esmagamento, resistência ao esmagamento localizado (f_h) e o módulo de fundação (k_s). Os resultados são apresentados por séries de ensaios e por direcção da resistência, relativamente às fibras da madeira (α), dado os ensaios terem sido realizados em datas distintas.

	α	Série	n.º de provetes	ρ (kg/m ³)	Tempo (s)	F_{est} (kN)	F_{max} (kN)	f_h (MPa)	k_s (N/mm ³)
Pinho	0°	1	25	678	539	22,0	23,4	48,8	43,0
		2	25	651	544	22,0	22,8	47,3	41,4
	90°	1	25	698	589	19,8	18,9	39,7	20,4
		2	25	683	575	19,0	18,0	38,1	19,6
Câmbala	0°	1	25	602	520	22,0	23,5	48,0	38,6
		2	25	616	504	22,0	24,9	51,5	47,9
	90°	1	25	650	577	17,8	17,8	40,5	19,6
		2	25	667	579	17,0	18,6	42,9	20,9

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de esmagamento localizado da madeira segundo a EN 383:2007

3.2. Arrancamento

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados dos ensaios de arrancamento para as duas espécies de madeira consideradas, em função da direcção relativamente à orientação das fibras. Apresenta-se os valores médios (F_{ax}) e o coeficiente de variação (CoV) para a força máxima

registada nos ensaios, o percentil-5 da força máxima ($F_{ax,05}$) e a respectiva resistência ao arrancamento ($f_{ax,05}$).

Direcção	Profundidade (mm)	Tangencial			Radial			Longitudinal		
		48	60	72	48	60	72	48	60	72
Pinho	F_{ax} (kN)	8,48	10,61	12,34	8,92	11,47	12,23	7,88	9,13	11,88
	CoV (%)	10,7	10,2	4,9	9,2	8,8	10,4	24,8	12,3	13,8
	$F_{ax,05}$ (kN)	7,61	9,58	12,23	7,71	9,75	11,60	6,27	7,87	9,89
	$f_{ax,05}$ (MPa)	13,22	13,31	14,15	13,38	13,54	13,43	10,89	10,93	11,44
Câmbala	F_{ax} (kN)	8,10	10,15	12,97	8,44	10,20	10,59	7,67	9,29	11,94
	CoV (%)	7,8	10,9	29,1	7,1	4,5	4,2	4,2	3,7	6,5
	$F_{ax,05}$ (kN)	7,30	9,70	12,30	7,48	8,75	7,23	7,22	9,01	11,00
	$f_{ax,05}$ (MPa)	12,67	13,47	14,23	12,99	12,15	8,37	12,54	12,51	12,73

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de arrancamento

Uma observação importante da qual se deve tomar nota de imediato é a de que para a profundidade de 72 mm, tanto na Câmbala como no Pinho bravo, a rotura sucedeu quase sempre pelo parafuso e não pela madeira, à excepção dos casos em que o parafuso estava na direcção paralela às fibras (longitudinal). Para as restantes profundidades, a rotura ocorreu quase sempre pela madeira para ambas as espécies.

Como seria de esperar, quanto maior a profundidade de penetração do parafuso, maior a força necessária para o arranque deste do provete, independentemente da espécie de madeira.

Não existe uma grande diferença nos resultados experimentais entre a colocação do parafuso tangencial ou radial às fibras. Pelo contrário, quando o parafuso é colocado paralelo às fibras (longitudinal), verifica-se um considerável decréscimo da força necessária para o arrancamento do parafuso.

Facilmente se conclui que as duas espécies analisadas são de desempenho similar para este tipo de ensaio. Em conclusão, nas Fig. 10 e 11 apresentam-se as curvas médias força-deslocamento obtidas nos ensaios de arrancamento para as duas espécies consideradas, para as três direcções relativamente às fibras analisadas e considerando as três profundidades estudadas.

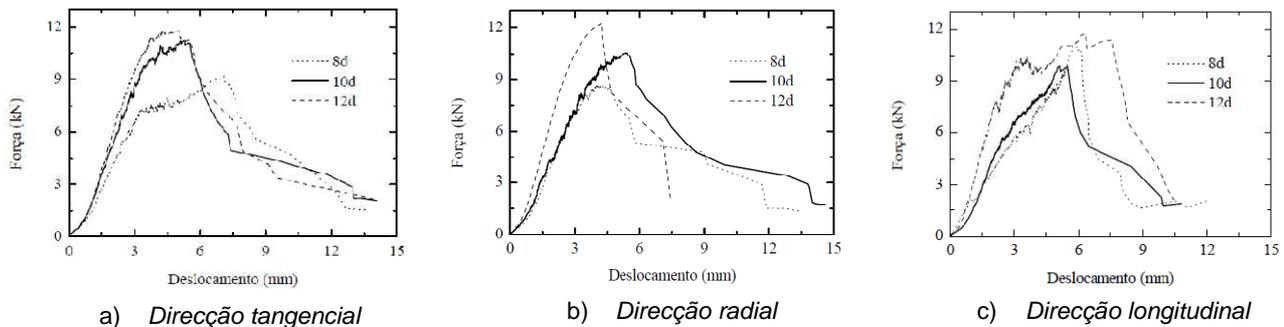


Figura 10 – Curvas médias obtidas nos ensaios de arrancamento no caso do Pinho bravo

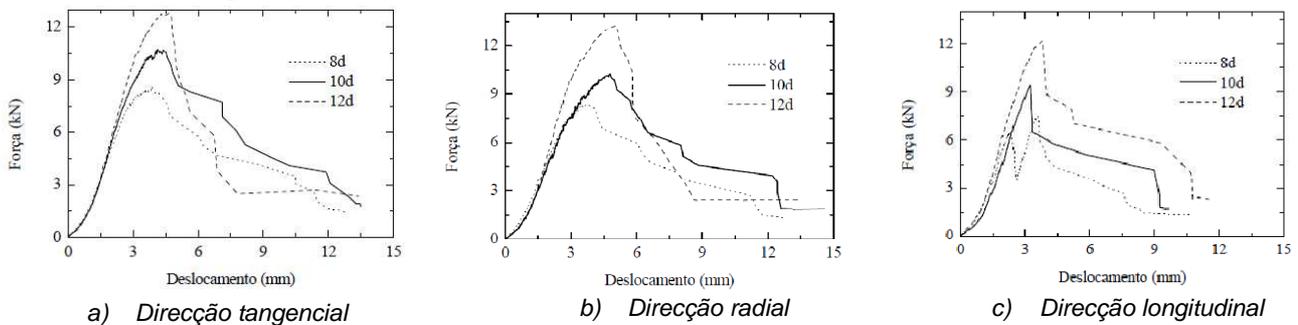


Figura 11 – Curvas médias obtidas nos ensaios de arrancamento no caso da Câmbala

3.3. Atravessamento da cabeça do parafuso

Na tabela 4 apresentam-se os principais resultados obtidos para a resistência ao atravessamento da cabeça do parafuso nos provetes de Pinho bravo e de Câmbala especificando

o valor médio da força máxima registada no ensaio (F_{head}) e correspondentes valores do coeficiente de variação (CoV) e percentil-5 ($F_{head,05}$).

Espécie	N.º de ensaios	F_{head} (kN)	CoV (%)	$F_{head,05}$ (kN)
Pinho	24	5,75	11,5	4,56
Câmbala	25	5,56	17,7	4,26

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de atravessamento da cabeça do parafuso

Na realização dos ensaios de atravessamento da cabeça do parafuso podemos observar que, para a Câmbala, obteve-se um valor médio da força máxima de 5,56 kN e de 5,75 kN no caso do Pinho bravo. Como os resultados obtidos nos ensaios, tanto para a Câmbala como para o Pinho bravo, se encontram dentro de uma gama de resultados muito similares, é possível concluir que a dependência desta propriedade é acima de tudo geométrica (parafuso) e não material (madeira).

Na Fig. 12 apresentam-se as curvas médias força-deslocamento registadas nos ensaios de atravessamento da cabeça do parafuso para o caso do Pinho bravo e da Câmbala.

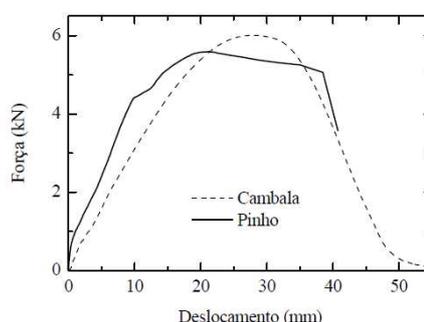


Figura 12 – Curvas médias força-deslocamento registadas nos ensaios de atravessamento da cabeça do parafuso para as duas espécies de madeira consideradas

3.4. Parafusos à flexão

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos ensaios à flexão realizados para a quantificação do momento de cedência plástica do parafuso HBS 6x160, adaptando as recomendações da EN 409:1991.

Ensaio n.º	1	2	3	4	5
Força máxima (kN)	0,699	0,682	0,686	0,687	0,623
Momento flector (kNm)	1398	1364	1372	1374	1246

Tabela 5 – Valores experimentais obtidos para o momento de cedência plástica do parafuso HBS 6x160

3.5. Ligações aparafusadas em corte simples

Na Tabela 6 resumem-se os resultados dos ensaios ao corte simples das ligações aparafusadas em estudo, em termos dos valores estimados para a força máxima (F_{est}), dos valores máximos (F_{max}), dos valores médios (F), do coeficiente de variação (CoV) e do percentil-5 (F_{05}) da força máxima registada em cada um dos ensaios realizados.

Testaram-se 20 ligações em Pinho e 24 ligações em Câmbala, sendo que os provetes 3, 4 e 5 das ligações de Câmbala não foram considerados no tratamento estatístico dos resultados dado apresentarem valores que se podem admitir como outliers.

Uma possível razão para o sucedido prende-se com o facto de nestes provetes, ao contrário dos restantes, não se ter executado a pré-furação para a colocação dos parafusos.

Pinho bravo	Provete n.º	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	F_{max} (kN)	9,85	9,86	9,20	9,98	9,61	8,62	8,77	11,05	10,14	9,57	11,08	12,62
	Provete n.º	13	14	15	16	17	18	19	20				
	F_{max} (kN)	8,59	11,52	9,39	10,67	10,21	10,19	10,61	9,45				
	F_{est} (kN)	10,00											
	F (kN)	10,05											
	CoV (%)	10,1											
F_{05} (kN)	8,62												
Câmbala	Provete n.º	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	F_{max} (kN)	9,80	12,04	6,42*	5,26*	5,69*	11,94	12,30	11,76	11,58	11,87	11,41	11,86
	Provete n.º	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	F_{max} (kN)	10,35	11,38	10,82	10,93	10,41	11,72	9,56	9,69	10,74	10,64	10,09	8,05
	F_{est} (kN)	12,00											
	F (kN)	10,90											
	CoV (%)	9,7											
	F_{05} (kN)	9,56											

Tabela 6 – Resultados dos ensaios ao corte simples de ligações aparafusadas (* valores outliers)

Os resultados obtidos para as duas espécies de madeira são similares, havendo uma pequena superioridade nos valores obtidos pelas ligações em Câmbala (Fig. 13).

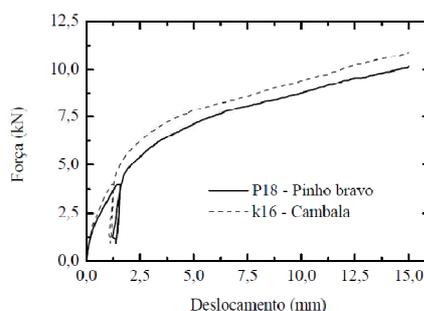


Figura 13 – Curvas experimentais força-deslocamento registadas nos ensaios das ligações aparafusadas no caso do provete n.º 18 em Pinho bravo e n.º 16 em Câmbala

4. Discussão dos resultados experimentais

O estudo realizado permitiu comparar a resistência ao esmagamento localizado obtida através do Eurocódigo 5 ($f_{h,EC5}$) com a obtida experimentalmente através da EN 383:2007 ($f_{h,Ensaio}$), do qual se concluiu que, regra geral, a obtida experimentalmente é superior, o que é desejável, em termos de segurança e torna fiável o uso das expressões de cálculo previstas pelo Eurocódigo 5 (Tabela 7).

Espécie	w (%)	ρ (kg/m ³)	α	$f_{h,Ensaio}$ (MPa)	$f_{h,EC5}$ (MPa)
Pinho bravo	12,28	650	0°	48,1	47,9
	12,95	674	90°	38,9	32,4
Câmbala	11,67	610	0°	49,8	43,8
	9,75	654	90°	41,7	44,0

Tabela 7 – Confronto dos valores da resistência ao esmagamento localizado obtidos nos ensaios com os valores sugeridos pelo Eurocódigo 5

De acordo com o Eurocódigo 5, a resistência ao arrancamento varia com a profundidade de penetração do parafuso sendo que estabiliza por volta de valores de esbelteza igual a $9d / 10d$. Contudo, nos ensaios realizados observou-se sempre um crescimento da resistência ao arrancamento com a profundidade de penetração ($8d$, $10d$ e $12d$) tendo a rotura sucedido pelo aço no último caso ($12d$) enquanto para os restantes valores de penetração a rotura ocorreu pela madeira. Apesar de uma ligeira diferença, o Eurocódigo 5 não faz qualquer distinção entre as direcções tangencial e radial na aplicação do parafuso relativamente às fibras da madeira.

Os ensaios de atravessamento da cabeça do parafuso realizados apresentaram valores de percentil-5 para o Pinho bravo de 2,150 kN e de 4,255 kN para Câmbala. Estes valores são muito

baixos quando comparados com os obtidos nos ensaios de arrancamento, mas é preciso ter em atenção que este mecanismo de resistência não é considerado na resistência ao corte de ligações aparafusadas segundo o Eurocódigo 5.

Quanto ao valor do momento de cedência plástica do parafuso ($M_{y,Rk}$), o Eurocódigo 5 prevê um valor de 18987 Nmm quando nos ensaios se obteve um valor de 12700 Nmm. Esta diferença pode dever-se a dois factores: primeiro o método de ensaio utilizado pode não ter sido o mais apropriado devido ao facto de não utilizar o equipamento de ensaio recomendado pela EN 409:1991, isto apesar de ter-se seguido todas as outras indicações geométricas; em segundo lugar, o facto de os parafusos terem uma rosca muito alta (1 mm), que lhe conferem um diâmetro nominal de 6 milímetros, valor utilizado nos cálculos segundo o Eurocódigo 5, quando na realidade o diâmetro na parte lisa é de apenas 4 milímetros. A variação de apenas 1 milímetro tem grande influência no valor do $M_{y,Rk}$ definido pelo Eurocódigo 5 como se comprova pelos valores que se obtém um diâmetro de 4 e 5 mm, 6617 Nmm e 11819 Nmm, respectivamente.

Utilizando o Eurocódigo 5, para as propriedades em estudo dos materiais, geométricas e materiais, os resultados esperados para o ensaio ao corte simples para os provetes de Pinho bravo seria de 6,43 kN e para a Câmbala de 7,73 kN. Nos ensaios realizados obtiveram-se valores percentil-5 para o Pinho bravo de 8,62 kN e de 9,56 kN para a Câmbala. Os valores obtidos demonstram a fiabilidade do método de cálculo sugerido pelo Eurocódigo para as ligações aparafusadas, no caso das espécies utilizadas, Pinho bravo e Câmbala.

Segundo o Eurocódigo 5, no caso de parafusos com uma esbelteza de $16d$ a rotura dá-se por esmagamento das duas peças de madeira e por flexão do ligador, ou seja, pelo modo (f) de acordo com as equações de Johansen. Analisando os modos de rotura obtidos nos ensaios verifica-se através da abertura forçada dos provetes que a rotura se deu por esmagamento das duas peças de madeira e pela plastificação do ligador, o que corresponde ao previsto pelo regulamento.



Figura 14 – Modo de rotura típico das ligações ensaiadas, onde é perceptível o esmagamento das duas peças de madeira e a plastificação do parafuso

5. Conclusões

Do trabalho aqui apresentado e de forma conclusiva, é possível afirmar-se que:

- comparando a resistência ao esmagamento localizado obtida através do Eurocódigo 5 com a obtida experimentalmente através da EN 383:2007, conclui-se que, regra geral, a obtida experimentalmente é superior, o que é desejável, em termos de segurança e torna fiável o uso das expressões de cálculo previstas pelo Eurocódigo 5;
- reforça-se a importância da dependência da massa volúmica no cálculo da resistência ao esmagamento, segundo o Eurocódigo 5, tendo em conta a boa correlação por norma verificada, entre estes dois parâmetros;
- comparando as espécies consideradas, a Câmbala destaca-se pois apresenta maior resistência ao esmagamento localizado e maior módulo de fundação, apesar de apresentar massa volúmica inferior;
- quanto à anisotropia da madeira, verifica-se que os valores experimentais obtidos na direcção perpendicular às fibras são inferiores aos da direcção paralela;
- a Câmbala apresenta efectivamente uma maior resistência nas ligações ao corte simples que o Pinho bravo.

- os resultados experimentais obtidos para a resistência ao corte simples das ligações analisadas foram superiores aos previstos pelo Eurocódigo 5, embora não excessivamente, pelo que se pode aferir que o método de dimensionamento sugerido pelo Eurocódigo 5, para estas duas espécies de madeira estudadas, garante segurança;

- o teor de água apresentado pelos provetes utilizados, resultante do seu prévio armazenamento em condições controladas em câmara climática, é bastante próximo do valor de referência (12%), o que reforça a representatividade das conclusões estabelecidas neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Barros B.M.V. (2010), Avaliação experimental de ligações coladas e aparafusadas em estruturas de madeira, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Ehlbeck J. e Werner H. (1992), Softwood and hardwood embedding strength for dowel-type fasteners. In: Proceedings of the CIB-W18 meetings, pp 25-7-2.
- EN 383:2007, Timber structures – Test methods – Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners. European Committee for Standardization.
- EN 409:1993, Timber structures – test methods – determination of the yield moment of dowel type fasteners – nails. European Committee for Standardization.
- EN 1995-1-1:2004, Eurocode 5: Design of Timber Structures – Part 1-1: General- Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.
- Harada M., Hayashi T., Karube M. e Komatsu K. (1999) Dowel-bearing test of glued laminated timber with a drift-pin (in Japanese). Summary of technical paper, annual meeting, Architectural institute of Japan, pp 49-50.
- Hwang K.H. e Komatsu K. (1999), Relationship between embedment parameters and dowel diameter for various engineered woods (EW) (in Japanese). Summary of technical paper of annual meeting, Architectural Institute of Japan, pp 51-52.
- Itany R.Y. e Faherty K.F. (1984), Structural wood research, state-of-the-art and research needs. NY: ASCE.
- Johansen K.W. (1949), Theory of Timber Connections. In International Association of Bridge and Structural Engineering.
- Kawamoto N., Komatsu K. e Harada M. (1993), Lateral strengths of drift-pin joints in perpendicular to the grain loadings. III Estimation of yield loads by European yield theory (in Japanese). Mokuzai Gakkaishi 39:1386-1392.
- McLain T.E., Thangjitham S. (1983), Bolted wood-joint yield model. Journal of Structural Division, ASCE, 109(8): 1820-1835.
- NP 614: 1973, Madeiras - Determinação do teor em água. IPQ.
- NP 616: 1973, Madeiras - Determinação da massa volúmica. IPQ.
- Ribeiro N.H.P. (2010), Avaliação experimental do esmagamento localizado da madeira. Tese de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis, Universidade do Minho.
- Santos C.L., De Jesus A.M.P., Morais J.J.L. e Lousada J.L.P.C. (2009), Quasi-static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection. Construction and Building Materials, 23(1), 171-182.
- Sawata K. e Yasumura M. (2002), Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners. Journal of Wood Science, 48(2), 138-146.
- Soltis L.A., Hubard F.K., Wilkinson T.L. (1986), Bearing strength of bolted timber joints. Journal of Structural Engineering, ASCE, 112(9): 2141-2154.
- Trayer G.W. (1932), The bearing strength of wood under bolts, Technical Bulletin No. 332, USDA Washington DC.
- UNI EN 1382:2002, Strutture di legno - Metodi di prova - Resistenza all'estrazione di elementi meccanici di collegamento per legno. UNI.
- UNI EN 1383:2002, Strutture di legno - Metodi di prova - Resistenza all'attraversamento della testa di elementi meccanici di collegamento per legno. UNI
- UNI EN 26891:1991, Legno, strutture di legno. Assemblaggi realizzati tramite elementi meccanici di collegamento. Principi generali per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità. UNI.
- Whale L.R.J., Smith I. e Larsen H.J. (1987), Design of nailed and bolted joints proposals for the revision of existing formulae in draft Eurocode 5 and the CIB code. In: Proceedings of the CIB-W18 meetings, Paper 20-7-1.
- Wilkinson T.L. (1972), Analysis of nailed joints with dissimilar members. Journal of Structural Engineering, ASCE, 98(9): 2005-2013.