

## ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR EM MADEIRA

Pedro Palma *	Andrea Frangi	Erich Hugi
ETH Zurich / LNEC Suíça / Portugal palma@ibk.baug.ethz.ch	Prof. Dr. ETH Zurich Suíça frangi@ibk.baug.ethz.ch	Dr. Empa Suíça erich.hugi@empa.ch
Paulo B. Cachim	Helena Cruz	
Prof. Dr. Universidade de Aveiro Portugal pcachim@ua.pt	Dr. LNEC Portugal helenacruz@lneec.pt	

### SUMÁRIO

Nesta comunicação são apresentados os resultados de uma extensa campanha experimental relativa à resistência ao fogo de ligações estruturais viga-pilar, em madeira, sujeitas a esforço transverso. Nesta campanha, o comportamento ao fogo destas ligações foi abordado de forma sistemática, tendo sido ensaiadas várias tipologias vulgarmente utilizadas, contribuindo-se de forma significativa para o estudo do seu desempenho em situação de incêndio e para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento.

**Palavras-chave:** madeira, ligações, resistência ao fogo, ensaios.

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 Enquadramento

O desempenho ao fogo das estruturas de madeira é largamente influenciado pelo comportamento das suas ligações. Os actuais métodos de dimensionamento, de acordo com a EN 1995-1-2 [1], baseiam-se em expressões empíricas [2] obtidas a partir de um número limitado de ensaios de ligações em tracção (na direcção paralela às fibras) [3-5]. Devido à anisotropia da madeira, as propriedades mecânicas e os modos de rotura na direcção paralela às fibras, que é geralmente a direcção longitudinal dos elementos estruturais, são muito diferentes das propriedades equivalentes na direcção perpendicular

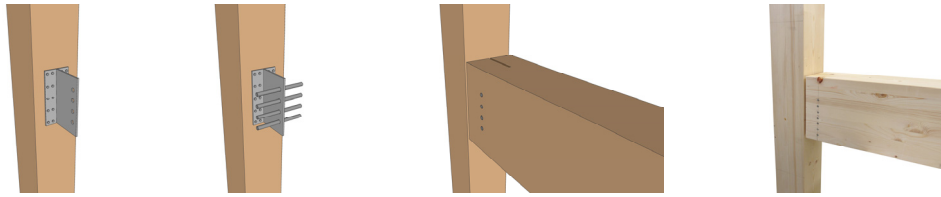


Figura 1. Ligação viga-pilar sujeita a esforço transverso (tensões perpendiculares às fibras na viga).

às fibras. Assim, as ligações solicitadas paralela ou perpendicularmente às fibras exibem comportamento muito diferentes, estando as últimas sujeitas a roturas frágeis. Relativamente à resistência ao fogo, havia a dúvida se estes diferentes modos de rotura observados à temperatura normal influenciariam significativamente o comportamento ao fogo das ligações. Para além deste aspecto, e também devido à anisotropia da madeira, as regras de pormenorização (espaçamento entre ligadores e distâncias ao topo e aos bordos), estabelecidas para o dimensionamento à temperatura normal, são significativamente diferentes para ligações sujeitas a esforços paralelos ou perpendiculares às fibras. Sendo os ligadores metálicos responsáveis pela condução do calor para o interior das secções de madeira e pelo aumento localizado da carbonização, era esperado que o espaçamento entre ligadores, bem como a distância ao topo e aos bordos influenciassem a resistência ao fogo. Devido às roturas frágeis observadas à temperatura normal, o uso de reforços na direcção perpendicular às fibras é uma técnica de reforço vulgarmente utilizada [6]. A técnica de reforço mais comum consiste na utilização de parafusos autoroscantes de aço, que, no entanto, também contribuem para um aumento localizado da carbonização e, deste modo, para uma menor resistência ao fogo [7].

Ligações viga-viga e viga-pilar (Figura 1) são exemplos comuns de ligações em que pelo menos um dos elementos está sujeitos a esforços na direcção perpendicular às fibras. A variedade de tipologias de ligação utilizadas nestas situações é bastante extensa e inclui chapas metálicas expostas ou inseridas em entalhes (com uma chapa de topo pregada e um cachoro metálico ou uma ligação com cavilhas, Figura 1), ligações madeira-madeira ou metálicas em cauda-de-andorinha, parafusos autoroscantes inseridos na diagonal, entre outras. Uma vez que o comportamento ao fogo destas ligações nunca foi anteriormente estudado, a abordagem de dimensionamento mais comum passa por especificar maiores secções transversais e menores tolerâncias para as folgas entre os elementos.

## 1.2 Objectivos e âmbito

Nesta comunicação são apresentados os resultados de uma extensa campanha experimental relativa ao estudo do comportamento ao fogo de ligações estruturais sujeitas a esforços na direcção perpendicular às fibras. Na campanha experimental o comportamento ao fogo de ligações viga-pilar foi abordado de forma sistemática, tendo sido ensaiadas várias tipologias vulgarmente utilizadas, contribuindo-se de forma significativa para o estudo

do seu desempenho em situação de incêndio e para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento.

## 2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 2.1 Programa dos ensaios

A campanha de ensaios incluiu testes à temperatura normal e testes de resistência ao fogo de ligações viga-pilar sujeitas a um esforço de corte. À temperatura normal foram também realizados ensaios apenas à parte da ligação do *lado da viga*, que se assumiu ser a mais exposta ao fogo e, deste modo, crítica para a resistência ao fogo. Foram realizados mais de 30 ensaios à temperatura normal, abrangendo 10 tipologias de ligação diferentes, e mais de 20 ensaios de resistência ao fogo, incluindo 12 tipologias de ligação. O programa experimental é apresentado na Tabela 1 e a geometria das diferentes tipologias de ligação é apresentada na Fig. 2 e na Tabela 2.

### 2.2 Provetes – tipologias, geometrias e materiais

As tipologias A.1 a C.2 são, no *lado da viga*, ligações aço-madeira com cavilhas (Fig. 2.1). Na tipologia A.5 foram utilizadas chapas de ligação comerciais com uma geometria muito semelhante às chapas feitas à medida utilizadas na tipologia A.1. As tipologias A.6 e C.2 são semelhantes às tipologias A.1 e C.1, respectivamente, mas as secções transversais foram aumentadas 40 mm em todo o perímetro. Deste modo, as tipologias A.6 e C.2 são classificadas como R60 (espessura superior a 240 mm), enquanto que todas as outras (excepto a D.1) são classificadas como R30 (espessura superior a 160 mm) [8]. Finalmente, a tipologia D.1 é um ligador comercial do tipo cauda-de-andorinha em alumínio, composto por duas partes que engatam e que são aparafusadas ao topo da viga e à face do pilar (Fig. 2.2).

As várias tipologias foram escolhidas de modo a que se pudessem observar diferentes modos de rotura, tais como roturas dúcteis das cavilhas e de esmagamento localizado (B.1), roturas frágeis por tracção perpendicular às fibras ou por esforço transversal (A.1-3, A.6, B.2 e C.1) e ligações reforçadas com parafusos autoroscantes (A.4). Tolerâncias construtivas como a folga entre o topo da viga e a face do pilar foram também consideradas (A.1-3).

As ligações foram produzidas com madeira lamelada colada de Espruce da classe de resistência GL 24h (EN 1194 [9]). As chapas de ligação feitas à medida foram fabricadas com chapas de aço de 5 mm de espessura da classe S 355 (EN 10025-2 [10]), cavilhas de aço da classe 4.6 (EN 1993-1-8 [11]) e pregos estriados da classe 4.6 [11] com diâmetro de 6 mm e comprimento de 80 mm. Na tipologia A.4, o reforço foi feito com parafusos autoroscantes de aço com diâmetro de 9 mm e resistência à tracção de 25.5 kN. Na ligação A.5, as chapas comerciais utilizadas eram feitas de aço com 3 mm de espessura, da classe de resistência S 250 GD (EN 10346 [12]), enformadas a frio e fixadas à face do pilar com pregos estriados da classe 4.6 [11], com diâmetro de 4 mm e comprimento de 60 mm. O ligador metálico do tipo cauda-de-andorinha da tipologia D.1 era feito de alumínio da classe

EN AW 6082 (EN 755-2), sendo uma das partes fixada ao topo da viga (com 13 parafusos autorroscantes com diâmetro de 8 mm e comprimento de 100 mm) e a outra à face do pilar (com 8 parafusos iguais aos anteriores).

Tabela 1. Programa dos ensaios.

Tipologia da ligação	Tipo de ensaio		Carregamento	Número de ensaios
A.1	20 °C	ligação viga	Até à rotura	3
	20 °C	ligação viga-pilar	Até à rotura	1
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{A.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
A.2	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{A.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
A.3	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{A.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
A.4	20 °C	ligação viga	Até à rotura	1
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{A.4, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	1
A.5	20 °C	ligação viga-pilar	Até à rotura	1
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{A.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	1
A.6	20 °C	ligação viga	Até à rotura	1
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{A.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
B.1	20 °C	ligação viga	Até à rotura	5
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{B.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
B.2	20 °C	ligação viga	Até à rotura	5
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{B.2, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
C.1	20 °C	ligação viga	Até à rotura	3
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{C.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
C.2	20 °C	ligação viga	Até à rotura	3
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{C.2, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	2
D.1	20 °C	ligação viga-pilar	Até à rotura	1
	Fogo	ligação viga-pilar	$0.3 \cdot R_{D.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$	1

$R_{A.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$ ,  $R_{B.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$ ,  $R_{B.2, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$ ,  $R_{C.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$ ,  $R_{C.2, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$  e  $R_{D.1, \text{média}, 20^\circ\text{C}}$  são as resistências médias dos ensaios das tipologias A.1, B.1, B.2, C.1, C.2 e D.1, respectivamente, à temperatura normal (20 °C).

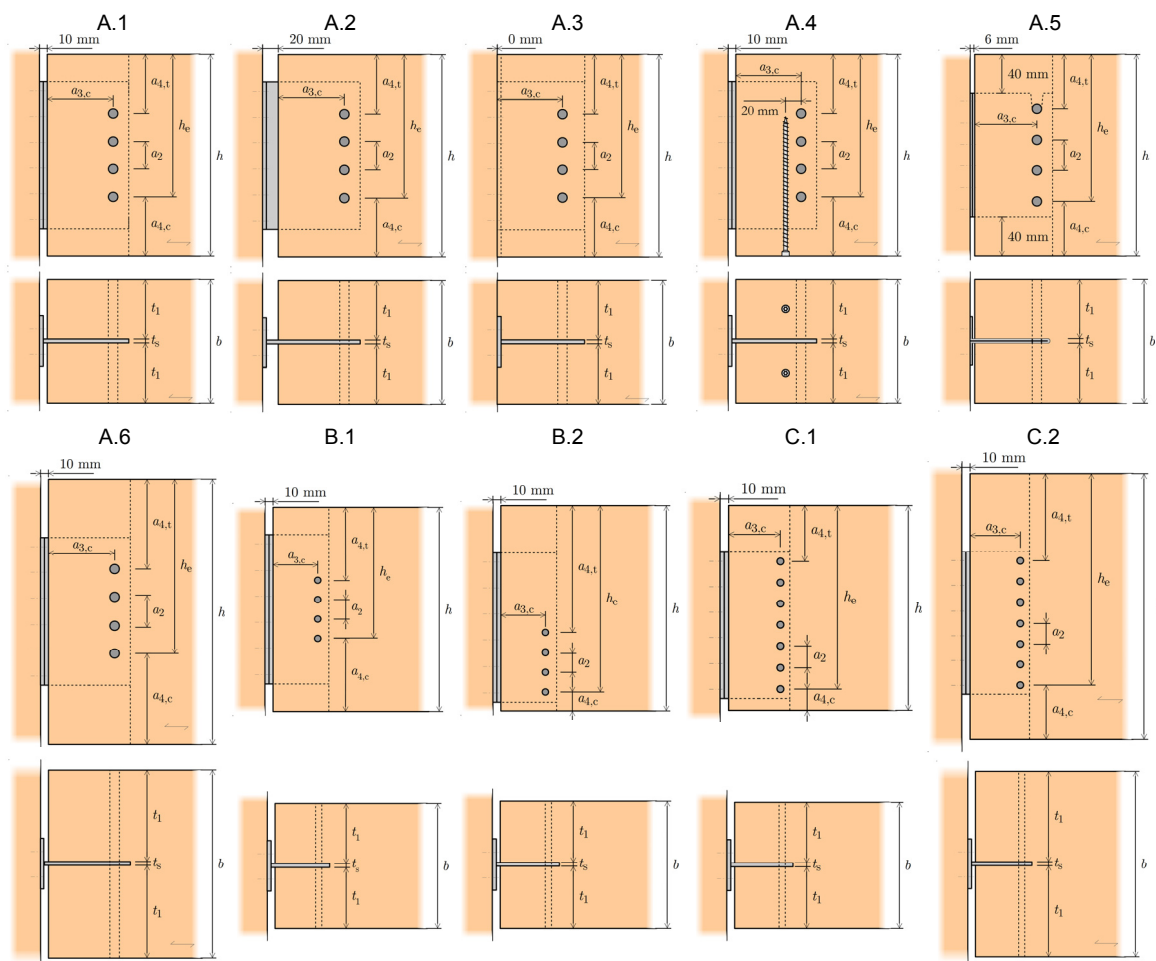


Figura 2.1 Geometria das ligações com cavilhas ensaiadas.

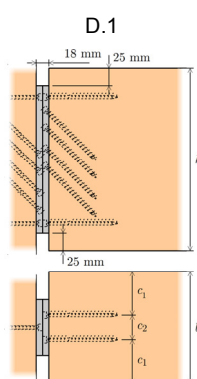


Figura 2.2. Ligador tipo cauda-de-andorinha em alumínio.

Tabela 2. Geometria das ligações ensaiadas.

Tipologia da ligação	$b \times h$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]	$n_d$	$h_e/h$ [ ]	$a_2$ [mm]	$a_{3,c}$ [mm]	$a_{4,t}$ [mm]	$a_{4,c}$ [mm]	$s$ [mm]
A.1, A.4	160×260	12	4	0.71	36	84	76	76	10
A.2	160×260	12	4	0.71	36	84	76	76	20
A.3	160×260	12	4	0.71	36	84	76	76	0
A.5	160×260	12	4	0.73	40	80	70	70	6
A.6	240×340	12	4	0.66	36	84	116	116	10
B.1	160×260	8	4	0.64	24	56	94	94	10
B.2	160×260	8	4	0.91	24	56	164	24	10
C.1	160×260	8	7	0.91	24	56	92	24	10
C.2	240×340	8	7	0.81	24	56	132	64	10
D.1	160×260	-	-	-	-	-	-	-	18

$b$  e  $h$  são a largura e a altura da secção transversal, respectivamente;  $d$  é o diâmetro das cavilhas;  $h_e$  é a distância ao bordo solicitado do ligador mais afastado;  $a_2$ ,  $a_{3,c}$ ,  $a_{4,t}$  e  $a_{4,c}$  são o espaçamento entre ligadores, a distância ao topo não solicitado e a distância a bordo não solicitado, respectivamente;  $s$  é a folga entre o topo da viga e a face do pilar.

### 3. ENSAIOS À TEMPERATURA NORMAL

#### 3.1 Sistema de ensaio

O sistema de ensaio foi especialmente desenvolvido de modo a que a ligação fosse solicitada do mesmo modo nos ensaios à temperatura normal e nos ensaios de resistência ao fogo. O sistema é composto por um pórtico horizontal de aço, no interior do qual são colocadas e carregadas as ligações e ao qual são fixados os sensores e actuadores. Nos ensaios à temperatura normal, o pórtico foi apoiado ligeiramente acima do solo (Figura 3a) e para os ensaios de resistência ao fogo o pórtico foi posicionado sobre um forno horizontal, alinhando-se a ligação com a abertura do forno (Figura 3b). A carga foi aplicada na viga através de uma chapa, ligada por dois varões aos actuadores óleo-hidráulicos. Uma vez que durante os ensaios de fogo não pode haver equipamento dentro do forno, o sistema de aplicação de carga foi posicionado fora do forno, mas o mais perto possível da ligação. Tanto nos ensaios à temperatura normal como nos ensaios de resistência ao fogo, a carga foi aplicada à mesma distância da ligação, assegurando-se deste modo a mesma distribuição de esforços.

Foram realizados dois tipos de ensaio à temperatura normal: ensaios apenas ao *lado da viga* da ligação (substituindo-se o pilar de madeira por um perfil metálico, tal como apresentado na Fig. 3a); e ensaios da ligação viga-pilar completa (iguais aos ensaios de resistência ao fogo e apresentado na Fig. 3b). Os ensaios apenas ao *lado da viga* da ligação foram feitos porque se estimou que a rotura da maioria das ligações ocorreria nesse lado (Tabela 3 e Fig. 4a) e porque se assumiu que este lado da ligação estaria mais exposto ao fogo e seria, deste modo, mais importante para a resistência ao fogo. A força aplicada na viga, através da chapa ligada pelos varões aos actuadores, foi controlada através de duas células de carga para varões. Nos ensaios apenas ao *lado da viga* da ligação, foi colocada uma célula de carga adicional no apoio da viga no lado oposto ao da ligação ensaiada e o esforço transversal na ligação foi obtido por equilíbrio ( $F_{\text{ligação}} = F_{\text{varão}} - F_{\text{apoio}}$ ). Nos ensaios com a ligação completa, a célula de carga foi colocada sob o pilar e, assim, o esforço

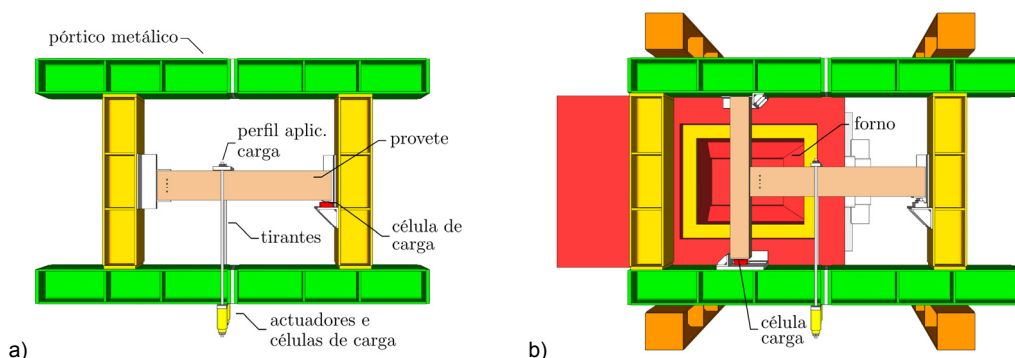


Figura 3. Vista em planta do sistema de ensaio: a) ensaios à temperatura normal; b) ensaios de resistência ao fogo.

transverso na ligação foi medido directamente. Para além das células de carga, foram instalados sensores de deslocamento na chapa de carregamento e na zona da ligação, para se monitorizarem os deslocamentos relativos entre os elementos de madeira e as chapas metálicas.

Os ensaios à temperatura normal foram realizados nos laboratórios da ETH Zurich, na Suíça. Foi seguido o procedimento da norma EN 26891:1991 [13], que prescreve uma curva de carregamento baseada numa estimativa da resistência  $F_{est}$  da ligação: a carga é aumentada até  $0.4 \cdot F_{est}$ , depois reduzida até  $0.1 \cdot F_{est}$  e finalmente aumentada até à rotura.

### 3.2 Resultados

A estimativa da resistência das ligações com cavilhas ensaiadas à temperatura normal e os respectivos valores obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 3 e na Figura 4. De acordo com o modelo de cálculo adoptado, era expectável que na maioria das ligações se observassem roturas frágeis por tracção perpendicular às fibras (A.1-3,5-6, B.1 e C.1-2); apenas as ligações B.2 e, eventualmente, A.4, poderiam sofrer roturas dúcteis com plastificação dos ligadores. Relativamente à estimativa da resistência das ligações solicitadas perpendicularmente às fibras, a EN 1995-1-1 não tem regras específicas para o caso de elementos solicitados junto a um topo (como é o caso de uma viga numa ligação viga-pilar), mas apenas para elementos solicitados perpendicularmente às fibras em zonas afastadas do topo (em particular para uma carga suspensa a meio vão de uma viga simplesmente apoiada). Contudo, tanto a norma alemã de dimensionamento de estruturas

Tabela 3. Estimativa da resistência das ligações com cavilhas ensaiadas à temperatura normal e valores obtidos experimentalmente.

Tipologia da ligação	Tipo de ensaio	Número de ensaios	$R_{k,estimada}$ [kN]		$R_{média,experimental,20^{\circ}C}$ [kN]	
			Lado da viga	Lado do pilar		
A.1	Lado da viga	3	27.0	-	51.5 (7%)*	-
	Ligação completa	1	27.0	30.7	51.2	(rotura no lado da viga)
A.2	-	-	27.0	28.3	-	-
A.3	-	-	27.0	33.6	-	-
A.4	Lado da viga	3	>27.0	30.7	64.0 (3%)	-
A.5	Ligação completa	1	28.6	14.3	39.3	(rotura no lado da viga)
A.6	Lado da viga	3	42.0	30.7	58.5 (11%)	-
B.1	Lado da viga	5	23.1	39.9	31.8 (10%)	-
B.2	Lado da viga	5	37.6	39.9	46.7 (7%)	-
C.1	Lado da viga	3	54.5	39.9	68.6 (8%)	-
C.2	Lado da viga	3	62.7	39.9	89.3 (4%)	-
D.1	Ligação completa	1	52.0 (segundo o fabricante)		60.3	(rotura no lado do pilar)

\* Coeficiente de variação apresentado entre parênteses.

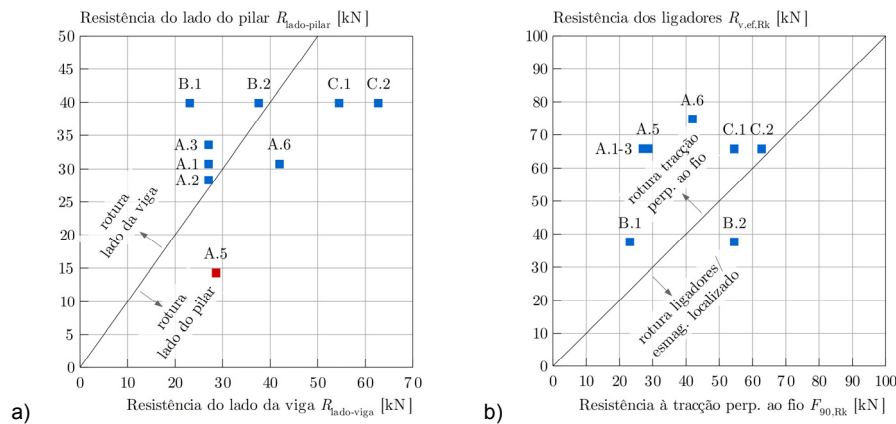


Figura 4. Estimativa da resistência das ligações com cavilhas ensaiadas: a) resistências do lado da viga e do lado do pilar; b) modos de rotura do lado da viga das ligações.

de madeira DIN 1052:2004 [6] como A. Leijten [14] (que desenvolveu o modelo de cálculo para elementos solicitados perpendicularmente às fibras da EN 1995-1-1) referem que a resistência de uma ligação solicitada perpendicularmente às fibras junto ao topo de um elemento é metade da resistência de uma ligação igual, mas afastada do topo.

Os resultados experimentais (Tabela 3) mostram que este modelo de cálculo subestima substancialmente a resistência do lado da viga da ligação, mesmo tendo em conta que os valores de resistência  $R_{k,estimada}$  são valores característicos (percentil 5%) e os valores  $R_{\text{média,experimental},20^{\circ}\text{C}}$  são valores médios dos resultados dos ensaios. Note-se ainda que a resistência do lado do pilar da ligação também parece ser subestimada pelo respectivo modelo de cálculo, uma vez que não foram observadas roturas no lado do pilar nas ligações A.5 ensaiadas.

## 4. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Os ensaios de resistência ao fogo foram realizados no forno horizontal do *Laboratory for Fire Testing* dos *Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology* (Empa), em Dübendorf, na Suíça.

### 4.1 Sistema de ensaio

Tal como descrito anteriormente (Figura 3b), o sistema de ensaio utilizado nos ensaios de resistência ao fogo é muito semelhante ao utilizado nos ensaios à temperatura normal. O mesmo pórtico horizontal foi colocado sobre o forno, de modo a centrar a zona da ligação com a abertura do forno. No seu plano, a ligação estava apoiada numa célula de carga, colocada sob o pilar (para se medir directamente o esforço de corte na ligação, transferido como esforço normal no pilar) e num apoio móvel, colocado na extremidade da viga oposta à da ligação. A carga foi aplicada através de uma chapa fixada ao extradorso da viga (que



durante o ensaio está deitada), ligada por dois varões aos actuadores óleo-hidráulicos. Uma vez que o equipamento de medição não podia ser exposto ao fogo, apenas foi medido o deslocamento da chapa de aplicação da carga e não os deslocamentos relativos entre os componentes da ligação. O forno era fechado através de uma caixa de material isolante que cobria a ligação, mas que não restringia os seus deslocamentos. O sistema de ensaio é apresentado na Figura 5.

Após os passos anteriores, as ligações eram carregadas até ao nível pretendido (Tabela 1), que era aproximadamente 30% da resistência à temperatura normal, e esse carregamento era mantido durante todo o ensaio de resistência ao fogo. Uma vez estabilizados os deslocamentos, os queimadores eram ligados e a ligação exposta à curva de incêndio padrão ISO 834 [15]. Após a rotura, atingida quando os deslocamentos na viga aumentavam tão rapidamente que esta já não conseguia suportar o nível de carga aplicado, as ligações eram rapidamente retiradas do pórtico e arrefecidas com água (Figura 6).

Uma vez que a rotura das ligações ensaiadas à temperatura normal ocorreu no *lado da viga* (Tabela 3) e que o *lado do pilar* das ligações (chapa de aço pregada ao pilar) era igual em todas as ligações, excepto A.5 e D.1 (que eram ligações comerciais), para se assegurar que nos ensaios de resistência ao fogo a rotura também ocorria do lado da viga, o pilar era parcialmente protegido com lã mineral. O objectivo era focar os ensaios de fogo no *lado da viga* das ligações e evitar que a carbonização dos lados e da face de trás do pilar causasse uma rotura prematura da ligação.

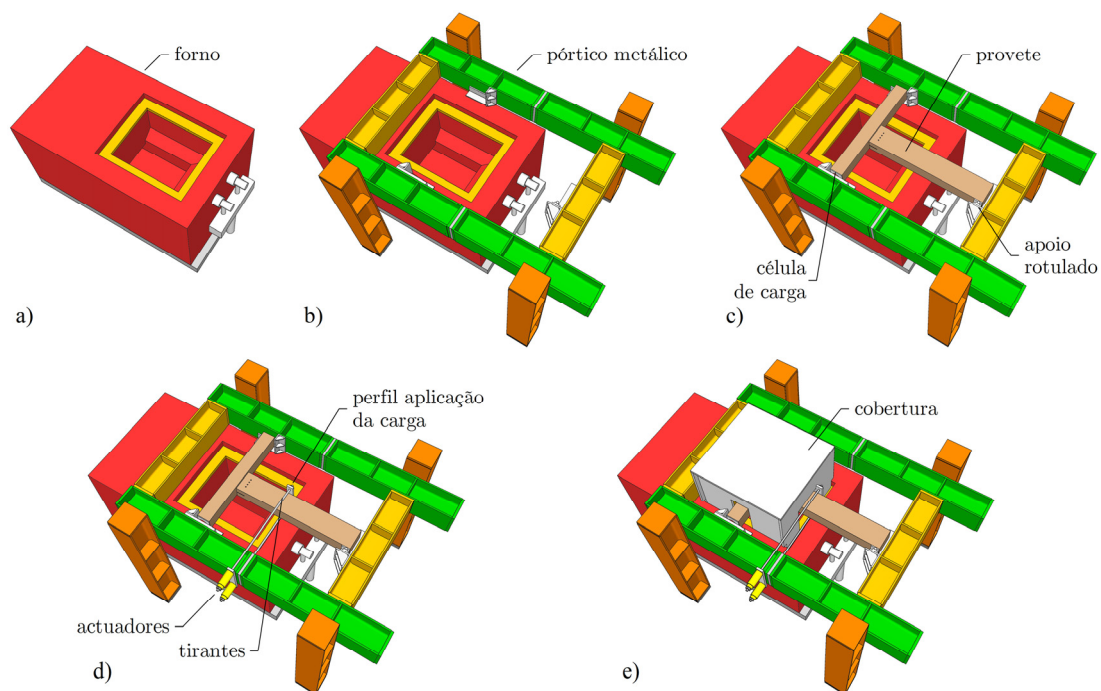


Figura 5. Sistema de ensaio: a) forno horizontal; b) pórtico metálico sobre o forno; c) ligação dentro do pórtico; d) sistema de aplicação da carga; e) cobertura exterior.

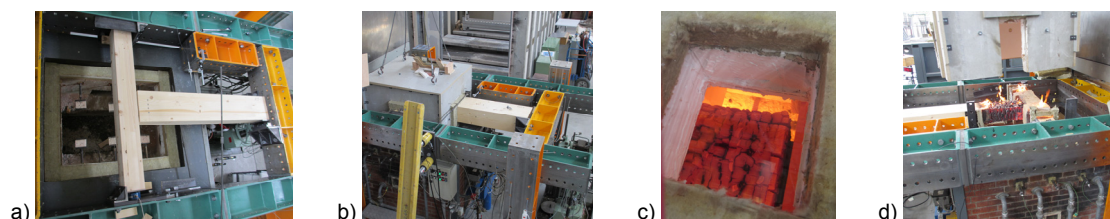


Figura 6. Ensaio de resistência ao fogo: a) ligação no pórtico metálico sobre o forno; b) cobertura exterior sobre a ligação durante um ensaio; c) vista de uma ligação no interior do forno; d) cobertura exterior a ser retirada no final de um ensaio.

## 4.2 Resultados e discussão

Os resultados dos ensaios de resistência ao fogo são apresentados na Tabela 4. Foram ensaiadas duas réplicas de quase todas as tipologias e os respectivos resultados são consistentes. Todas as ligações com cavilhas (tipologias A, B e C) atingiram resistências ao fogo superiores a 30 minutos e as ligações A.6 e C.2 atingiram 60 minutos, o que confirma a informação apresentada na documentação técnica da Lignum [8] relativamente à resistência ao fogo de ligações estruturais em madeira.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de resistência ao fogo.

Ligação		Carregamento	Resistência ao fogo
Tipologia	Provete	$E_{\text{fogo, ligação}}$ [kN]	$t_{fi}$ [min]
A.1	A.1.F-1	15.2	39
	A.1.F-2	15.4	44
A.2	A.2.F-1	15.4	32
	A.2.F-2	15.4	34
A.3	A.3.F-1	15.5	48
	A.3.F-2	15.5	47
A.4	A.4.F-1	19.4	39
A.5	A.5.F-1	15.4	38
A.6	A.6.F-1	15.5	77
	A.6.F-2	15.5	83
B.1	B.1.F-1	9.4	49
	B.1.F-2	9.5	43
B.2	B.2.F-1	14.0	43
	B.2.F-2	13.9	45
C.1	C.1.F-1	20.5	44
	C.1.F-2	20.5	42
C.2	C.2.F-1	20.6	78
	C.2.F-2	20.6	73
D.1	D.1.F-1	17.8	34

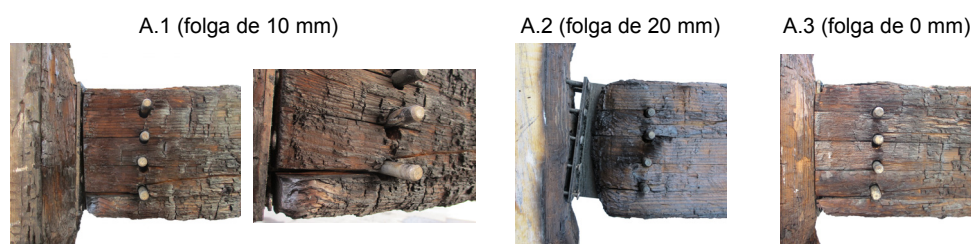


Figura 7. Influência da folga entre o topo da viga e a face do pilar: ligações A.1, A.2 e A.3 após os ensaios de resistência ao fogo.

Relativamente à influência da folga entre o topo da viga e a face do pilar, observou-se que um aumento de 10 mm (A.1) para 20 mm (A.2) conduziu a uma redução de 44 para 33-34 minutos da resistência ao fogo. Por outro lado, com a diminuição da folga de 10 mm (A.1) para 0 mm (A.3) a resistência ao fogo aumentou apenas 3-4 minutos. A folga de 20 mm entre o topo da viga e a face do pilar provocou roturas no *lado do pilar* da ligação, ao contrário das folgas de 10 e de 0 mm, em que a rotura ocorreu do *lado da viga* (esmagamento localizado da madeira solicitada pelas cavilhas, seguido de rotura da viga por tracção perpendicular às fibras). Uma vez que a carbonização das faces laterais dos pilares foi impedida através da aplicação de lâ mineral, os danos causados pelo fogo afectaram principalmente as zonas acima e abaixo da chapa de topo da ligação, influenciando directamente os pregos periféricos mais solicitados ao arrancamento e a zona de compressão da chapa de topo, permitindo, assim, que esta rodasse (Figura 7, A.2).

A ligação reforçada com parafusos autorroscantes (A.4) atingiu uma resistência ao fogo 5 minutos menor que a da ligação não reforçada correspondente (A.1). O reforço com parafusos autorroscantes é uma técnica eficaz e vulgarmente utilizada para lidar com as roturas frágeis em tracção perpendicular às fibras a que este tipo de ligação está sujeito. No entanto, tal como observado pelos autores num estudo anterior sobre a resistência ao fogo de ligações, em tracção, reforçadas com parafusos autorroscantes [7], os parafusos metálicos de reforço também aumentam a condução de calor para ao interior da ligação (Figura 8), o que nalguns casos compromete a sua resistência ao fogo.

Nas ligações com as chapas de ligação comerciais (A.5), a folga entre o topo da viga e a face do pilar era de apenas 6 mm (Figura 2.1 e Tabela 2) em vez de 10 mm como na ligação equivalente A.1. Embora a resistência mecânica estimada para o *lado do pilar* desta ligação fosse inferior à do *lado da viga* (Tabela 3 e Figura 4a), nos ensaios à temperatura normal a rotura deu-se no *lado da viga*. Esta ligação comercial atingiu uma resistência ao fogo 5 minutos inferior à da ligação A.1 e a rotura ocorreu no *lado do pilar*, de modo semelhante ao da ligação A.2. No entanto, a carga aplicada à ligação A.5 durante o ensaio de resistência ao fogo foi cerca de 40% da resistência mecânica do *lado da viga* à temperatura normal, em vez de 30% como nas ligações A.1-3.



Figura 8. Ligações A.4 e A.5 após os ensaios de resistência ao fogo.

A influência do modo de rotura na resistência ao fogo pode ser analisada nas ligações B.1 e B.2. Nestas ligações foram utilizadas cavilhas com um diâmetro  $d = 8$  mm e, variando a sua posição em altura, obtiveram-se, à temperatura normal, modos de rotura frágeis por tracção perpendicular às fibras (B.1) e dúcteis por plastificação das cavilhas (B.2). No entanto, nos ensaios de resistência ao fogo observaram-se em ambas as tipologias extensas deformações por esmagamento localizado sob as cavilhas, seguidas por rotura em tracção perpendicular às fibras. O menor espaçamento entre os ligadores na direcção perpendicular às fibras especificado pela EN 1995-1-1 ( $a_2 = 3 \cdot d$ , em vez de  $5 \cdot d$  na direcção paralela às fibras) conduz prematuramente à rotura da ligação quando a madeira entre os parafusos é carbonizada (Figura 9). Também a menor distância  $a_4$  dos ligadores ao bordo do elemento para solicitações perpendiculares às fibras ( $a_4 = 3 \cdot d$ , em vez de  $7 \cdot d$  na direcção paralela às fibras) resultou na carbonização completa da madeira em torno dos parafusos mais periféricos. Independentemente do modo de rotura à temperatura normal, ambas as tipologias atingiram aproximadamente a mesma resistência ao fogo.



Figura 9. Ligações B.1 e B.2 após os ensaios de resistência ao fogo.

À temperatura normal, as ligações C.1 romperam por esforço transverso/tracção perpendicular às fibras e atingiram os valores mais elevados de resistência mecânica (Tabela 3). Nos ensaios de resistência ao fogo, as cavilhas permaneceram relativamente direitas (não houve formação de rótulas plásticas) e a madeira em torno das cavilhas mais próximas do bordo carbonizou completamente (Figura 10). Após a rotura, observaram-se fendas longitudinais na viga.

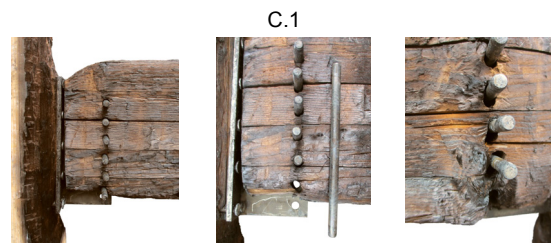


Figura 10. Ligações C.1 após os ensaios de resistência ao fogo.

As ligações A.6 e C.2 atingiram mais do que os esperados 60 minutos de resistência ao fogo [8]. Relativamente às ligações A.6 (com cavilhas de 12 mm de diâmetro), a longa exposição ao fogo levou à carbonização profunda da madeira, no pilar, tanto acima como por baixo da chapa de topo da ligação, afectando as zonas de tracção (pregos sujeitos ao arrancamento) e de compressão e permitindo, deste modo, a rotação da chapa de ligação (Figura 11, lado esquerdo). A distância ao topo  $a_3$  dos ligadores nas ligações C.2 (cavilhas com  $d = 8$  mm) era inferior à das ligações A.6 e, por conseguinte, o momento aplicado na chapa de topo era também menor. Deste modo, a rotação das chapas de ligação nas ligações C.2 foi muito menor do que nas ligações A.6. Por outro lado, a carbonização na zona da viga entre o alinhamento dos ligadores e o topo da viga foi significativamente mais elevada que no resto do elemento, devido ao calor adicional proveniente da combustão da face do pilar e do calor transferido pelos ligadores para o interior da secção da viga. Após a carbonização da madeira entre as cavilhas, a carga passou a ser transferida através da última cavilha, que formou uma rótula plástica (Figura 11, lado direito).

Finalmente, o ligador comercial de alumínio do tipo cauda-de-andorinha (D.1) também atingiu uma resistência ao fogo superior a 30 minutos, sendo a rotura devida à destruição do próprio ligador após 36 minutos (Figura 12). Esta ligação tinha uma folga de 18 mm (espessura do ligador após a montagem) entre o topo da viga e a face do pilar, o que é significativamente maior que os 10 mm da maioria das outras ligações.



Figura 11. Ligações A.6 e C.2 após os ensaios de resistência ao fogo.

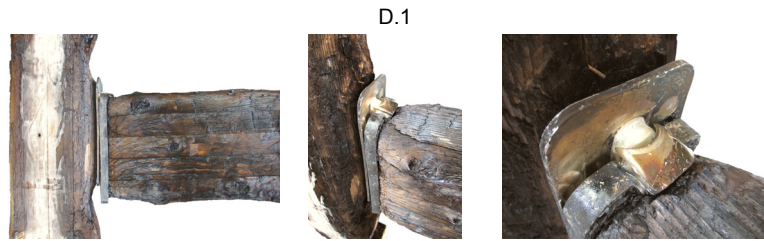


Figura 12. Ligação D.1 após o ensaio de resistência ao fogo.

## 5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentam-se os resultados de uma extensa campanha experimental sobre a resistência de ligações viga-pilar sujeitas a esforço transversal e a tracção perpendicular às fibras. O sistema de ensaio foi especialmente desenvolvido para ser utilizado tanto à temperatura normal, como nos ensaios de resistência ao fogo. Os resultados dos ensaios de resistência ao fogo mostram que as tipologias ensaiadas de ligações aço-madeira com cavilhas atingiram mais de 30 e até mais de 60 minutos de resistência ao fogo. No entanto, observou-se que uma maior folga entre o topo da viga e a face do pilar, um menor espaçamento entre as cavilhas e a presença de parafusos autoroscantes de reforço conduziram a uma redução da resistência ao fogo. Apesar do *lado da viga* destas ligações estar aparentemente mais exposto ao fogo, também se observaram roturas no *lado do pilar* da ligação e, deste modo, o cálculo da resistência ao fogo destas ligações tem de ter em conta ambos os lados da ligação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Bolsa de Doutoramento SFRH-BD-70459-2010).

## REFERÊNCIAS

- [1] EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Structural fire design, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- [2] J. König, M. Fontana, The performance of timber connections in fire – Test results and rules of Eurocode 5, in: *Proceedings of International RILEM Symposium “Joints in Timber Structures,”* RILEM Publications, Stuttgart, Germany, 2001: pp. 639–648.
- [3] J. Norén, *Load-bearing capacity of nailed joints exposed to fire*, Fire and Materials. 20 (1996) 133–143.

- [4] D. Dhima, *Vérification expérimentale de la résistance au feu des assemblages d'éléments en bois*, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM), Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France, 1999.
- [5] J. Kruppa, T. Lamadon, P. Racher, *Fire resistance tests of timber connections*, CTICM - Département Incendie et Essais, Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, 2000.
- [6] DIN 1052:2004-08. *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*, Deutsches Institut für Normung (DIN), 2004.
- [7] P. Palma, A. Frangi, E. Hugli, P. Cachim, H. Cruz, Fire resistance tests on steel-to-timber dowelled connections reinforced with self-drilling screws, in: *Proceedings of the 2nd Ibero-Latin-American Congress on Fire Safety – 2nd CILASCI*, Coimbra, Portugal, 2013.
- [8] A. Frangi, I. Brühwiler, J. Studhalter, R. Wiederkehr, *Lignum-Dokumentation Brandschutz. 3.1 Feuerwiderstandsbemessung – Bauteile und Verbindungen*, Lignum Holzwirtschaft Schweiz, Zurich, 2011.
- [9] EN 1194:1999. Timber structures – Glued laminated timber – Strength classes and determination of characteristic values, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 1999.
- [10] EN 10025-2:2004. Hot rolled products of structural steels - Technical delivery conditions for non-alloy structural steels, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- [11] EN 1993-1-8:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2005.
- [12] EN 10346:2009. Continuously hot-dip coated steel flat products. Technical delivery conditions, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2009.
- [13] EN 26891:1991. Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 1991.
- [14] A. Leijten, Splitting strength of beams loaded by connections – Model comparison, in: *Proceedings of the CIB-W18 Meeting 35*, CIB, Kyoto, Japan, 2002.
- [15] ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1: General requirements, International Organization for Standardization (ISO), 1999.