

## LIGAÇÕES ESTRUTURAIS DO TIPO MADEIRA-MADEIRA COM PLACAS DE MADEIRA DENSIFICADA E CAVILHAS DE FRP

Pedro Palma \*

PhD student  
ETH Zurich  
Suíça  
palma@ibk.baug.ethz.ch

Peter Kobel

PhD student  
ETH Zurich  
Suíça  
kobel@ibk.baug.ethz.ch

Alexander Minor

Master student  
ETH Zurich  
Suíça  
minora@student.ethz.ch

Andrea Frangi

Prof. Dr.  
ETH Zurich  
Suíça  
frangi@ibk.baug.ethz.ch

### SUMÁRIO

O comportamento de ligações do tipo madeira-madeira com placas de madeira densificada e ligadores do tipo cavilha de FRP foi analisado experimentalmente e foi desenvolvido um modelo de cálculo com base nas expressões da EN 1995-1-1. Foram realizados ensaios de esmagamento localizado em placas de madeira densificada e ensaios de caracterização dos ligadores de FRP, bem como ensaios de ligações estruturais fabricadas com estes materiais. Os resultados mostram que as ligações têm um comportamento adequado à sua utilização estrutural, em termos de capacidade de carga e ductilidade, e o modelo de cálculo proposto apresenta resultados coerentes com os resultados experimentais.

**Palavras-chave:** estruturas de madeira, ligações, madeira densificada, varões de FRP, ensaios, dimensionamento.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento

O comportamento das estruturas de madeira é largamente influenciado pelo comportamento das suas ligações. Nas estruturas correntes, as ligações mais comuns entre elementos de madeira são realizadas através de chapas metálicas e ligadores metálicos do tipo cavilha sujeitos ao corte. As vantagens deste tipo de ligação são a facilidade de dimensionamento, execução e montagem, bem como a sua elevada capacidade de carga e ductilidade. Contudo, os componentes metálicos aumentam a condução de calor para o interior da madeira e comprometem frequentemente a sua resistência ao fogo [1]. Por outro lado, os componentes metálicos também limitam a utilização destas ligações em ambientes



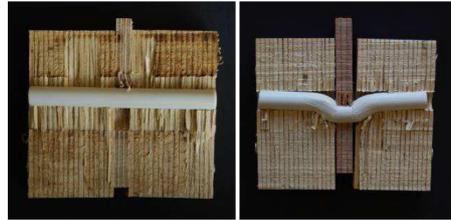


Figura 2. Ligações com cavilhas de FRP e placas de contraplacado (esquerda) e de madeira densificada (direita), sujeitas a corte duplo (fotos de A. Thomson et al [4]).

reforçado com fibras de vidro (GFRP). No entanto, tanto as fibras de vidro como a resina de poliéster têm um fraco comportamento quando expostas a temperaturas elevadas [7] e há compósitos com melhor comportamento mecânico, pelo que uma outra combinação de matriz polimérica e fibras de reforço talvez seja preferível.

Dada a influência da matriz polimérica nas propriedades mecânicas perpendiculares ao eixo dos varões de FRP (propriedades mais importantes em elementos sujeitos ao corte e a compressão transversal, tal como as cavilhas numa ligação madeira-madeira), a utilização de compósitos com outras constituições implica a realização de novos ensaios para se caracterizar o seu comportamento mecânico. Por outro lado, a utilização das fórmulas de Johansen [8] para estimar a resistência de ligações madeira-madeira com ligadores do tipo cavilhas ao corte (comportamento rígido-perfeitamente plástico) requer que se conheça o momento de plastificação dos ligadores, o que é simples para materiais isotrópicos como o aço, mas não para materiais anisotrópicos como os varões de FRP.

### 1.2.2 Resistência ao esmagamento localizado em placas de derivados de madeira de alta densidade

A utilização de madeira microlamelada colada (LVL) de madeira de Faia (*Fagus sylvatica* L.) em ligações estruturais foi estudada por P. Kobel et al [9], na ETH Zurich, na Suíça, que obtiveram valores de resistência ao esmagamento localizado entre 70 e 95 N·mm<sup>-2</sup>, em elementos com uma densidade média  $\rho_{\text{mean}} = 762 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Placas com densidades superiores podem ser obtidas através de um processo de densificação das folhas de madeira durante a fabricação de LVL [10], obtendo-se deste modo placas de madeira densificada (DVW) com densidades entre 1000 e 1400 kg·m<sup>-3</sup>. No início dos anos 90 foram feitos ensaios de caracterização física e mecânica destas placas [10,11] e desenvolvidas algumas aplicações estruturais [12]. A resistência ao esmagamento localizado destas placas variou entre 90 e 180 N·mm<sup>-2</sup>, dependendo da sua densidade. Estes valores elevados de resistência permitem que se substituam as chapas de aço vulgarmente utilizadas em ligações aço-madeira (com espessuras de 5 a 8 mm) por placas de madeira densificada com o dobro ou o triplo da espessura, sem reduzir significativamente a espessura e a resistência dos elementos laterais de madeira.

### 1.3 Objectivos, âmbito e abordagem

Os objectivos do projecto de investigação apresentado nesta comunicação eram o desenvolvimento de um sistema de ligação estrutural com ligadores do tipo cavilha para estruturas de madeira, utilizando componentes não-metálicos, e dos correspondentes métodos de dimensionamento. O sistema de ligação desenvolvido prevê a utilização de placas de madeira densificada e de cavilhas de FRP sujeitas ao corte. A utilização destas ligações foi estudada tanto em elementos estruturais de madeira lamelada colada de Espruce (*Picea abies* (L.) H. Karst), como de LVL de Faia (*Fagus sylvatica* L.). Nesta comunicação são apenas apresentados e discutidos os resultados dos ensaios e os métodos de dimensionamento para o primeiro caso.

Um dos objectivos era que o método de dimensionamento se baseasse nas regras da EN 1995-1-1 [13] para ligadores do tipo cavilha ao corte, para facilitar a sua utilização na prática, e que este pudesse ser facilmente adaptado a diferentes tipos de varões de FRP, através de ensaios de caracterização mecânica fáceis de realizar. Embora as cavilhas de FRP tenham um comportamento totalmente diferente do das cavilhas de aço, a ductilidade dos varões de FRP em flexão/corte (ensaio de “viga curta”) permite que se calcule um momento efectivo de cedência plástica do ligador  $M_{y,eff}$ , que pode ser utilizado nas expressões da EN 1995-1-1 [4,5]. Para além deste parâmetro relativo aos ligadores, foi também necessário analisar a resistência ao esmagamento localizado das placas de madeira densificada. Os ensaios de ligações estruturais com apenas um ligador serviram para se validar o método de dimensionamento e os ensaios de ligações com vários ligadores permitiram analisar o número efectivo de ligadores e ajustar o modelo de dimensionamento em conformidade. Uma perspectiva global da abordagem adoptada é apresentada na Figura 3.

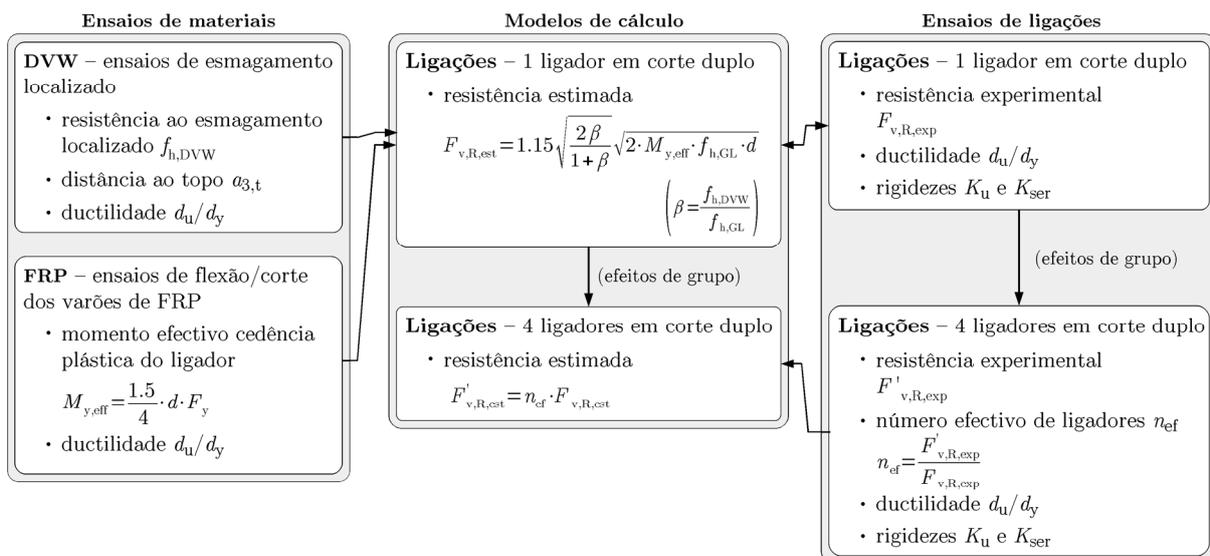


Figura 3. Visão global da abordagem adoptada.

## 2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Os parâmetros de resistência mais importantes na resistência de ligações madeira-madeira com ligadores do tipo cavilha ao corte são a resistência ao esmagamento localizado dos componentes de madeira e o momento de cedência plástica do ligador. Nas secções seguintes são apresentados os métodos e os resultados destes ensaios.

### 2.1 Resistência ao esmagamento localizado das placas de madeira densificada

Apesar do extenso trabalho de caracterização física e mecânica [10,11] e do desenvolvimento de aplicações estruturais [12], a madeira densificada tem sido usada apenas em aplicações não-estruturais. Por outro lado, relativamente à resistência ao esmagamento localizado, os resultados existentes têm por base ensaios com apenas dois diâmetros do ligador metálico (17 e 35 mm) [10]. Assim, foi necessário proceder novamente à caracterização mecânica das placas de madeira densificada, tendo em vista a sua utilização como elemento resistente nas ligações.

Os ensaios para determinação da resistência ao esmagamento localizado foram realizados de acordo com a norma EN 383:2007 [14], em provetes com as dimensões apresentadas na Tabela 1 e na Figura 4. Os ensaios foram realizados em tensão, sendo ensaiadas as duas extremidades do provete em simultâneo (Figura 5). Foram ensaiadas 5 réplicas de cada tipologia. As placas de madeira densificada utilizadas eram da classe K 20226 (norma DIN 7707), formadas com 50% das folhas na direcção ortogonal e com folhas de 1 mm de espessura de madeira de Faia (*Fagus sylvatica* L.). A densidade média dos provetes era  $1404 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , com um coeficiente de variação de 1%.

Os resultados dos ensaios (Tabela 1 e Figuras 6 e 7) mostram que se atingiram valores de resistência ao esmagamento localizado superiores aos obtidos por A. Leijten et al [10,11] e significativamente superiores aos obtidos em ensaios de esmagamento localizado de LVL de Faia [9]. Não se observam correlações evidentes entre o diâmetro do ligador ou a densidade e a resistência ao esmagamento localizado. Os resultados dos ensaios PE-5 são significativamente mais elevados que os das outras tipologias, o que se pode dever ao facto

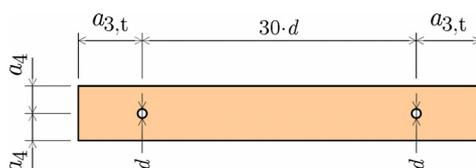


Figura 4. Geometria dos provetes de madeira densificada dos ensaios de esmagamento localizado (vd. Tabela 1).



Figura 5. Ensaio de esmagamento localizado.

dos provetes PE-5 serem todos provenientes da mesma zona de uma única placa de madeira densificada, ao contrário das outras tipologias. As placas de madeira densificada exibiram também uma notável capacidade de deformação plástica (Figura 7a1). A redução da distância ao topo para metade (ensaios PE-4) não afectou a resistência ao esmagamento localizado, mas reduziu severamente a ductilidade (Figura 7b, ensaios PE-3 e PE-4).

Tabela 1. Ensaios de esmagamento localizado em placas de madeira densificada.

Tipologia	Espessura	Diâmetro	Distância ao topo *	Distância ao bordo *	Densidade	Resistência esmagamento localizado
	$t$	$d$	$a_{3,t}$	$a_4$	$\rho_{DWW}$	$f_{h,DWW}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	[N·mm <sup>-2</sup> ]
PE-1	30	20	$7 \cdot d$	$3 \cdot d$	1390 (1%)	204 (4%)
PE-2	20	16	$7 \cdot d$	$3 \cdot d$	1413 (0%)	187 (7%)
PE-3	20	12	$7 \cdot d$	$3 \cdot d$	1411 (0%)	182 (3%)
PE-4	20	12	$3.5 \cdot d$	$3 \cdot d$	1408 (1%)	189 (6%)
PE-5	12	8	$7 \cdot d$	$3 \cdot d$	1396 (1%)	236 (3%)
Todas	-	-	-	-	1404 (1%)	198 (11%)
Todas (excepto PE-5)	-	-	-	-	1406 (1%)	191 (7%)

\* Distâncias ao topo e ao bordo iguais aos valores mínimos previstos na EN 1995-1-1 para cavilhas (excepto PE-4).

\*\* Coeficiente de variação apresentado entre parênteses.

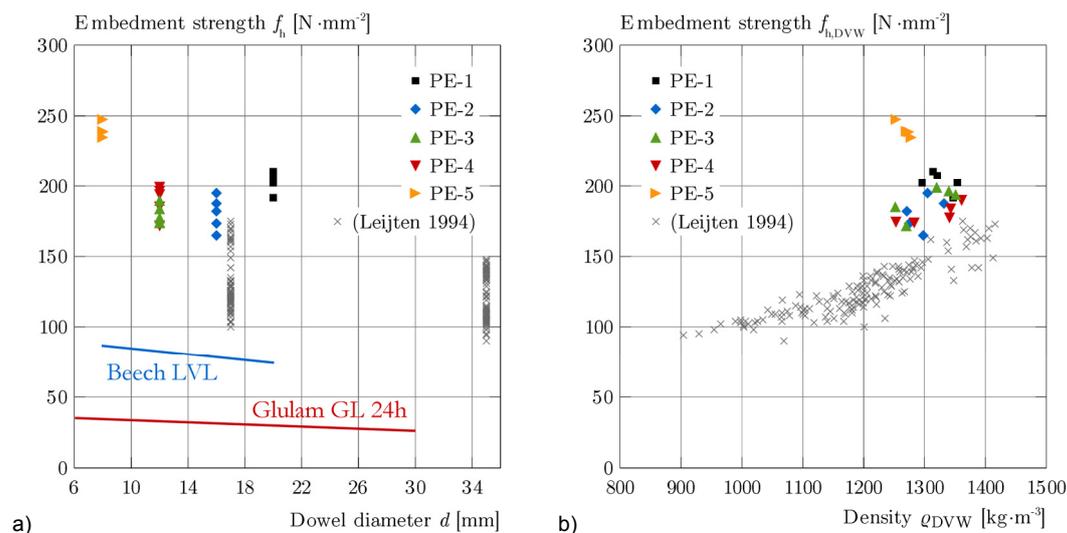


Figura 6. Resultados dos ensaios de esmagamento localizado: a) em função do diâmetro do ligador; b) em função da densidade da placa de madeira densificada.

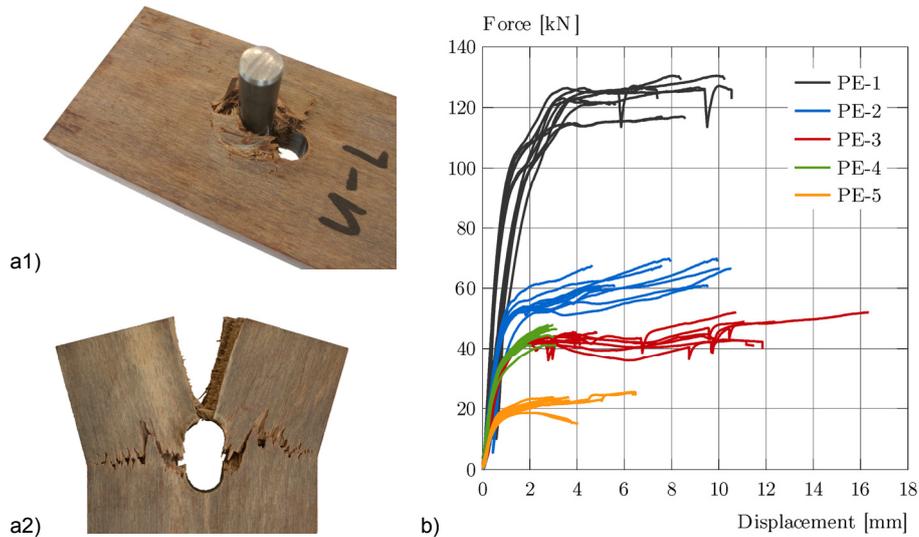


Figura 7. Resultados dos ensaios de esmagamento localizado: a1) provete tipo PE-3 após o ensaio; a2) provete tipo PE-4 após o ensaio; b) curvas força-deslocamento.

## 2.2 Resistência à flexão/corte das cavilhas de FRP

Os varões de FRP são constituídos por fibras de reforço, responsáveis pelas propriedades mecânicas na direção longitudinal do varão, e uma matriz polimérica (uma resina polimérica e outros constituintes adicionais), que envolve as fibras de reforço e assegura a distribuição de tensões para o compósito e entre as fibras, e que é responsável pelas propriedades mecânicas na direção transversal do varão [15].

Em ligações de madeira com ligadores metálicos do tipo cavilha sujeitos ao corte, o fuste do ligador não é sujeito a um estado de corte puro na interface dos elementos ligados, devido à reduzida rigidez da madeira face ao esmagamento localizado, mas antes a um estado de corte e flexão, que pode conduzir à formação de rótulas plásticas no ligador [8]. A determinação do momento de cedência plástica é simples no caso de ligadores metálicos, mas não no caso de varões de FRP, devido à sua rotura por corte entre camadas (*interlaminar shear failure*), tal como apresentado na Figura 8c. Assim, optou-se por uma configuração de ensaio baseada no método da “viga curta” (ASTM D4475 [16]), em que se tenta reproduzir a configuração deformada observada em cavilhas de FRP utilizadas em ligações (Figura 2). A chapa de aplicação da carga utilizada tinha 10 mm de espessura e os apoios foram colocados a  $1.5 \cdot d_{rod}$  das faces da chapa, em que  $d_{rod}$  é o diâmetro do varão. Devido à influência da matriz e das fibras no comportamento dos varões, foram analisados três tipos de compósitos: fibras de vidro e matriz de resina epoxídica (GE); fibras de carbono e matriz de resina epoxídica (CE); e fibras de vidro e matriz de resina de poliéster (GP). Foram realizadas três réplicas de cada ensaio. As fibras de vidro são significativamente mais baratas que as fibras de carbono, mas também menos resistentes e rígidas. A resina de poliéster é muito utilizada em componentes de FRP, em parte devido ao seu baixo custo, mas as resinas epoxídicas têm um comportamento mecânico melhor, mesmo a temperaturas

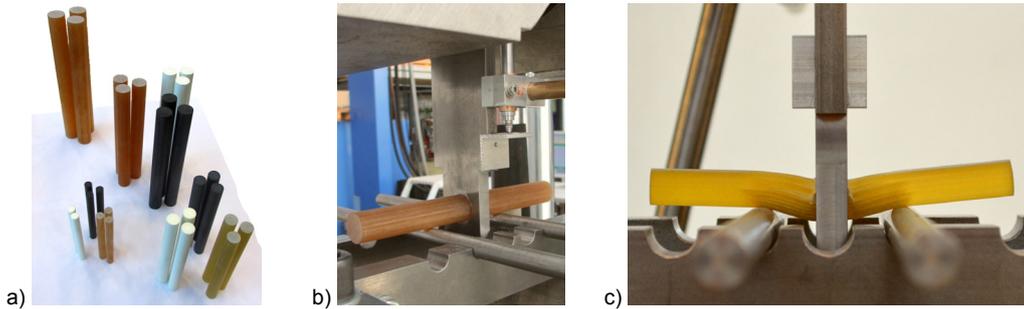


Figura 8. Ensaios de resistência à flexão/corte (viga curta) de varões de FRP: a) cavilhas de FRP; b) sistema de ensaio; c) rotura de uma cavilha de FRP.

de serviço um pouco mais elevadas. De acordo com o fornecedor, os varões GE e CE têm uma percentagem de fibras (em massa) de 65 a 70% e os varões PE têm entre 50 e 75%.

Os resultados destes ensaios (Figuras 9 e 10 e Tabela 2) mostram que os varões com fibras de vidro e matriz de resina epoxídica atingem resistências mais elevadas e ductilidades muito semelhantes às dos varões de fibras de carbono e matriz de resina epoxídica. Os varões de fibra de vidro e resina de poliéster apresentaram os valores mais baixos de resistência, rigidez e ductilidade.

Devido às características do modo de rotura por corte entre camadas, as curvas força-deslocamento apresentam variações bruscas após a primeira rotura, que correspondem ao aparecimento de novas fendas e à abertura das fendas existentes. Por outro lado, observa-se que após ser atingida a carga máxima os varões apresentam um capacidade de deformação significativa (excepto os varões GP), até a força se reduzir a 80% da força máxima (traço contínuo na Figuras 9 e 10), que interessa explorar nas ligações. Deste modo,

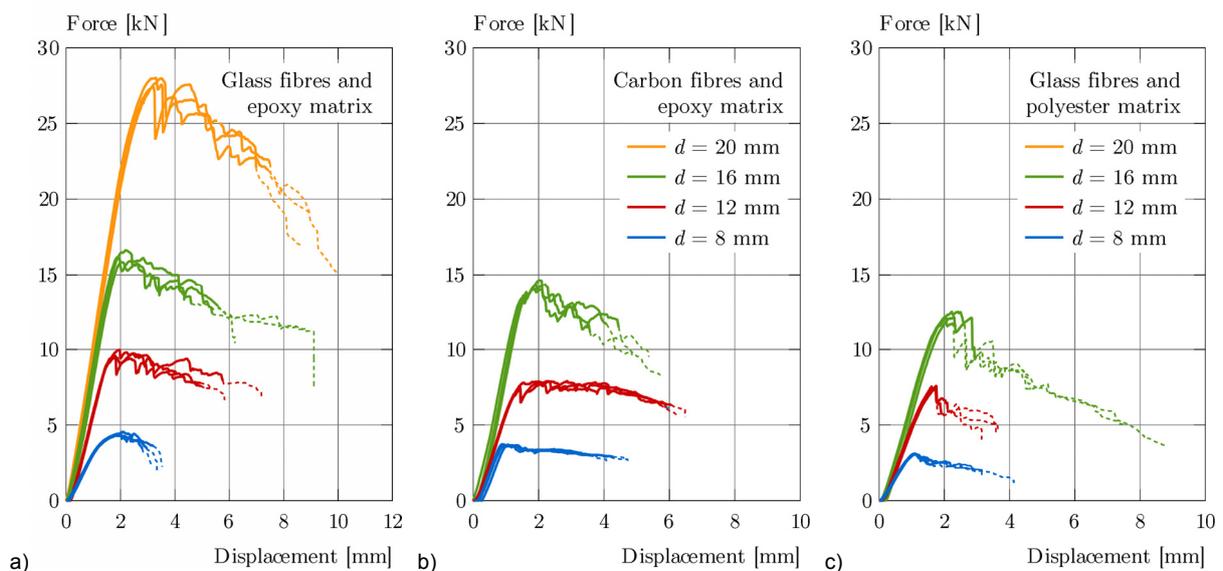


Figura 9. Resultados dos ensaios de resistência à flexão/corte de varões de FRP: a) fibras de vidro e matriz epoxídica (GE); b) fibras de carbono e matriz epoxídica (CE); c) fibras de vidro e matriz de poliéster (GP).

Tabela 2. Resultados dos ensaios de resistência à flexão/corte de varões de FRP.

Tipologia (fibras e matriz)	Ensaio	Diâmetro	Resistência	Rigidez	Ductilidade	Momento cedência plástica
		$d_{rod}$ [mm]	$F_{y,EEEP}$ [kN]	$k_{0,1-0,4}$ [kN·mm <sup>-1</sup> ]	$D_{EEEP}$ [mm·mm <sup>-1</sup> ]	$M_{y,eff}$ [N·mm]
Fibras de vidro matriz epoxídica (GE)	GE-8	8	4.1 (2%)	3.6 (1%)	2.4 (5%)	12.1
	GE-12	12	8.9 (3%)	7.0 (1%)	3.6 (6%)	38.7
	GE-16	16	14.7 (1%)	9.1 (3%)	3.0 (7%)	90.6
	GE-20	20	25.3 (2%)	11.1 (1%)	3.1 (4%)	191.4
Fibras de carbono matriz epoxídica (CE)	CE-8	8	3.3 (2%)	5.3 (3%)	4.7 (10%)	10.0
	CE-12	12	7.3 (3%)	6.5 (1%)	4.7 (3%)	32.9
	CE-16	16	13.1 (1%)	9.5 (3%)	2.7 (7%)	77.7
Fibras de vidro matriz de poliéster (GP)	GP-8	8	2.8 (2%)	3.5 (3%)	2.3 (16%)	8.7
	GP-12	12	6.8 (3%)	5.6 (1%)	1.4 (12%)	32.0
	GP-16	16	11.3 (1%)	7.3 (2%)	1.5 (8%)	70.1

\* Valores médios de três ensaios (coeficiente de variação apresentado entre parênteses).

o critério adoptado para determinação da resistência dos varões  $F_y$  foi o da curva elástico plástica de energia equivalente (método EEEP), que passa por ajustar uma curva força-deslocamento elástica-perfeitamente plástica cuja energia dissipada é igual à da curva obtida experimentalmente (Figura 10a). Ao troço elástico é atribuída uma rigidez igual à da curva experimental. A força de cedência plástica assim obtida é a resistência  $F_{y,EEEP}$  do ligador, apresentada na Tabela 2.

A. Thomson [3] determinou a força de cedência plástica através da intersecção da curva experimental com uma recta paralela ao troço elástico, mas desviada  $0.1 \cdot d_{rod}$  (*0.1·d offset method*). Contudo, este método tem a desvantagem, tal com o de adoptar a força máxima atingida, de ser susceptível às variações bruscas das curvas força-deslocamento experimentais e, deste modo, não ser representativo do comportamento mecânico global (Figura 10a). A resistência dos varões (força de cedência plástica  $F_{y,EEEP}$ ) em função do seu diâmetro e da sua composição são apresentados na Figura 10b.

Tal como foi referido, embora as cavilhas de FRP tenham um comportamento totalmente diferente do das cavilhas de aço, a ductilidade dos varões de FRP em flexão/corte permite que se calcule um momento efectivo de cedência plástica do ligador  $M_{y,eff}$ , que pode ser utilizado nas expressões da cálculo de resistência de ligações da EN 1995-1-1. Para tal, assume-se que a deformação do varão de FRP se pode aproximar pela deformação de um ligador com quatro rótulas plásticas (Figura 11), tal como assumido por A. Thomson [3].

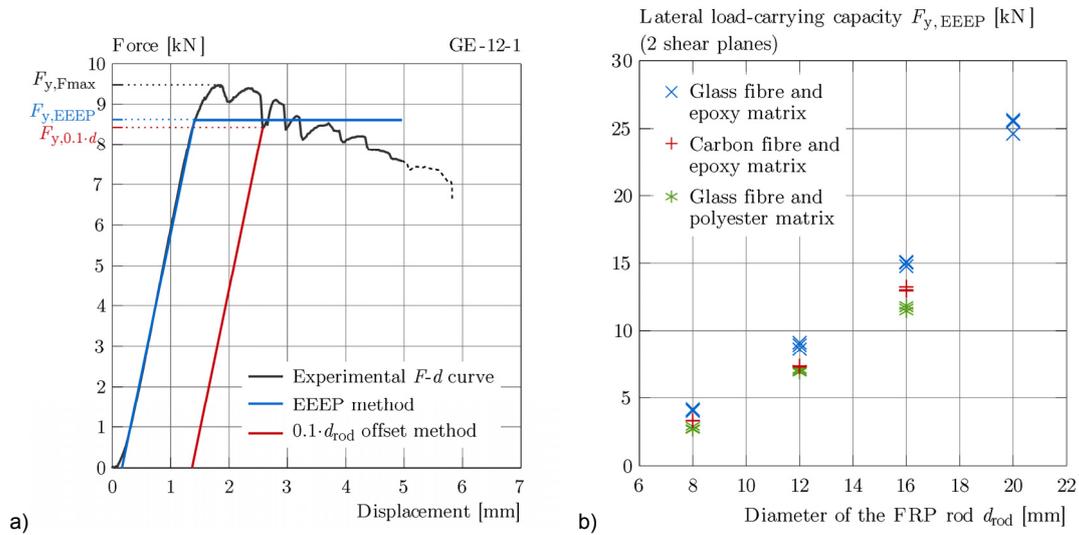


Figura 10. Resultados dos ensaios de resistência à flexão/corte de varões de FRP: a) Curva força-deslocamento e métodos de determinação de  $F_y$ ; b) resistência  $F_y$  dos ligadores das várias tipologias ensaiadas.

Igualando a energia dissipada pelo sistema com quatro rótulas plásticas ao trabalho da força de aplicada durante o ensaio, pode-se estimar um momento efectivo de cedência plástica  $M_{y,eff}$  do ligador (Equação 1). Assim, o momento de cedência plástica equivalente é dado por

$$\underbrace{4 \cdot M_{y,eff} \cdot \theta}_{\text{energia dissipada no sistema com quatro rotulas}} = \underbrace{F_y \cdot \delta_{exp}}_{\text{trabalho da força aplicada}} \quad \theta = \delta_{exp} / 1.5 \cdot d \quad \Rightarrow \quad M_{y,eff} = \frac{3 \cdot F_y \cdot d}{8} \quad (1)$$

em que  $M_{y,eff}$  é o momento efectivo de cedência plástica do ligador,  $\theta$  é o ângulo de rotação das rótulas plásticas ( $\theta \approx \delta_{exp} / 1.5 \cdot d$ ),  $F_y$  é a força de cedência plástica,  $\delta_{exp}$  é o deslocamento vertical do ponto de aplicação da carga e  $d$  é o diâmetro do ligador.

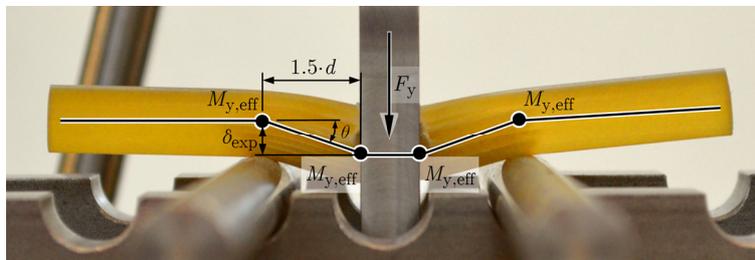


Figura 11. Deformação do ligador de FRP (baseado no modelo de A. Thomson [3]).

Os momentos efectivos de cedência das várias cavilhas de FRP são apresentados na Figura 12, em função do seu diâmetro. Na mesma figura são também apresentados os momentos de plastificação de cavilhas de aço, para comparação. Observa-se que, em

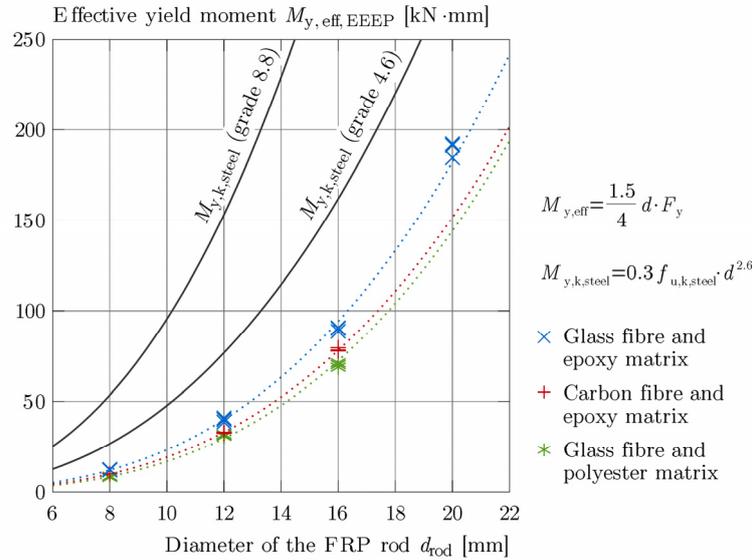


Figura 12. Momento efectivo de cedência plástica dos varões de FRP em função do seu diâmetro (momento de cedência de cavilhas de aço apresentado para comparação).

comparação com os ligadores de aço do mesmo diâmetro, as cavilhas de FRP apresentam resistências cerca de 50% inferiores. Os ligadores de FRP que apresentaram melhor comportamento foram os compósitos de fibra de vidro e matriz de resina epoxídica (GE), pelo que foram apenas ensaiadas ligações estruturais feitas com estes ligadores.

### 2.3 Ensaio de ligações

Os ensaios das ligações foram realizados nos laboratórios da ETH Zurich, na Suíça, (Figura 14a) segundo a norma EN 26891:1991 [17]. Foram ensaiadas ligações com placas de madeira densificada e um ou quatro ligadores de aço ou de FRP (geometria apresentada nas Figuras 13 e 14). As placas utilizadas tinham 12 mm de espessura e os ligadores 12 mm de diâmetro, tanto os de aço como os de FRP.

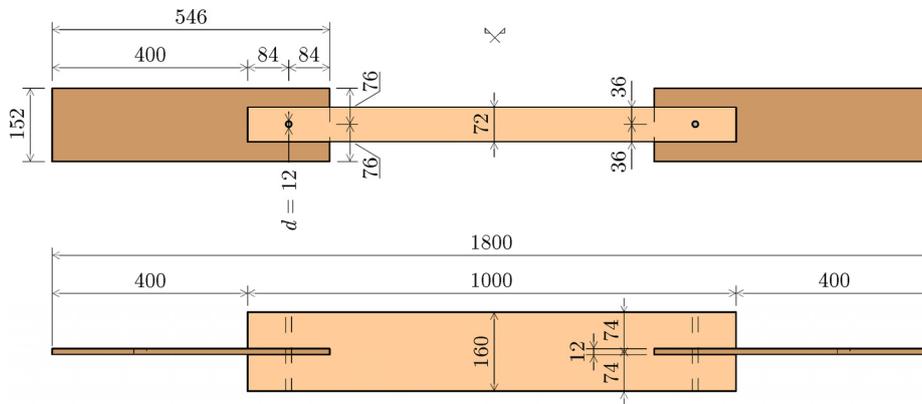


Figura 13. Geometria das ligações com placas de madeira densificada e apenas um ligador (aço ou FRP). Dimensões em mm.

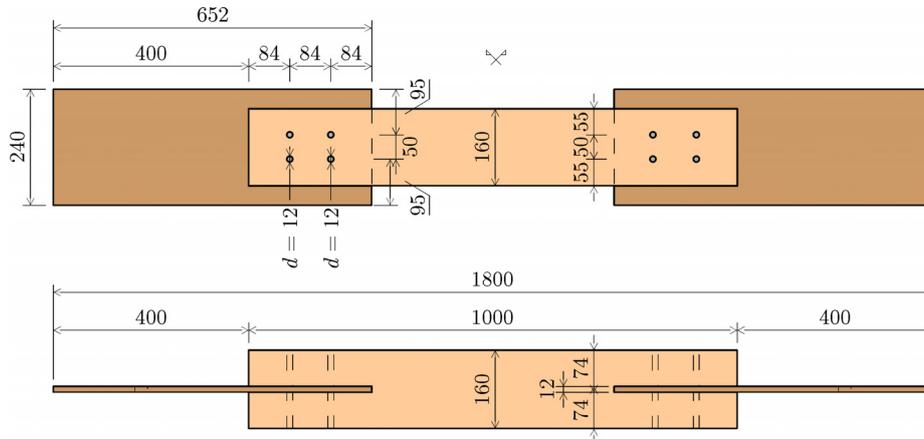


Figura 14. Geometria das ligações com placas de madeira densificada e quatro ligadores (aço ou FRP). Dimensões em mm.

Os provete de ensaio tinham uma ligação em cada topo e foram ensaiados em tracção. Os deslocamentos relativos entre as placas de madeira densificada e os elementos de madeira foram medidos através de LVDTs fixados aos elementos de madeira (Figura 15). Foram ensaiadas três réplicas de cada tipologia.

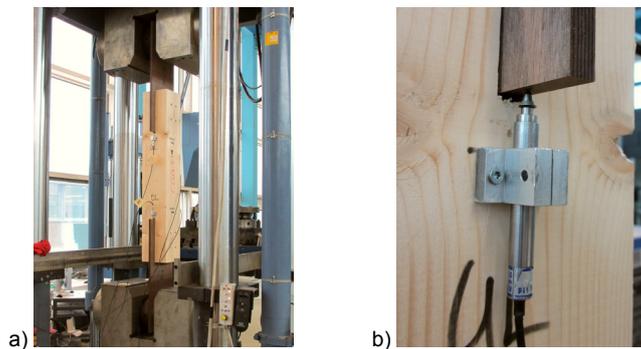


Figura 15. Ensaio de ligações madeira-madeira com placas de madeira densificada e cavilhas de FRP: a) sistema de ensaio; b) pormenor (LVDT).

Os resultados dos ensaios das ligações são apresentados na Tabela 3 e na Figura 16. As ligações com cavilhas de FRP atingiram resistências 20 a 25% inferiores às das ligações com cavilhas de aço, mas a sua ductilidade foi muito superior. Na Tabela 3 e na Figura 16 são também apresentados outros resultados de ensaios (D05.1 e D05.1.R) realizados pelos autores [18], que dizem respeito a ligações com uma geometria igual à das ligações CGG-2 e CGS-2 (Figura 14), mas com ligadores e chapas de aço em vez de placas de madeira densificada. As ligações D05.1.R tinham ainda sido reforçadas com parafusos autorroscantes [18].

Tabela 3. Resultados dos ensaios de ligações.

Tipologia	Ligadores		Resistência $R_{mean}$ [kN]	Rigidez (por plano de corte e ligador) $k_s$ [kN·mm <sup>-1</sup> ]	Ductilidade** $D$ [mm·mm <sup>-1</sup> ]
	N.º [#]	Tipo [FRP / Aço]			
CGG-1	1	FRP	18 (4%)	4.8 (57%)	15.5 (35%)
CGS-1	1	Aço S355	25 (3%)	8.2 (53%)	7.2 (19%)
CGG-2	4	FRP	66 (5%)	3.6 (14%)	14.8 (7%)
CGS-2	4	Aço S355	83 (5%)	5.1 (17%)	8.0 (20%)
D05.1***	4	Aço S235	103 (1%)	7.0 (15%)	8.3 (15%)
D05.1.R***	4	Aço S235	129 (4%)	7.3 (20%)	17.4 (36%)

\* Valores médios de três ensaios (coeficiente de variação apresentado entre parênteses).

\*\* Ductilidade  $D = d_y/d_u$  calculada segundo a norma EN 12512 [19].

\*\*\* Os ensaios D05.1 e D05.1.R dizem respeito a ligações com geometria igual às ligações CGG-2 e CGS-2, mas com chapas metálicas em vez de placas de madeira densificada e, no caso D05.1.R, reforçadas com parafusos autorroscantes [18].

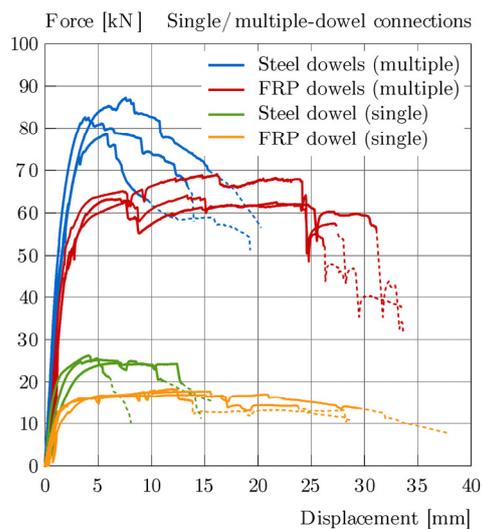


Figura 16. Resultados dos ensaios de ligações com placas de madeira densificada.

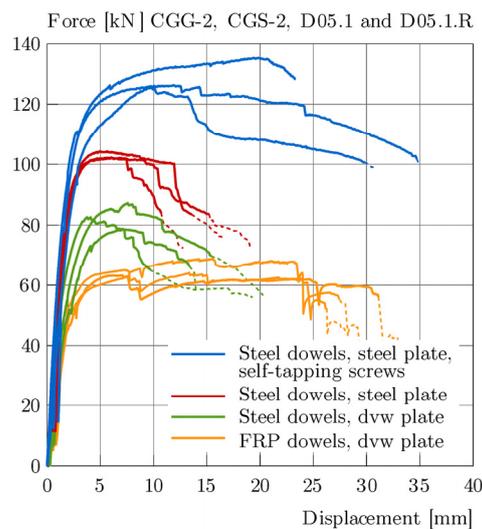


Figura 17. Resultados dos ensaios de ligações com quatro ligadores (placas de madeira densificada e chapas metálicas)

A rotura das ligações ocorreu devido à fendilhação longitudinal da madeira (Figura 18c), tanto para os ligadores de aço como para os ligadores de FRP. Contudo, como a rotura das cavilhas de FRP está limitada a uma zona mais próxima das placas de madeira densificada, ao contrário do que ocorre com as cavilhas de aço, a propagação das fendas até à face exterior dos elementos laterais de madeira e consequente rotura destes elementos ocorre para níveis de deformação muito maiores do que no caso de cavilhas de aço (Figuras 18a e 18b).

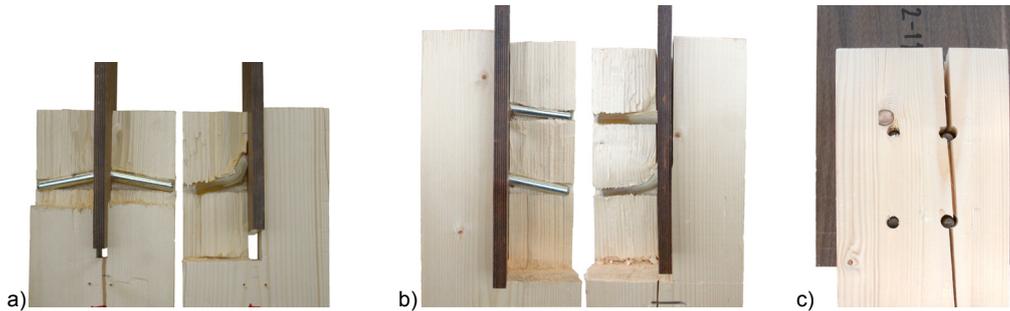


Figura 18. Ligações após rotura: a) ligações com apenas um ligador; b) ligações com quatro ligadores; c) rotura de ligação com ligadores de FRP

Relativamente aos efeitos de grupo, comparando a resistência de  $n = 1$  cavilha com a resistência de  $n = 2$  cavilhas alinhadas, o número efectivo de ligadores na direcção paralela às fibras obtido nos ensaios é  $n_{ef} = 1.86$  para as cavilhas de FRP e  $n_{ef} = 1.63$  para as de aço (de acordo com a EN 1995-1-1 [13], para cavilhas de aço e  $a_1 = 84$  mm, tem-se  $n_{ef} = 1.60$ ).

## 2.4 Exposição ao fogo

Foram realizados ensaios de exposição ao fogo (curva ISO 834) das ligações, no forno horizontal do *Laboratory for Fire Testing* dos *Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology* (Empa), em Dübendorf, na Suíça (Figura 19a). Durante estes ensaios não foi aplicada carga nas ligações, mas apenas medidas temperaturas ao longo da superfície das cavilhas, para se analisar a diferença entre as cavilhas de aço e as de FRP. Na zona exposta das cavilhas de FRP, onde a madeira carbonizou, a matriz polimérica decompôs-se totalmente, deixando de aglutinar as fibras.

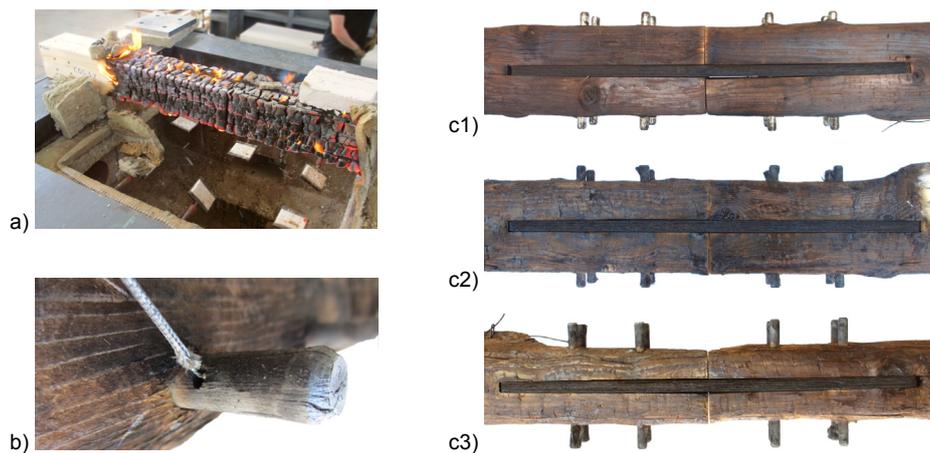


Figura 19. Ensaios de exposição ao fogo: a) ligação após um ensaio; b) pormenor de termopar; c1) cavilhas de aço (30 minutos de exposição fogo); c2) cavilhas de FRP (30 minutos de exposição fogo); c3) cavilhas de FRP (45 minutos de exposição fogo).

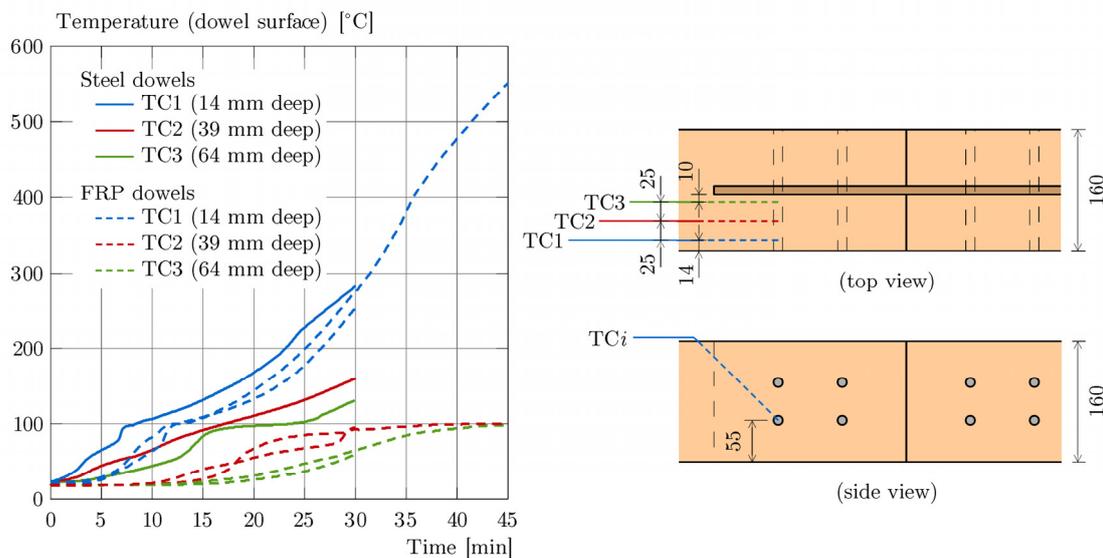


Figura 20. Temperaturas na superfície das cavilhas de aço e FRP durante os ensaios de exposição ao fogo.

Os resultados mostram que a condutividade das cavilhas de FRP é inferior à das cavilhas de aço, pois o aumento de temperatura à mesma profundidade é mais lento (Figura 20). Contudo, as cavilhas de FRP também perdem propriedades mecânicas a temperaturas mais baixas do que as de aço, pelo que ainda não é possível estimar a resistência ao fogo destas ligações.

### 3. MODELO DE CÁLCULO

O modelo de cálculo proposto tem por base as expressões da EN 1995-1-1, em particular as expressões correspondente aos modos de rotura I e III das ligações madeira-madeira (designados por modos (g), (h) e (k) na EN 1995-1-1) (Equações 2, 3 e 4, respectivamente). A resistência  $F_{v,R}$ , por ligador e por plano de corte, é dada por

$$F_{v,R,mode I} = f_{h,glulam} \cdot t_{glulam} \cdot d \quad (2)$$

$$F_{v,R,mode I} = 0.5 f_{h,DVW} \cdot t_{DVW} \cdot d \quad (3)$$

$$F_{v,R,mode III} = 1.15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,eff} \cdot f_{h,glulam} \cdot d} \quad , \quad \beta = \frac{f_{h,DVW}}{f_{h,glulam}} \quad (4)$$

em que  $M_{y,eff}$  é o momento efectivo de cedência plástica do ligador ( $M_{y,eff} = M_y$  no caso de ligadores de aço),  $f_{h,glulam}$  é a resistência ao esmagamento localizado dos elementos laterais de madeira lamelada colada,  $f_{h,DVW}$  é a resistência ao esmagamento localizado do elemento central de madeira densificada,  $t_{glulam}$  é a espessura dos elementos laterais de madeira lamelada colada,  $t_{DVW}$  é a espessura do elemento central de madeira densificada e  $d$  é o diâmetro do ligador.

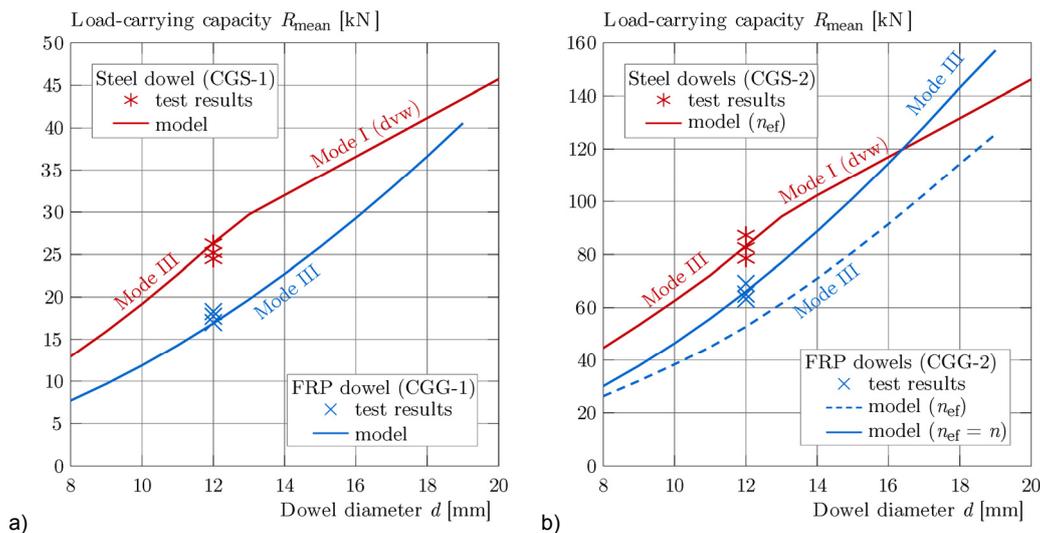


Figura 21. Comparação do modelo de cálculo proposto com os resultados experimentais: a) ligações com apenas uma cavilha; b) ligações com quatro cavilhas.

A aplicação deste modelo às ligações ensaiadas é apresentada na Tabela 4 e na Figura 21. O modelo apresenta bons resultados no caso das cavilhas de aço (CGS-1 e CGS-2), tal como seria expectável, uma vez que as expressões da EN1995-1-1 foram desenvolvidas para este caso, mas também para o caso das cavilhas de FRP (CGG-1 e CGG-2), em particular se não se considerar a redução relativa ao número efectivo de ligadores ( $n_{ef} = n$ ).

Tabela 4. Comparação do modelo de cálculo proposto com os resultados experimentais.

Tipologia	Ligadores		Resistência	
	N.º [#]	Tipo [FRP / Aço]	$R_{média,experimental}^*$ [kN]	$R_{média,estimada}^{**}$ [kN]
CGG-1	1	FRP	17.7	$n_{ef} = 1.0 \rightarrow 16.2$ (-8.6%)
CGG-2	4	FRP	65.8	$n_{ef} = 1.6 \rightarrow 51.8$ (-21.3%)
				$n_{ef} = 2.0 \rightarrow 64.9$ (-1.5%)
CGS-1	1	Aço S355	25.3	$n_{ef} = 1.0 \rightarrow 25.7$ (+1.4%)
CGS-2	4	Aço S355	82.8	$n_{ef} = 1.6 \rightarrow 83.2$ (-0.5%)

\* Valor médio dos resultados experimentais.

\*\* Valores de resistência estimados com base no valor médio das médias propriedades físicas e mecânicas das ligações ensaiadas.

\*\*\* Variação relativa da estimativa em relação ao valor experimental apresentada entre parênteses.

#### 4. CONCLUSÕES

O comportamento de ligações do tipo madeira-madeira com placas de madeira densificada e ligadores do tipo cavilha de FRP foi analisado experimentalmente e foi desenvolvido um modelo de cálculo, com base nas expressões da EN 1995-1-1.

Foram realizados ensaios de esmagamento localizado em placas de madeira densificada e ensaios de caracterização dos ligadores de FRP, bem como ensaios de ligações estruturais fabricadas com estes materiais. Os resultados mostram que as ligações têm um comportamento adequado à sua utilização estrutural, em termos de capacidade de carga e ductilidade.

O modelo de cálculo proposto apresenta resultados coerentes com os resultados experimentais, embora o reduzido número de configurações ensaiadas ainda não permita a sua utilização para outras configurações.

#### 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. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2004.
- [2] Gehri E. Fachwerkträger aus Buche und Fichte mit Stahlknotenplatten in eingeschlitzten Hölzern. Zurich: ETH Zurich; 1982.
- [3] Thomson A. The Structural Performance of Non-metallic Timber Connections. PhD. University of Bath, 2010.
- [4] Thomson A, Harris R, Ansell M, Walker P. Experimental performance of non-metallic mechanically fastened timber connections. *The Structural Engineer* 2010;88:8.
- [5] Thomson A, Harris R, Walker P, Ansell M. Development of non-metallic timber connections for contemporary applications. *Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering (WCTE2010)*, Trentino, Italy: 2010.
- [6] Steurer A. *Developments in timber engineering: the Swiss contribution*. Basel: Birkhäuser; 2006.
- [7] Brandon D, Ansell MP, Harris R, Walker P, Bregulla J. Modelling of non-metallic timber connections at elevated temperatures. *Materials and Joints in Timber Structures – Recent developments of technology*, Stuttgart, Germany: Springer Netherlands; 2013, p. 231–41.

- [8] Johansen KW. Theory of timber connections. IABSE Publications 1949;9:249–62. doi:<http://dx.doi.org/10.5169/seals-9703>.
- [9] Kobel P, Steiger R, Frangi A. Experimental analysis on the structural behaviour of connections with LVL made of beech wood. Materials and Joints in Timber Structures – Recent developments of technology, Stuttgart, Germany: Springer; 2013. doi:10.1007/978-94-007-7811-5\_16.
- [10] Leijten A. Physical and mechanical properties of densified veneer wood (dvw) for structural applications – Final Report. Delft, Netherlands: Delft University of Technology (TU Delft); 1994.
- [11] Rod P, Leijten A, Cruz H, Werner H. Some structural properties of densified veneer wood. Proceedings of the International Wood Engineering Conference, New Orleans, U.S.A.: Omnipress; 1996, p. 7.
- [12] Leijten AJ. Densified veneer wood reinforced timber joints with expanded tube fasteners – The development of a new timber joint. PhD Thesis. Delft University of Technology (TU Delft), 1998.
- [13] EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2004.
- [14] EN 383:2007. Timber Structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. Brussels: CEN; 2007.
- [15] Bai J, editor. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. 2013.
- [16] ASTM D4475 – 02. Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method. ASTM International; 2008.
- [17] EN 26891:1991. Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 1991.
- [18] Palma P, Frangi A, Hugi E, Cachim P, Cruz H. Fire resistance tests on steel-to-timber dowelled connections reinforced with self-drilling screws. Proceedings of the 2nd Ibero-Latin-American Congress on Fire Safety – 2nd CILASCI, Coimbra, Portugal: 2013.
- [19] EN 12512:2001+A1:2005. Timber structures – Test methods – Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2005.