

# Reforço de ligações tradicionais de madeira

## Reinforcement of carpentry joints

Sara Barbosa  
Jorge M. Branco  
Filipe Ferreira

### Resumo

Às ligações tradicionais está associado um conjunto de patologias fruto das variações dimensionais, degradação prematura do material, erros de projeto ou de execução. Durante muitos anos, devido à falta de conhecimento e dificuldade em compreender o comportamento das ligações existentes nas estruturas de madeira, realizaram-se intervenções excessivamente conservadoras, muitas das quais aumentavam substancialmente a rigidez das ligações, ou, em casos mais extremos, optava-se pela remoção parcial ou completa da estrutura. Surge assim a necessidade de desenvolver um processo criterioso que permita avaliar e compreender o tipo de patologia e intervir sobre os elementos, reparando ou reforçando a ligação, de modo a restituir os níveis de segurança e a preservar o valor histórico e cultural da estrutura.

Nesse sentido, o presente trabalho pretende colmatar a falta de informação disponível no que se refere à análise, dimensionamento e reforço de ligações tradicionais de madeira. Apresentam-se aqui a definição da geometria e modelos de dimensionamento destas ligações e do seu reforço.

### Abstract

To the traditional joints is associated a set of pathologies outcome of dimensional variations or premature degradation, design errors or of execution. For many years, because of the lack of knowledge and difficulty in understanding the behavior of bonds existing in the wooden structures, were performed interventions excessively conservative, many of which substantially increased the stiffness of the bonds, or in extreme cases they opted for partial or complete removal of the structure. Thus arise the necessity of developing a judicious process that allows to evaluate and understand the kind of pathology and intervene on the elements by repairing or reinforcing the joints, so as to restore the levels of safety guards and to preserve the historical and cultural value of the structure.

Therefore this study aims to fill the lack of information available in relation to the analysis, sizing and strengthening joints of traditional wood. Here are presented the definition of the geometry and design models of these joints and their reinforcement.

**Palavras-chave:** Ligações tradicionais de madeira / Geometria / Dimensionamento /  
/ Reparação / Reforço

**Keywords:** Carpentry joints / Geometry / Design / Strengthening

## Sara Barbosa

Aluna do Mestrado Integrado em Engenharia Civil  
Universidade do Minho  
Guimarães, Portugal  
sara\_isabel\_barbosa@hotmail.com

## Jorge M. Branco

Professor Auxiliar  
Universidade do Minho, ISISE, Departamento de Eng. Civil  
Guimarães, Portugal  
jbranco@civil.uminho.pt

## Filipe Ferreira

Mestre em Engenharia Civil  
AOF – Augusto de Oliveira Ferreira & Ca Lda.  
Braga, Portugal  
filipeferreira@aof.pt

## Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

## Legal notice

*The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.*

BARBOSA, S. [et al.] – Reforço de ligações tradicionais de madeira. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 3. ISSN 2183-8488. (março 2017) 21-34.

## 1 Introdução

Os principais problemas de insegurança em estruturas de madeira surgem nas ligações entre os seus elementos [1]. As ligações entre os vários elementos são pontos sensíveis na conceção e no cálculo das estruturas de madeira, em resultado da concentração de tensões que nelas se pode verificar, e com diferentes direções relativamente às fibras, o que num material anisotrópico como a madeira acrescenta complexidade no seu desempenho e correspondente análise.

Ao longo dos tempos foram desenvolvidas diversas técnicas de ligações de estruturas de madeira. Contudo, as mais antigas e também as mais presentes em toda a evolução da construção em madeira são as ligações madeira-madeira, nomeadamente as agora designadas por ligações tradicionais de madeira. Estas ligações foram realizadas com base em conhecimentos empíricos, sem o apoio de conhecimentos experimentais e analíticos suficientes. Assim, em qualquer uma destas estruturas de madeira, as ligações não podem garantir os níveis de segurança atualmente impostos, em particular para a ação sísmica [2].

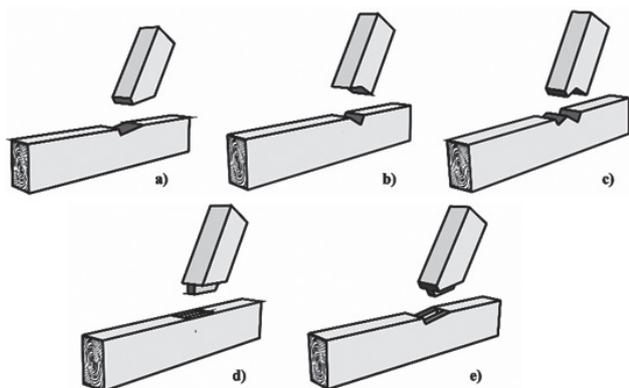
Existem diferentes tipologias de ligações tradicionais, que foram evoluindo com a complexidade das estruturas, as quais, de uma forma geral, se podem enquadrar em quatro grupos: entalhes, empalmes, cruzamentos e acoplamentos.

As ligações por entalhes, às quais está associada a formação de um sulco em forma de “V” nas superfícies dos elementos a ligar, incluem o dente simples, podendo possuir respiga e mecha, o dente simples posterior e o dente duplo (Figura 1). O dente simples é a ligação por entalhe mais comum, no entanto, quando o comprimento do talão é insuficiente recorre-se ao dente simples posterior. O dente duplo é constituído por um dente simples e um dente simples posterior, aumentando a superfície de contacto no entalhe, o que permite que o nível das tensões de compressão atuantes seja menor e assim aumentar a capacidade de carga desta ligação comparativamente às ligações com um dente. Ao nível das superfícies dos entalhes, devido à redução efetiva da secção dos elementos na zona do entalhe, geram-se concentrações de tensões que são transmitidas por compressão e/ou atrito na interface dos elementos ligados. Sendo que o estado de tensão que se gera nas superfícies de contacto garante a integridade da ligação e impede que os elementos se separem, pelo que é importante garantir que não há descompressão da ligação. A respiga e a mecha representam uma secção de extremidade de menor dimensão, que quando presentes nas ligações garantem um melhor encaixe entre os elementos ligados e evitam deslocamentos para fora do plano da ligação (Figura 1 d) e e)).

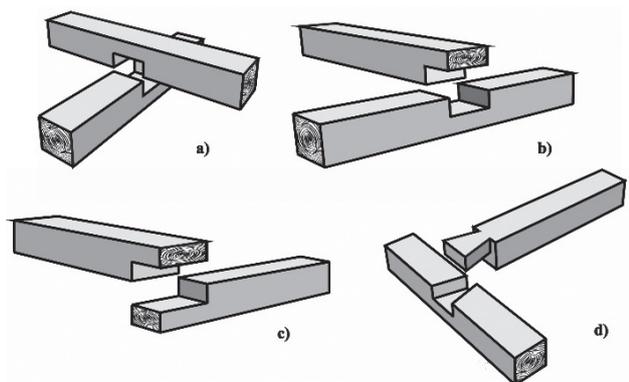
Os cruzamentos correspondem à união de dois elementos de madeira através do seu corte, garantindo que a espessura da ligação seja a mesma que a do membro com menor espessura, e sobreposição perpendicular ou oblíqua (Figura 2). Tendo em conta a forma e a localização do entalhe nos elementos a ligar, existem diferentes tipos de cruzamentos. Por vezes, é comum, usar-se pinos de madeira ou ligadores metálicos para garantir a estabilidade da ligação.

Os empalmes garantem a continuidade longitudinal dos elementos através da união, topo a topo, de dois elementos de madeira (Figura 3). Existe uma diversidade de empalmes, os quais resultaram

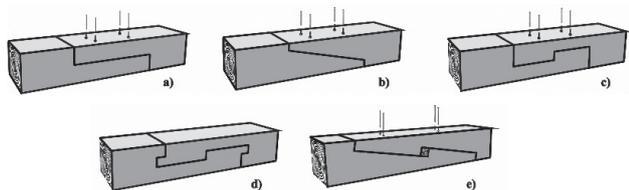
da tentativa de melhorar o comportamento dos empalmes existentes, e variam consoante a forma e inclinação do entalhe. Este tipo de ligações serve essencialmente para receber esforços de tração.



**Figura 1** Ligações por entalhes: a) dente simples; b) dente simples posterior; c) dente duplo; d) ligação com respiga e mecha; e) dente simples com respiga e mecha



**Figura 2** Cruzamentos: a) cruz a meio fio; b) meio fio de encontro; c) meio fio de ponta; d) cauda de andorinha



**Figura 3** Empalmes: a) união a meio fio; b) entalhe com ângulo; c) união a meio fio com entalhe; d) entalhe a meia madeira com entalhe; e) entalhe com ângulo e batente a meia esquadria

Por fim, os acoplamentos resultam da sobreposição de dois ou mais elementos de madeira, permitindo aumentar a secção transversal do elemento de madeira (ver Figura 4).

A maioria das ligações resulta da redução da secção dos elementos a ligar, à qual está associada uma perda da capacidade resistente dos

elementos, pelo que é necessário fazer um correto dimensionamento e garantir os níveis de segurança, tendo em conta as solicitações que contribuem para a resistência da ligação.



**Figura 4** Exemplos de acoplamentos

A falta de rigor na execução das ligações, o elevado grau de improvisado, os erros de conceção e dimensionamento e as inúmeras intervenções pontuais sem consideração do real comportamento da ligação podem, ao longo do tempo, reduzir substancialmente o seu nível de segurança. De forma a garantir a estabilidade da ligação a longo prazo e a suprimir os erros de execução, é habitual reforçar a ligação. Tradicionalmente, o reforço das ligações é realizado através da adição de elementos metálicos (estribos, esquadros, varões, parafusos, etc.) ou de madeira, cuja função é garantir a funcionalidade da ligação sob condições invulgares (ações cíclicas, vento, neve), prevenir a degradação da resistência da ligação e evitar a perda de contacto entre os elementos ligados. Contudo, existem técnicas mais inovadoras que envolvem a aplicação de materiais compósitos, em particular os polímeros reforçados com fibras de carbono ou vidro.

## 2 Geometria e dimensionamento das ligações tradicionais de madeira

O facto de a execução das ligações resultar de um trabalho de carpintaria, ao qual muitas vezes estão associados erros de corte, problemas de montagem ou retração da madeira, leva a que se gerem folgas, com diminuição das áreas de contacto, resultando em concentração de tensões.

Portanto, a correta definição da geometria das ligações é crucial, dado que tem influência sobre o mecanismo de distribuição das forças e o comportamento global da ligação. De seguida reportam-se as principais prescrições geométricas disponíveis na bibliografia europeia e os modelos sugeridos para o seu cálculo [3] [4] [5].

### 2.1 Entalhes

#### 2.1.1 Geometria

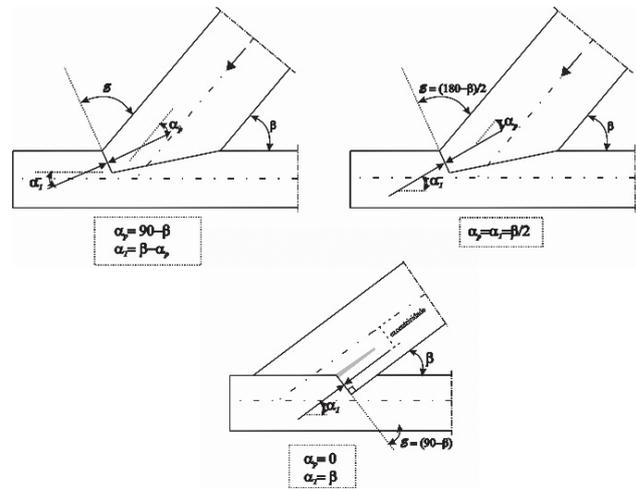
A inclinação do entalhe ( $\epsilon$ ) (ver Figura 6) deve minimizar o ângulo entre as tensões de compressão transmitidas no entalhe e a direcção das fibras da madeira em ambos os elementos que formam a ligação, de forma a aumentar a resistência e a rigidez de esmagamento da ligação [6]. Na Tabela I apresentam-se as principais recomendações europeias para a inclinação do entalhe, ( $\epsilon$ ), em função do ângulo de abertura entre os elementos ligados,  $\beta$ .

Na ligação com dente simples, o ângulo do entalhe  $\epsilon$  é definido a partir de  $\beta$  (ângulo de abertura entre os elementos ligados), e toma o valor de  $(90^\circ - \beta/2)$  quando a perna e a linha são constituídas

pelo mesmo material, o que garante que os ângulos entre as fibras e as tensões de compressão são iguais em ambos os elementos ( $\alpha_L = \alpha_P = \beta/2$ ) (Figura 5). Caso sejam constituídas por diferentes materiais, a solução ideal será adotar ângulos diferentes ( $\alpha_L \neq \alpha_P$ ) de forma a otimizar a transmissão das tensões de compressão. No caso da ligação com dente simples posterior, o ângulo do entalhe  $\varepsilon$  é geralmente  $90^\circ$ , o que significa que o entalhe é perpendicular ao eixo da perna (ver Figura 5). Deste modo, verifica-se uma perda de resistência e rigidez da linha em relação à perna, dado que o ângulo entre as fibras e a força de compressão axial é maior na linha.

**Tabela I** Recomendações para a inclinação do entalhe presentes em documentos de distintas nacionalidades

	Suíça [7]	Espanha [8]	Holanda [9]
Inclinação do entalhe ( $\varepsilon$ )	Dente simples	$90^\circ - \frac{1}{2} \beta$	$90^\circ - \frac{1}{2} \beta \leq \varepsilon \leq 90^\circ$
	Dente simples posterior		$90^\circ \leq \varepsilon \leq 110^\circ$
	Dente duplo	$\beta \leq 40^\circ$	$\beta \leq 50^\circ$



**Figura 5** Ângulo definido entre as fibras e a força de compressão axial

A fim de evitar o enfraquecimento da capacidade resistente do elemento que recebe o entalhe, é necessário estabelecer um limite para a sua profundidade  $t_v$  (ver Figura 6), que é normalmente dado em função do ângulo  $\beta$  (ver Tabela II).

**Tabela II** Recomendações para a profundidade do entalhe estabelecidas em distintos países

	Espanha [8]	Suíça [7]	Itália [10]	Alemanha [11]	Holanda [9]
Profundidade do entalhe ( $t_v$ )		Dente simples			
		$t_v \leq \frac{h_2}{4}$ para $\beta \leq 50^\circ$ $t_v < \frac{h_2}{6}$ para $\beta > 60^\circ$ interpolação linear para $50^\circ < \beta \leq 60^\circ$			$t_v \leq \frac{h_2}{4}$ para $\beta \leq 50^\circ$ $t_v < \frac{h_2}{5}$ para $\beta > 50^\circ$
		Dente duplo			
		$t_{v1} \leq \begin{cases} \frac{h_2}{6} \\ t_{v2} - 10 \text{ mm} \end{cases}$ $t_{v2} \leq \frac{h_2}{4}$	$t_{v1} \leq \begin{cases} \frac{h_2}{6} \\ t_{v2} - 10 \text{ mm} \\ 0,8t_{v2} \end{cases}$ $t_{v2} \leq \frac{h_2}{4}$		

O talão corresponde ao troço da linha entre o topo da peça e o entalhe e nele se desenvolvem tensões de corte paralelas às fibras (Tabela III). Daí que o seu comprimento deve garantir a segurança frente a estas tensões de corte.

Tabela III Definição do comprimento do talão

	Espanha [8]	Suíça [7]	Holanda [9]	Alemanha [11]
Comprimento do talão ( $l_v$ )				
Dente simples	$l_v \geq 150 \text{ mm}$		$l_v \leq 8.t_v$	$200 \leq l_v \leq 8.t_v$
Dente duplo		$l_{v1} \geq 150 \text{ mm}$	$l_{v1} \geq 6.t_{v1}$	

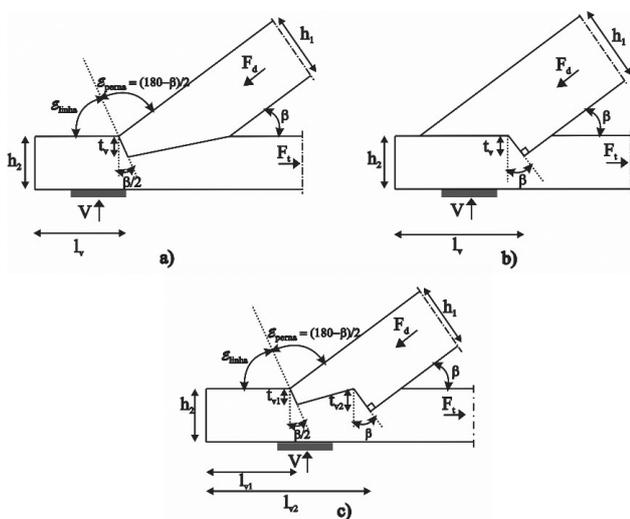


Figura 6 Ligações por entalhe: a) dente simples; b) dente simples posterior; c) dente duplo

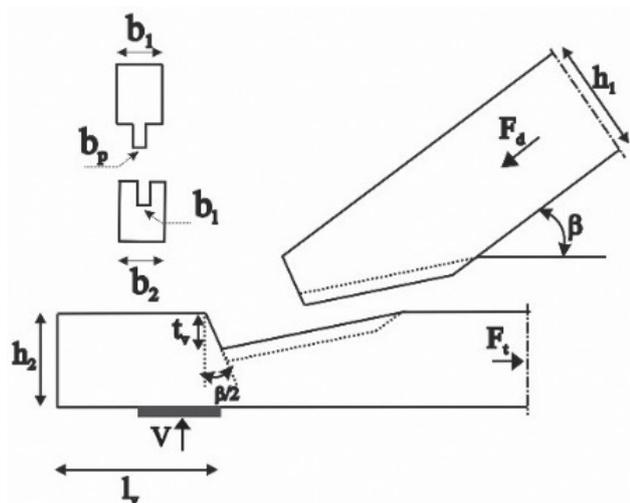


Figura 7 Dente simples com respiga e mecha

A respiga, encaixe de forma prismática, geralmente possui uma largura  $b_p$  igual a cerca de 1/3 da espessura do elemento de madeira (Figura 7) [12]. Para garantir o bom funcionamento do encaixe, a mecha deve ter uma largura igual à da respiga.

### 2.1.2 Verificações de segurança

Numa ligação por entalhe, os elementos de madeira quando submetidos a uma força  $F_d$  originam tensões que podem ocorrer na direção das fibras, na direção perpendicular às fibras, com um ângulo  $\alpha$  em relação à direção das fibras e também tensões de corte. Assim sendo, na verificação da segurança destas ligações é necessário definir os caminhos de transmissão das forças atuantes e verificar a resistência do entalhe às tensões de compressão e às tensões de corte sobre o talão.

No corpo principal do Eurocódigo 5 [13] não são abordadas regras para a verificação da segurança das ligações por entalhe. Há contudo diferentes documentos nacionais que apresentam métodos de cálculo que se distinguem entre si sobretudo na decomposição das forças pelas superfícies de contacto e ainda no facto de alguns considerarem a existência de forças de atrito. Nesse sentido, será apresentada a abordagem mais simples e direta que diz respeito ao Anexo Nacional Holandês do Eurocódigo 5 [14], que assume que a força de compressão é igualmente distribuída entre a projeção horizontal e vertical das superfícies de contacto (Tabela IV). Além disso, assume uma redução de 20% no valor de cálculo da tensão tangencial resistente, dado que a distribuição da tensão ao longo do talão não é uniforme (ver Figura 8).

Tabela IV Equações de dimensionamento do dente simples e duplo, segundo o Anexo Nacional Holandês do EC5 [14]

	Dente simples	Dente duplo
Verificação à compressão do dente (entalhe)	$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot t_v} \leq f_{c,0,d} \quad (1)$	$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot t_{v2}} \leq f_{c,0,d} \quad (2)$
Verificação à compressão da superfície da linha	$\frac{F_d \cdot \sin \beta}{b \cdot e} \leq f_{c,90,d} \quad (3)$	
Verificação ao corte do talão	$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_v} \leq 0,8 f_{v,d} \quad (4)$	$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_{v2}} \leq 0,8 f_{v,d} \quad (5)$

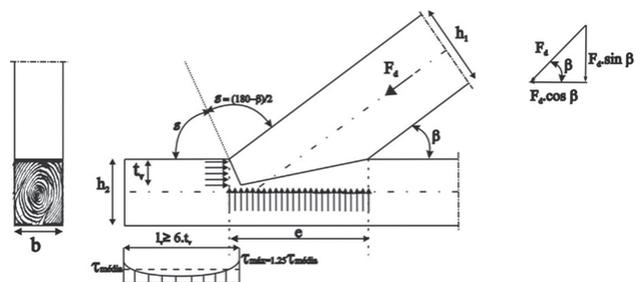


Figura 8 Esquema de distribuição das forças, segundo o Anexo Nacional Holandês do EC5 [14]

Onde  $F_d$  é a força axial,  $\beta$  é o ângulo formado entre os elementos que constituem a ligação,  $b$  é a largura do elemento de madeira,  $t_{v2}$  é a profundidade do entalhe posterior,  $e$  é a distância da superfície de corte,  $l_{v2}$  é o comprimento da superfície de corte do entalhe posterior,  $f_{c,0,d}$  é o valor de cálculo da resistência à compressão na direção paralela à direção das fibras ( $\alpha=0$ ),  $f_{c,90,d}$  é o valor de cálculo da resistência à compressão na direção perpendicular à direção das fibras ( $\alpha=90$ ) e  $f_{v,d}$  é o valor de cálculo da tensão tangencial resistente.

## 2.2 Cruzamentos

### 2.2.1 Geometria

Nos cruzamentos, o material é removido de cada um dos elementos da ligação, de modo a garantir que a espessura da ligação seja a mesma que a do membro com menor espessura. Normalmente, as peças têm a mesma espessura e na área da união é removida metade da espessura de cada uma das peças. No entanto, para evitar a diminuição da capacidade de carga devida ao enfraquecimento para metade dos elementos de madeira, pode-se adotar uma espessura igual a 1/3 da altura do elemento de madeira de menor espessura.

A ligação cauda de andorinha é normalmente usada para reforçar a resistência à tração da ligação ou à inversão de esforços, face ao bloqueio criado pela forma trapezoidal do elemento que é definida por um chanfro cuja dimensão é geralmente 1/6-1/3 da altura do elemento de madeira.

### 2.2.2 Verificações de segurança

Nas ligações a meio fio solicitadas à compressão, quando as superfícies dos elementos de madeira que constituem a ligação

estão em perfeito contacto, é mobilizada a capacidade resistente do ligador e a capacidade resistente da madeira à compressão na direção perpendicular às fibras (Figura 9).

$$\frac{F_d - R_{v,d}}{b_1 \cdot e_2} \leq f_{c,90,d} \quad (6)$$

onde  $F_d$  é a força de compressão,  $b_1$  é a largura do elemento de madeira 1,  $e_2$  é a espessura do entalhe do elemento de madeira 2 e  $R_{v,d}$  é o valor de cálculo da capacidade resistente por plano de corte e por ligador (EC5: 8.2.3(3)) [13].

Quando as superfícies dos elementos de madeira que constituem a ligação não estão em perfeito contacto ou se a ligação é solicitada à tração, apenas é mobilizada a capacidade resistente do ligador para resistir ao esforço atuante ( $F_d$ ).

$$F_d \leq R_{v,d} \quad (7)$$

No caso de aplicação de um esforço transversal ( $V_{sd}$ ), materializado pela aplicação de um esforço perpendicular ao entalhe, é necessário avaliar as tensões de tração perpendiculares às fibras que surgem no canto do entalhe:

$$F_{t,90,d} = 1,3 V_{sd} \times [3 \times (1 - \alpha)^2 - 2(1 - \alpha)^3] \quad (8)$$

onde  $\alpha = e_1 / e_2$ .

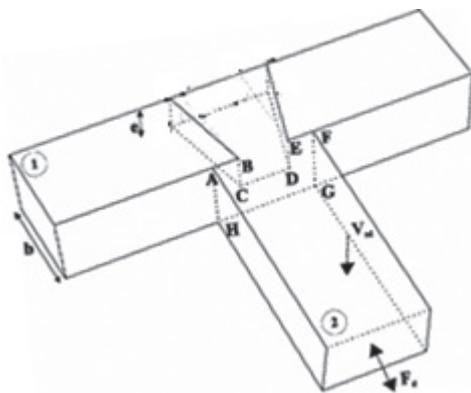
Na ligação com cauda de andorinha, a verificação da segurança depende da forma como a ligação é solicitada, isto é, se está sujeita a esforços de compressão, de tração ou corte (Tabela V).

Onde  $e$  é a espessura do entalhe e  $f_{t,0,d}$  é o valor de cálculo da resistência à tração segundo a direção paralela à direção das fibras.

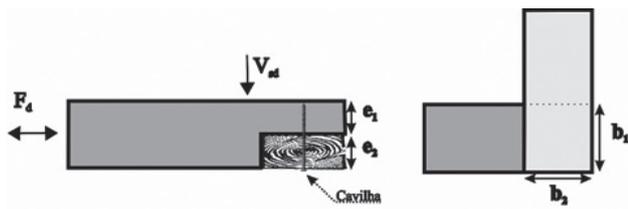
É importante referir que o cruzamento que oferece maior resistência aos esforços de tração é a cauda de andorinha.

**Tabela V** Definição das condições de segurança tendo em conta o modo como a ligação é solicitada [5]

Ligação solicitada à:		Verificações de segurança	
Compressão		$\frac{F_d}{A_{AFGH} - A_{BCDE}} \leq f_{c,90,d}$	(9)
	1) Corte	$\frac{F_d}{2(b \times e)} \leq f_{v,d}$	(10)
Tração	2) Tração paralela às fibras	$\frac{F_d}{A_{BCDE}} \leq f_{t,0,d}$	(11)
	2) Tração perpendicular às fibras	$\frac{F_d}{e^2} \leq f_{t,90,d}$	(12)
Corte		$\frac{3}{2} \frac{V_{sd}}{A_{BCDE}} \leq f_{v,d}$	(13)



**Figura 10** Ligação cauda de andorinha

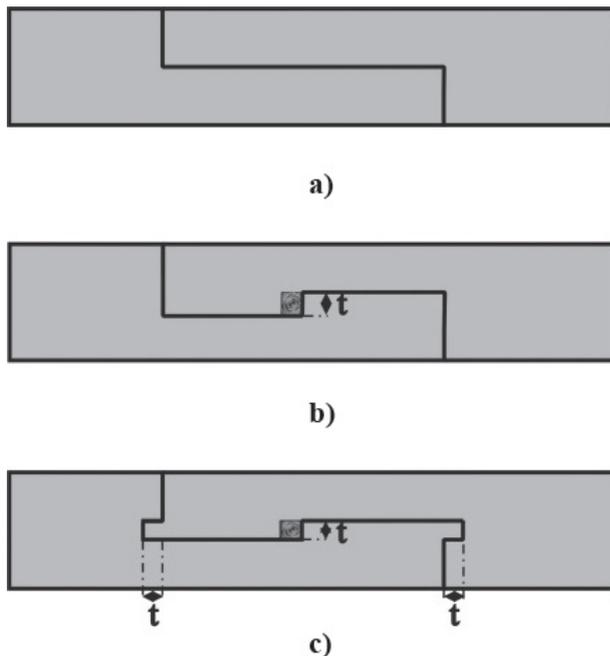


**Figura 9** Ligação meio fio de ponta solicitada à compressão, à tração ou a esforço de corte ( $V_{sd}$ )

## 2.3 Empalmes

### 2.3.1 Geometria

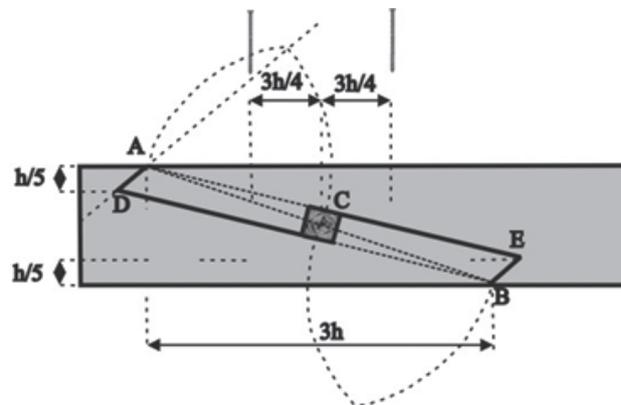
Os empalmes resultam da união, topo a topo, de dois elementos de madeira, de modo a aumentar o comprimento longitudinal do elemento. Na tentativa de aumentar a rigidez da ligação, foi ao longo dos tempos sugerido um rebaixo, em forma de dente, na superfície do entalhe, dando origem à união a meio fio com entalhe. Por sua vez, da necessidade de neutralizar os efeitos de flexão provocados pela excentricidade em relação às forças transmitidas, surge o entalhe a meia madeira, que resulta da execução na extremidade dos elementos de entalhe, cuja dimensão é igual à do rebaixo (Figura 11).



**Figura 11** Empalmes: a) União a meio fio; b) União a meio fio com entalhe; c) Entalhe a meia madeira

O entalhe com ângulo e batente a meia esquadria surge da necessidade de melhorar o comportamento da ligação ao corte, dado que menos material é removido e o entalhe deixa de formar um ângulo reto [6]. O batente, quando presente, permite aumentar o contacto e facilitar a conceção da ligação. A geometria do entalhe oblíquo é definido por (ver Figura 12) [15]:

- 1) O ponto A e B definem as extremidades do entalhe e correspondem a três vezes a altura do elemento de madeira.
- 2) O ponto C define o eixo central do entalhe e corresponde ao ponto central da linha média que une os pontos A e B.
- 3) A partir dos pontos A e C traçam-se arcos de raio igual à distância, de modo a obter um triângulo equilátero.
- 4) O segmento AD corresponde à extensão de um dos lados do triângulo e termina com a interseção com a reta traçada a  $1/5$  da altura do elemento.
- 5) No ponto B e C repete-se o mesmo procedimento e define-se o segmento BE.
- 6) As linhas de corte definem-se unindo os pontos A-E e D-B.



**Figura 12** Definição da geometria do entalhe com ângulo e batente a meia esquadria

### 2.3.2 Verificações de segurança

Atendendo à forma e inclinação do entalhe, as verificações de segurança diferem entre si (Tabela VI).

No plano da superfície ( $b \times l$ ) da união a meio fio com entalhe há transmissão de tensões tangenciais de corte devido às forças de tração. Segundo Aira *et al.* (2015) [13], as tensões de corte apresentam uma distribuição não linear, pelo que é necessário considerar um fator de redução da resistência ao corte para que se possa admitir uma distribuição uniforme da tensão. Sugere-se a consulta de bibliografia mais especializada, como é exemplo [3] e [16], para uma melhor compreensão do efeito da distribuição não linear das tensões de corte.

**Tabela VI** Definição das condições de segurança tendo em conta o tipo de ligação e o modo como é solicitada

União a meio fio	
	<p><b>Solicitada à compressão</b></p> <p>1) Compressão na superfície de contacto <math>\frac{F_d}{b \cdot (e_1 + e_2)} \leq f_{c,0,d}</math> (14)</p>
	<p><b>Solicitada à tração</b></p> $F_d \leq R_{v,d} \times n_{ef} \quad (15)$ <hr/> <p><b>Solicitada ao corte</b></p> $\frac{3}{2} \frac{V_{sd}}{e_2 \cdot b} \leq f_{v,d} \quad (16)$
União a meio fio com entalhe	
	<p>1) Compressão na superfície de contacto <math>\frac{F_d}{b \cdot t} \leq f_{c,90,d}</math> (17)</p> <hr/> <p>2) Corte <math>\frac{F_d}{0,4 \cdot b \cdot l} \leq f_{v,d}</math> (18)</p>
Entalhe com ângulo e batente a meia esquadria	
	<p>1) Compressão na superfície do batente <math>\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot t} \leq f_{c,\beta,d}</math> (19)</p> <hr/> <p>2) Corte <math>\frac{F_d}{b \cdot l} \leq f_{v,d}</math> (20)</p>

### 3 Soluções de reforço e dimensionamento

O reforço das ligações tradicionais tem como objetivo resolver deficiências da estrutura original, aumentando a capacidade de carga da estrutura (por diferente uso) e limitando/diminuindo as deformações da mesma [17].

O reforço das ligações pode ser feito de diferentes formas, sendo que a cada solução está associado um comportamento característico em termos de capacidade de carga, rigidez e ductilidade. Em termos gerais, a excessiva rigidificação de uma ligação tradicional deve ser evitada, dado que pode conduzir a uma redistribuição de esforços diferente da original e assim alterar a resposta global da estrutura [18]. No caso de o reforço impedir os livres movimentos higrométricos da madeira, pode levar a que ocorra uma rotura frágil da estrutura pelos elementos ligados, especialmente se induzir tensões na direção perpendicular às fibras, uma vez que o comportamento da madeira a este tipo de sollicitação é frágil. Por exemplo, na ligação com dentes simples a excessiva rigidificação impede que a ligação desenvolva o comportamento semirrígido sob influência de ações assimétricas (neve, vento, sismo) e leva a que ao nível da linha possa ocorrer rotura.

#### 3.1 Entalhes

Nas ligações tradicionais com entalhe, como as forças são transmitidas por contacto direto e atrito, a existência de folgas nas superfícies em contacto do entalhe, por falta de precisão na execução do entalhe ou por retração da madeira, condiciona o funcionamento da ligação devido à redução da sua rigidez e

resistência. As folgas podem ser corrigidas através de cunhas de madeira, que devem estar devidamente ligadas (pregos, parafusos) aos elementos que compõem a ligação, de modo a garantir um perfeito contacto entre os elementos. Além disso, é recomendável que as cunhas de madeira sejam da mesma espécie, para terem o mesmo comportamento diferido (ao longo do tempo), e com um teor de água o mais próximo possível dos elementos a reforçar, para evitar futuros ajustes dimensionais [6].

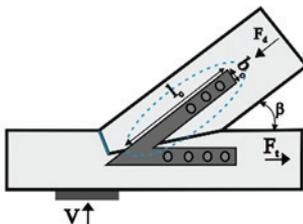
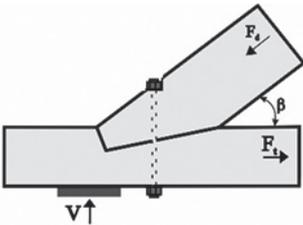
A consolidação do talão por meio de pregos ou parafusos auto-perfurantes (Figura 17a)), dispostos perpendicularmente em relação ao plano de corte, é uma outra medida de reforço das ligações com entalhes, sendo que o objetivo é evitar a rotura por corte do talão. Deste modo, o esforço cortante ( $F_d \cdot \cos \beta$ ) que atinge o talão mobiliza a resistência ao corte da madeira e dos parafusos [6].

$$n_{ef} \cdot R_{v,d} + F_{v,d} \geq F_d \cdot \cos \beta \quad (21)$$

É comum o uso desta técnica de reforço quando existe a necessidade de aumentar a capacidade de carga das asnas, o que implica diretamente o aumento da capacidade de carga da ligação linha-perna, dado que é a ligação sujeita a maior concentração de esforços. Assim sendo, atendendo à impossibilidade de muitas das vezes não ser possível aumentar o comprimento do talão, recorre-se a este tipo de reforço.

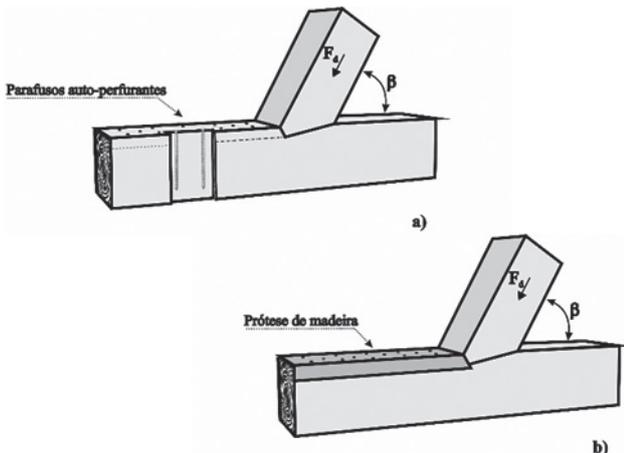
Muitas vezes, devido à deterioração do talão, é necessário recorrer a próteses de madeira (Figura 17b)), para substituir o material degradado, fixas com elementos metálicos. No caso de se utilizarem parafusos auto-perfurantes, para obter uma maior capacidade de carga da prótese estes devem estar inclinados [6].

Tabela VII Definição das condições de segurança tendo em conta o elemento de reforço

Elemento de reforço	Verificação de segurança
<p>Esquadros</p> 	<p>1) Resistência dos parafusos e da madeira <math>\frac{F_d - n_{ef} \cdot R_{v,d}}{b \cdot t_v} \geq f_{c,u,d} \quad (24)</math></p>
	<p>2) Resistência da chapa <math>\frac{F_d}{2 \cdot b_c \cdot e_c} \leq f_y \quad (25)</math></p>
<p>Varão</p> 	<p>1) Resistência ao corte ao varão <math>R_{v,d} \geq F_d \quad (26)</math></p>

Onde  $e_c$  é a espessura da chapa.

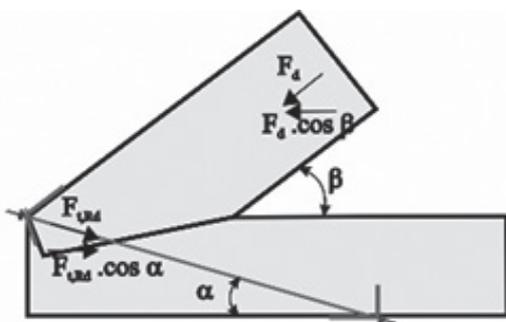
$$n_{ef} \cdot R_{v,d} \geq F_d \cdot \cos \beta \quad (22)$$



**Figura 17** Reforço de ligações com entalhe: a) parafusos auto-perfurantes; b) prótese de madeira aparafusada

Uma outra possibilidade de reforço que permite contornar os problemas relacionados com a deterioração da linha, erros de conceção ou aumento da capacidade de carga da ligação é o uso de uma braçadeira (Figura 18). A colocação deste elemento metálico tem como objetivo acomodar os esforços e garantir a estabilidade da ligação. Esta solução permite que a intervenção se estenda a um mínimo absoluto e é uma boa alternativa nas situações em que não há possibilidade de aumentar o comprimento do talão através de empalmes de madeira.

$$F_{t,Rd} \cdot \cos \alpha \geq F_d \cdot \cos \beta \quad (23)$$



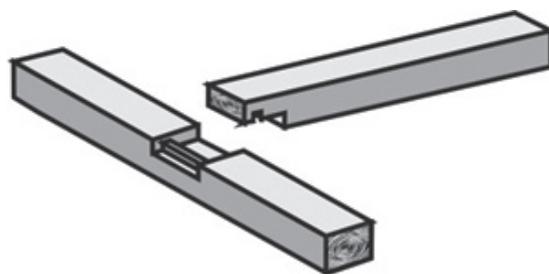
**Figura 18** Reforço de ligações com entalhes com braçadeira

A fim de manter a funcionalidade e estabilidade da ligação sob condições adversas (problemas de conceção, descarregamento da ligação, ações cíclicas), para as quais a ligação não foi originalmente concebida, é necessário recorrer ao reforço da ligação. A solução de reforço mais comum passa pelo recurso a elementos metálicos que impeçam os deslocamentos relativos entre os elementos, nomeadamente esquadros, varões e braçadeira (Tabela VII).

### 3.2 Cruzamentos

Os cruzamentos resultam do enfraquecimento de ambos os elementos que constituem a ligação, pelo que se deve garantir o perfeito encaixe dos elementos. Contudo, devido a fenómenos de retração ou falta de precisão, as superfícies deixam de estar em contacto e é necessário proceder ao seu reforço. Uma técnica tradicional de reforço é a colocação de cunhas de madeira, a fim de restabelecer a capacidade de carga da ligação para a qual foi concebida.

Para ajustar e aumentar a rigidez da ligação é possível executar na superfície do entalhe um (ou dois) dente (ver Figura 19). Contudo, deve-se ter em atenção que ao diminuir a superfície do entalhe diminui também a capacidade de carga.



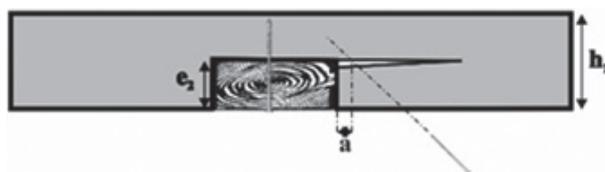
**Figura 19** Adição de um dente na superfície de entalhe da ligação a meio fio de ponta

Os pinos de madeira ou ligadores metálicos, quando adicionados às ligações, permitem não só a transferência das forças de tração e corte, como também garantem que os elementos estejam na sua posição (Figura 20). Além disso, também aumentam a capacidade de carga das ligações.

É necessário verificar a resistência do reforço relativamente à força de tração perpendicular às fibras [19] e que a distância mínima entre o parafuso e o entalhe seja  $a \geq 5d$ .

$$F_{t,90,d} = 1,3 \cdot V_d \left[ 3 \cdot (1 - \alpha)^2 - 2 \cdot (1 - \alpha)^3 \right] \quad (27)$$

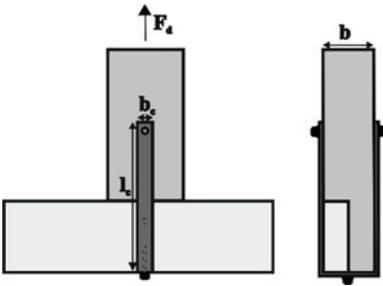
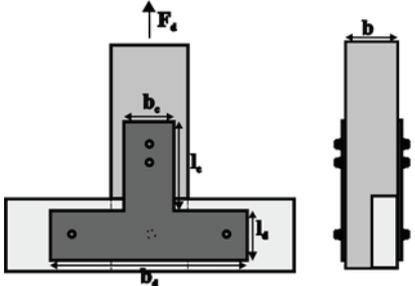
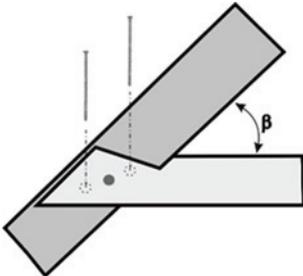
onde  $F_{t,90,d}$  é a força de tração segundo a direção perpendicular à direção das fibras,  $V_d$  é a força de corte de projeto e  $\alpha$  é o valor de  $e_2 / h_r$ .



**Figura 20** Reforço com parafusos totalmente autopercutantes

Nos cruzamentos submetidos à tração é possível usar como solução de reforço chapas metálicas, braçadeira ou ligadores metálicos na zona do entalhe (ver Tabela VIII).

**Tabela VIII** Definição das condições de segurança tendo em conta o elemento de reforço

Elemento de reforço	Verificações de segurança	
	<p>1) Tração da chapa</p> <hr/> <p>Braçadeira</p> <p>2) Compressão perpendicular às fibras</p> <hr/> <p>3) Corte dos ligadores</p>	$\frac{F_d}{2 \cdot b_c \cdot e_c} \leq f_u \quad (28)$ $\frac{F_d}{b \cdot b_c} \leq f_{c,90,d} \quad (29)$ $R_{v,d} \geq F_d \quad (30)$
	<p>1) Tração da chapa</p> <hr/> <p>Chapa metálica</p> <p>2) Corte dos ligadores</p>	$\frac{F_d}{2 \cdot b_c \cdot e_c} \leq f_u \quad (31)$ $n_{ef} \cdot R_{v,d} \geq F_d \quad (32)$
	<p>Ligadores metálicos</p> <p>1) Capacidade resistente dos ligadores</p>	$n_{ef} \cdot R_{v,d} \geq F_d \quad (33)$

**Figura 21** Reforço da ligação com uma braçadeira em forma de U

**Figura 22** Reforço da ligação com uma chapa metálica em forma de T

**Figura 23** Reforço da ligação com ligadores metálicos

Onde  $e_c$  é a espessura da chapa e  $f_u$  é a tensão última.

### 3.3 Empalmes

A técnica tradicional de reforço das ligações por empalmes passa pela adição de ligadores metálicos (pregos ou parafusos auto-perfurantes) nas áreas sobrepostas (Figura 24.a)). Os ligadores irão absorver os esforços de tração.

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} \geq F_d \quad (34)$$

Quando as cargas são elevadas opta-se por colocar nas laterais da ligação placas de metal ou de madeira, a fim de aumentar a sua rigidez e resistência, que sem estes elementos é baixa (Figura 24.b)). Esta técnica de reforço é adequada e pouco intrusiva, mas no caso de se optar pelo uso de elementos de madeira, estes devem possuir características semelhantes à ligação original.

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} + F_{V,d} \geq F_d \quad (\text{madeira}) \quad (35)$$

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} + F_u \geq F_d \quad (\text{metal}) \quad (36)$$

onde  $F_{V,d}$  é a resistência ao corte da madeira,  $F_u$  é a resistência à tração da chapa e  $V_d$  é o esforço de corte atuante.

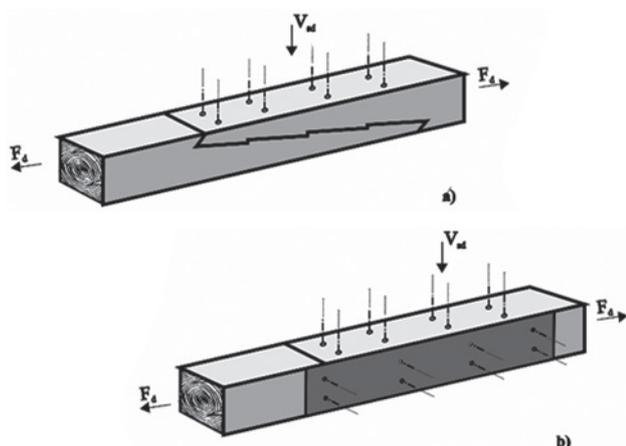


Figura 24 Reforço de empalmes: a) parafusos autoperfurantes; b) placas de metal

## 4 Conclusões

As estruturas de madeira são formadas por um conjunto de elementos, ligados entre si através de ligações tradicionais, onde as tensões são transmitidas através das superfícies em contacto. A conceção das ligações implica uma correta definição da sua geometria, dado que a mesma influencia o mecanismo de distribuição das forças na ligação e, consequentemente, o comportamento global da ligação. Com vista a colmatar a falta de informação no que se refere à definição dos parâmetros geométricos e verificações de segurança das ligações tradicionais de madeira, neste trabalho, são apresentadas algumas informações nesse sentido. No entanto, considera-se que é necessário desenvolver estudos com o objetivo de avaliar todos os parâmetros que afetam/definem cada tipo de ligação.

As intervenções de reforço permitem por um lado resolver deficiências da estrutura original, mas também aumentar a resistência e a

ductilidade atual das ligações tradicionais de madeira. Muitas vezes, as ações de reforço também surgem da necessidade de alteração do uso da estrutura ou da inadequação às normas de segurança atuais. Seja qual for o objetivo, existem diferentes técnicas para proceder à intervenção.

Embora existam alguns resultados científicos sobre o reforço de ligações tradicionais de madeira, existe uma clara falta de informação sobre regras para a sua conceção e dimensionamento. Neste trabalho são apresentadas algumas das soluções mais tradicionais de reforço de ligações que se baseiam na adição de elementos de madeira ou metálicos.

Os elementos de madeira são utilizados com vista a aumentar o contacto entre os elementos e deste modo eliminar a existência de folgas, em resultado de erros de execução ou retração da madeira. Por sua vez, os elementos metálicos asseguram uma maior ductilidade das ligações, aumentando a sua capacidade de redistribuição de esforços. Além disso, também podem ser utilizados para restituírem o contacto entre os elementos da ligação, impedir os deslocamentos relativos entre os elementos, aumentar a capacidade de suporte e/ou rigidez da ligação.

## Referências

- [1] Itani, R. Y.; Faherty, K. F. – "Structural wood research: state-of-the-art and research needs". ASCE, 1983.
- [2] Parisi, M. A.; Piazza, M. – "Seismic strengthening of traditional carpentry joints". In Proceedings, 14th Conference of Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [3] Siem, J. – "Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures", COST Action FP1101 RILEM, Short Scientific Mission Report STSM-FP1101-071014-0496762011, Netherland, 2014.
- [4] Jockwer, R. et al. – "Ergänzung zu: Vergleich der Bemessungsansätze für Stösse und Versätze: Norm SIA 265 / DIN 1052 / EN 1995-1-1", EMPA, Abteilung Holz, Dübendorf, 2010.
- [5] Martitegui, F. et al. – "Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera: Documento de aplicación del CTE", Maderia Construcción. ISBN: 978-84-695-3438-0, Madrid, p.36.
- [6] Branco, J.; Descamps, T. – "Analysis and strengthening of carpentry joints". *Construction and Building Materials*, Accepted, 2015.
- [7] SIA 265: 2012 – SCIA, Swiss Standardisation Institute, Zürich, Switzerland, 2012.
- [8] DB-SE-M: 2009 – "Documento Básico Seguridad Estructural: Estructuras de Madera. Código Técnico de la Edificación", Ministério de Vivienda, 2009.
- [9] NEN 6760: 2005 – NEN, Dutch Standardisation Institute, Delft, The Netherlands, 2005.
- [10] CNR-DT 206: 2007 – Istruzioni per la Pogettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno, Italy, 2007.
- [11] DIN 1052: 2004 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken-Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau, 2004.

- [12] Feio A. O.; Saporiti J. M.; Lourenço P. B. – "Capacity of a traditional timber mortise and tenon joint". *SAHC 2008: Structural Analysis of Historical Constructions*, Bath, UK, 2008, pp. 833-841.
- [13] EN 1995-1-1: 2010 – "Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings". European Committee for Standardization, 2010.
- [14] NEN-EN 1995-1-1: 2013 – NEN Dutch NA 8.11 Ambachtelijke verbindingen, Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 2013, pp. 12-16.
- [15] Montero, L. – "Apuntes sobre Tecnología de la madera". Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Zamora, 1990, p. 268.
- [16] Verbist, M.; Branco, J. M.; Poletti, E.; Descamps, T.; Lourenço P. B. – "Single step joint: overview of European standardized approaches and experimentations". In: XII International Conference on Structural Repair and Rehabilitation CINPAR2016, Porto, Portugal, 26-29 October 2016. 2756–2763.
- [17] Costa, L. – *Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos*. Relatório de projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau mestre em Engenharia Civil- Especialização em Construções Civas, FEUP, 2009.
- [18] Dias, A. et al. – "Avaliação, conservação e reforço de estruturas de madeira". Ed. José Saporiti Machado, Verlag Dashöfer Edições Profissionais Lda, Lisboa, 2009.
- [19] Kasal, B.; Tannert, T. – "In Situ Assessment of Structural Timber: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST", RILEM State of the Art Reports (7), 2011.

