

## Estudo Experimental em Ligações Madeira-Betão com Ligadores Metálicos Associados a Resinas Epoxídicas

Martins, H.M.G.<sup>1</sup>; Jorge, L.F.C.<sup>2</sup>; Dias, A.M.P.G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Castelo Branco

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Castelo Branco

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra



### RESUMO

*Este artigo apresenta o estudo experimental de ligações madeira-betão através de ligadores metálicos associados a resinas epoxídicas. Este tipo de ligações caracteriza-se por apresentar propriedades mecânicas com valores superiores aos geralmente obtidos nas ligações tradicionais de parafusos e cavilhas.*

*Foram testadas treze configurações diferentes de ligação, onze para utilização em pavimentos de edifícios e duas mais vocacionadas para tabuleiros de pontes.*

*A avaliação das características mecânicas da ligação mista madeira-betão foi realizada através de ensaios de corte de acordo com a norma europeia EN 26891:1991. Em complemento, foram ainda realizados ensaios de arrancamento de varões de aço nos elementos de madeira.*

*Com os ensaios de corte pretendeu-se avaliar o comportamento mecânico deste tipo de ligações, nomeadamente no respeitante a rigidez, capacidade de carga e capacidade de deformação plástica.*

## 1- INTRODUÇÃO

### 1.1 - Enquadramento

A utilização de estruturas mistas madeira-betão, principalmente em pavimentos, traz vantagens relativamente à aplicação de um único material (madeira ou betão). Do ponto de vista estrutural, e relativamente às estruturas de betão armado a principal vantagem é a redução de peso próprio da estrutura. Em pavimentos construídos apenas em madeira, a introdução de uma lajeta de betão confere um aumento de rigidez e de capacidade de carga ao pavimento, assim

como diminuição das deformações e vibrações.

Para que o sistema estrutural misto seja eficaz e competitivo é necessário que os dois materiais trabalhem em conjunto e não isoladamente. Existem inúmeras soluções para a ligação dos materiais, como cavilhas, parafusos, entalhes, colagens entre outras. A eficácia do comportamento misto dos materiais madeira e betão reside na ligação entre ambos, influenciando directa ou indirectamente uma componente significativa dos custos associados a esta

solução construtiva. Torna-se assim crucial o estudo das ligações madeira-betão, de forma a maximizar a utilização conjunta do ponto de vista estrutural destes materiais, procurando em simultâneo a sua competitividade económica.

## 1.2 - Objectivo

O objectivo deste trabalho foi o estudo de ligações para aplicação em estruturas mistas madeira-betão de pavimentos e pontes.

O estudo desenvolvido neste trabalho desenrolou-se em duas fases. Na primeira fase foram analisadas as ligações para aplicação em pavimentos de edifícios. Para isso, foram realizados ensaios de arrancamento de varões em provetes de madeira e ensaios monotónicos de corte simples em onze configurações de ligações mistas, seguindo todos eles a norma europeia EN26891:1991.

Na segunda fase foram estudadas duas configurações de ligação madeira-betão para aplicação em tabuleiros de pontes. Nesta fase, para além dos ensaios de corte com carga monotónica, foram realizados ensaios de corte com carga cíclica (com inversão do sentido da força). Este último ensaio pretendia de forma prospectiva, avaliar da influência do número de ciclos na rigidez de ligação.

## 2- ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

### 2.1 - Introdução

Com os ensaios de arrancamento pretendeu-se avaliar o comportamento da ligação entre o varão de aço e a madeira, utilizando uma resina epoxy (HILTI® RE500).

Nas configurações de ligação mista madeira-betão avaliadas neste trabalho, o elemento metálico presente, encontra-se solicitado com uma componente axial de tracção muito importante. Neste contexto, a avaliação do comportamento em tracção das colagens poderá fornecer indicações importantes para a compreensão das ligações mistas nos ensaios de corte.

Para esse efeito foram consideradas três variáveis: as condições de Serviço descritas na norma EN1995-1-1, a inclinação do varão relativamente ao fio da madeira e o tipo de madeira (Espruce e Pinho Bravo). Apesar da norma EN1995-2 não permitir a utilização de ligações mistas em Classe de Serviço 3, este estudo contemplou-a, de modo a perceber a sua influência.

### 2.2 - Descrição dos ensaios

Através da variação dos parâmetros acima descritos foram criadas 5 séries, contemplando as 3 classes de serviço, 2 espécies de madeira e 1 variação da inclinação do varão, conforme descrito na Tabela 1. Para cada série foram construídos 5 provetes.

Tabela 1 – Características das séries estudadas.

Nome	Madeira	Classe de serviço	Inclinação do varão
S-90-12	Espruce	1	90°
S-90-16	Espruce	2	90°
S-90-20	Espruce	3	90°
S-45-12	Espruce	1	45°
MP-90-12	Pinho Bravo	1	90°

Os varões utilizados nas ligações, são de aço nervurado de 10mm de diâmetro da classe A400NR. As peças de madeira utilizadas para a construção dos provetes foram obtidas de vigas de madeira lamelada colada, tendo as seguintes dimensões 30x15x13,5 cm<sup>3</sup>. No caso da madeira de Espruce as lamelas pertenciam à Classe C18, enquanto a madeira de Pinho Bravo utilizada não foi classificada.

Após a preparação dos provetes, estes foram colocados em câmaras climatizadas para as Classes de Serviço a que se pretendam que estejam expostos. O controlo do teor em água dos provetes foi realizado através de pesagens regulares dos mesmos, sendo apenas ensaiados quando as pesagens sucessivas estejam estabilizadas.

O procedimento de carga utilizado foi o indicado na norma EN26891:1991

(Figura 1), geralmente utilizado para ligações madeira-madeira.

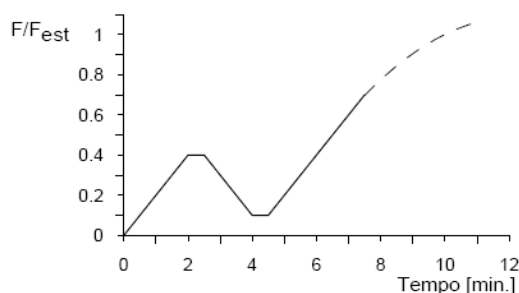


Fig. 1 - Procedimento de carga, EN26891:1991

Os ensaios foram realizados numa máquina universal de 20 tf, tendo o controlo do ensaio sido realizado em 'força' até 70% da força máxima estimada, passando depois para controlo em 'deslocamento'. Os provetes foram amarrados à máquina de ensaios conforme ilustra a Figura 2.

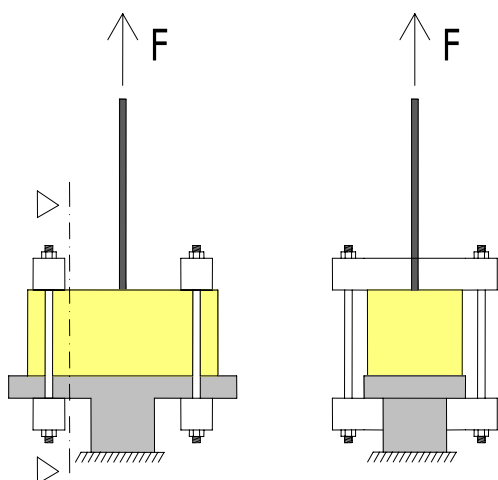


Fig. 2 - Sistema de fixação dos provetes.

Em cada ensaio foi registada a força de tracção aplicada pela máquina e o deslocamento relativo entre a peça de madeira e o varão de aço. A força de tracção foi medida através de uma célula de carga instalada na máquina de ensaios. O deslocamento relativo entre a peça de madeira e o varão de aço, foi medido por 2 transdutores de deslocamento (LVDT), com 25 mm de capacidade, posicionados conforme ilustra a Figura 3.

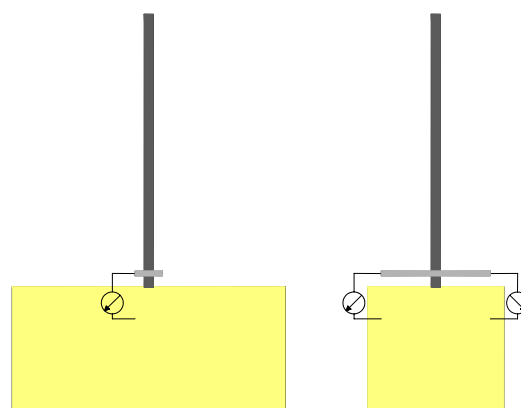


Fig. 3 - Esquema de montagem dos transdutores de deslocamento.

### 2.3 - Resultados

A partir das leituras realizadas, foram determinadas a capacidade de carga e o módulo de escorregamento ( $k_s$ ), de acordo com as indicações da norma EN26891:1991.

O modo de rotura observado nos ensaios foi invariável, correspondendo a cedência das fibras de madeira (Figura 4). Esta conclusão é suportada pela natureza das fibras de madeira presentes na superfície da cola após a extracção do varão.



Fig. 4 - Modo de rotura

A Tabela 2, apresenta para cada configuração o número de ensaios válidos, os valores médios da capacidade de carga, do módulo de escorregamento e do deslocamento último ( $d_u$ ) assim com o respectivo desvio padrão.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de arrancamento

Config.	N.º Ensa ios	Parâmetro	Valor Médio	Desvio Padrão
S-90-12	5	$F_{est}$ [kN]	30,0	-
		$F_{max}$ [kN]	28,1	1,18
		$k_s$ [kN/mm]	56,1	54,10
		$d_u$ [mm]	1,2	0,25
S-90-16	3	$F_{est}$ [kN]	30,0	-
		$F_{max}$ [kN]	27,8	0,97
		$k_s$ [kN/mm]	19,4	13,67
		$d_u$ [mm]	2,1	1,07
S-90-20	5	$F_{est}$ [kN]	15,0	-
		$F_{max}$ [kN]	13,2	1,91
		$k_s$ [kN/mm]	15,5	6,00
		$d_u$ [mm]	2,2	0,51
S-45-12	5	$F_{est}$ [kN]	30,0	-
		$F_{max}$ [kN]	34,0	4,72
		$k_s$ [kN/mm]	30,3	15,25
		$d_u$ [mm] *	1,6	0,39
MP-90-12	5	$F_{est}$ [kN]	30,0	-
		$F_{max}$ [kN]	36,8	4,72
		$k_s$ [kN/mm]	46,1	8,07
		$d_u$ [mm]	2,3	1,39

## 2.4 - Conclusões

Da análise aos resultados obtidos dos ensaios de arrancamento é possível sintetizar as seguintes conclusões:

- (1) A capacidade de carga e o módulo de escorregamento aumentam com o aumento da massa volúmica da madeira. O ganho obtido com o aumento da massa volúmica da madeira encontra-se naturalmente em linha com a correlação expectável entre resistência da madeira e a sua massa volúmica.
- (2) A diminuição da inclinação do varão relativamente ao fio da madeira conduz a um ganho de capacidade de carga. Este aumento deverá estar relacionado com melhores propriedades da madeira na direcção paralela ao fio. No entanto, registou-se uma diminuição do módulo de escorregamento.
- (3) A exposição da ligação nas, Classes de Serviço 1 ou 2, não aparenta ter grande influência na capacidade de carga, no entanto, registou-se uma diminuição

significativa do módulo de escorregamento. Como seria de esperar a exposição da ligação às condições termo-higrométricas da Classe de Serviço 3 apresenta valores substancialmente mais baixos de capacidade de carga e módulo de escorregamento, quando comparados com as ligações expostas às Classes de Serviço 1 ou 2.

## 3- ENSAIOS DE CORTE EM LIGAÇÕES PARA EDIFÍCIOS

### 3.1 - Introdução

Foram estudadas 11 configurações diferentes de ligações madeira-betão para aplicação em pavimentos de edifícios. Das 11 configurações 8 associavam entalhes na madeira a varões pré-esforçados, 2 usavam varões nervurados inclinados e 1 usava uma malha metálica.

Foram preparados provetes das ligações e ensaiados em corte simples, com o objectivo de determinar a capacidade de carga, módulo de escorregamento e modo de rotura de cada configuração. Para as 2 configurações com melhor desempenho mecânico, foram realizados ensaios adicionais de modo a obter uma amostra maior, para a determinação de valores característicos, para a classe de serviço 1.

### 3.2 - Descrição dos ensaios

As 11 configurações foram divididas em 2 grupos, atendendo às suas características: ligações realizadas exclusivamente através de elementos metálicos e ligações realizadas essencialmente através de contactos entre a madeira e o betão.

No primeiro grupo estão incluídas a ligação contínua através de malha metálica (Figura 5) e a ligação pontual através de varão nervurado (Figura 6).

No segundo grupo estão incluídas a ligação por entalhe simétrico com varão vertical pré-esforçado por pós-tensão (Figura 8) e entalhe assimétrico com varão nervurado (Figura 7).

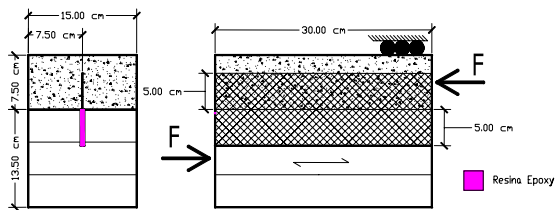


Fig. 5 – Ligação através de malha metálica (SM).

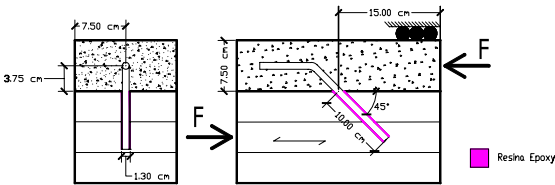


Fig. 6 – Ligação através de varão nervurado sem entalhe (GIR).

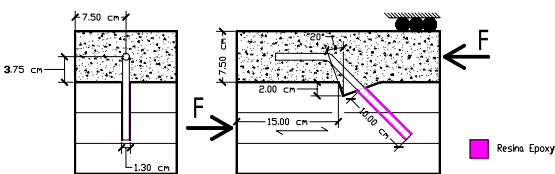


Fig. 7 – Ligação através de varão nervurado com entalhe assimétrico (GIR-N).

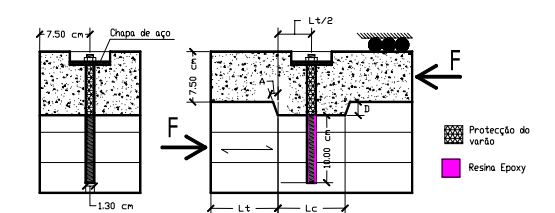


Fig. 8 – Ligação através de parafuso pré-esforçado e entalhe simétrico

A Tabela 3 apresenta as características das ligações<sup>1</sup> através de parafuso pré-esforçado e entalhe simétrico.

Tabela 3 – Características da configuração com parafusos pré-esforçados.

Configuração	A [°]	D [mm]	Lc [mm]	Lt [mm]
NA1	20	20	100	100
NA2	0	20	100	100

<sup>1</sup> Os símbolos indicados na Tabela 3 estão indicados na Figura 8.

ND2	20	30	100	100
NN1	20	20	100	150
NN2	20	20	100	200
NN3	20	20	75	75
NN4	20	20	75	188
NN5	20	20	75	225

A madeira utilizada para a construção dos provetes foi madeira lamelada colada de Espruce obtida por colagem de 3 lamelas classificadas como C18 resultando numa secção final com 15x13,5 cm<sup>2</sup> de secção transversal. O betão utilizado na construção dos provetes correspondia a uma classe C25/30, avaliada através de ensaios de compressão em cubos de 15cm. Os varões nervurados foram obtidos de barras de aço da classe A400NR com 10 mm de diâmetro enquanto os varões rosçados foram obtidos a partir de barras da classe 8.8 M10. Na configuração SM foi utilizada uma malha metálica com 2 mm de espessura e 10 cm de altura (5 cm em cada elemento), a mesma malha metálica foi utilizada por Bathon et al. (2000). A cola utilizada para ligação dos elementos metálicos à madeira foi uma resina epoxídica de 2 componentes (HILTI® RE500).

A construção dos provetes foi realizada em 3 fases. Em primeiro lugar foram preparadas as peças de madeira, com a abertura entalhes, furos e rasgos longitudinais. Numa segunda fase foram colados os ligadores metálicos, ficando os provetes imóveis durante 48 horas, até que a cola ganhasse presa. Nas ligações com parafusos pré-esforçados os varões foram protegidos através de um tubo plástico, para que o betão não aderisse ao parafuso. Por último as peças de madeira foram colocadas nas cofragens e os provetes betonados. 24 horas após a betonagem foram descofrados e colocados numa câmara climatizada, para as condições da classe de serviço 1, para permitir a cura do betão por um período mínimo de 28 dias após o que os ensaios foram realizados. Em cada betonagem foram recolhidos 6 cubos de betão com 15 cm de aresta, foram ensaiados 3 cubos aos 28 dias de cura do betão, sendo os restantes nos dias de ensaio das ligações.

Os ensaios de corte foram realizados numa máquina de ensaios universal com uma capacidade de 20 tf. O procedimento de carga foi o indicado na norma EN26891:1991 (Figura 1). O valor de  $F_{Est}$  foi adaptado a cada ligação, a partir de um ensaio de corte inicial, destinado apenas a este fim. A Figura 9 apresenta o sistema de apoios dos provetes, o slide foi introduzido a fim de evitar a rotação do provete, o elemento de betão foi parcialmente apoiado para simular a zona comprimida do betão, pois num elemento de betão sujeito a flexão apenas parte do elemento de betão é está sujeito a compressão.

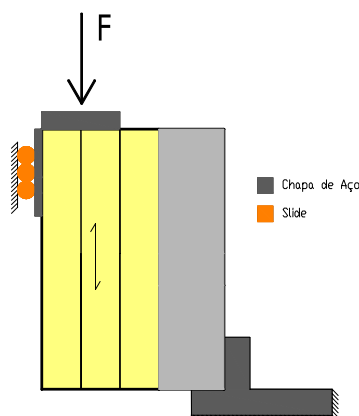


Fig. 9 – Sistema de apoios dos provetes.

Nas configurações com recurso a pré-esforço por pós-tensão este foi dado através do aperto de uma porca contra uma chapa de aço quadrada com 5 cm de aresta e 4mm de espessura. O pré-esforço era aplicado imediatamente antes do ensaio. Para tal, recorreu-se a uma chave dinamométrica tendo-se aplicado um binário de 40Nm à porca, o que corresponde a uma força de tracção no varão de aproximadamente 12kN (determinada experimentalmente), esta força de tracção corresponde sensivelmente a 30% da registada nos ensaios de arrancamento para as mesmas condições.

Em cada ensaio foi registada a carga aplicada à ligação através de uma célula de carga instalada na máquina de ensaios, e o deslocamento relativo entre o elemento de madeira e betão, através de 2

transdutores de deslocamento (LVDT), com 25 mm de capacidade, conforme ilustra a Figura 10.

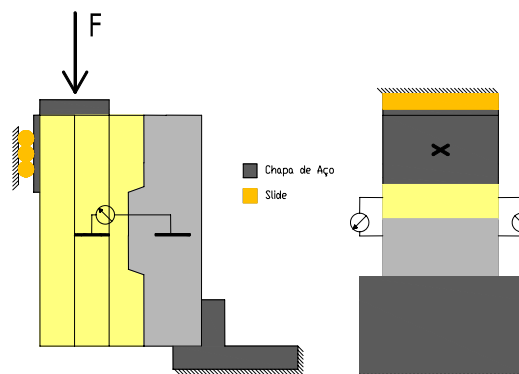


Fig. 10 – Esquema de montagem dos transdutores de deslocamento.

### 3.3 - Resultados

A partir das leituras realizadas foram determinadas a capacidade de carga e o módulo de escorregamento (1), de acordo com as indicações da norma EN26891:1991, onde  $f_{h,est}$  corresponde a 40% da capacidade de carga estimada e  $w_{04}$  e  $w_{01}$  correspondem à deformação para as cargas de 40% e 10% da capacidade de carga estimada, respectivamente.

$$k_s = \frac{0,4 f_{h,est}}{\frac{4}{3} (w_{04} - w_{01})} \quad (1)$$

Foi ainda registado o modo de rotura de cada ligação.

A Tabela 4 apresenta os modos de rotura registados em cada configuração, todas as configurações tiveram apenas um modo de rotura, excepto a configuração GIR. Foram registados 2 modos de rotura em cada material. Na madeira esmagamento localizado junto ao ligador (ELM) (Figura 11) e corte longitudinal nas fibras de madeira (CLM) (Figura 12). No betão, esmagamento (EsB) (Figura 13) e corte ao longo do ligador (CB) (Figura 14).

O modo de rotura ELM caracteriza-se por ocorrer um esmagamento das fibras de madeira junto ao ligador, por compressão deste. No modo de rotura



CLM registou-se o corte longitudinal das fibras de madeira, no plano da base do entalhe. A rotura EsB caracteriza-se pelo esmagamento do elemento de betão, enquanto o modo de rotura CB caracteriza-se pelo corte no betão, na direcção do ligador.

Tabela 4 – Modo de rotura das ligações.

Configuração	ELM	CLM	EsB	CB
SM				X
GIR	X			X
GIR-N			X	
NA1		X		
NA2		X		
ND2		X		
NN1			X	
NN2			X	
NN3		X		
NN4			X	
NN5			X	



Fig. 11 – Esmagamento localizado na madeira (ELM).



Fig. 12 – Corte longitudinal na madeira (CLM).



Fig. 13 – Esmagamento no betão (EsB).



Fig. 14 – Corte no betão ao longo do ligador (CB).

A Tabela 5 apresenta o valor médio e o desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de corte: capacidade de carga, módulo de escorregamento (1), deslocamento último e o teor em água da madeira no momento de realização dos ensaios.

A capacidade de carga foi definida como sendo a carga máxima que a ligação suporta. O deslocamento último traduz o valor máximo do deslocamento relativo entre os materiais, imediatamente antes da rotura.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de corte.

Config.	N.º Ensaio	Variável	Valor Médio	Desv. Padrão
SM	4	$F_{max}$ [kN]	77,1	17,4
		$k_s$ [kN/mm]	175,1	36,9
		$d_u$ [mm]	0,88	0,3
		$\omega$ [%]	12,5	0,5
GIR	3	$F_{max}$ [kN]	88,6	10,2
		$k_s$ [kN/mm]	479,6	278,9
		$d_u$ [mm]	0,33	0,07
		$\omega$ [%]	12,5	0,5
GIR-N	5	$F_{max}$ [kN]	104,8	4,3
		$k_s$ [kN/mm]	477	99,3
		$d_u$ [mm]	1,42	0,3
		$\omega$ [%]	12,5	0,5
NA1	8	$F_{max}$ [kN]	93,2	11,9
		$k_s$ [kN/mm]	128,2	53,7
		$d_u$ [mm]	1,34	0,6
		$\omega$ [%]	13,9	0,6
NA2	4	$F_{max}$ [kN]	86,8	19,2
		$k_s$ [kN/mm]	108,7	35
		$d_u$ [mm]	2,03	0,62
		$\omega$ [%]	13,9	0,6
ND2	5	$F_{max}$ [kN]	88,5	9,2
		$k_s$ [kN/mm]	127,5	25,7
		$d_u$ [mm]	1,44	0,29
		$\omega$ [%]	13,3	0,5
NN1	5	$F_{max}$ [kN]	86,2	2,4
		$k_s$ [kN/mm]	154,9	45,1
		$d_u$ [mm]	5,45	1,37
		$\omega$ [%]	12,5	0,5
NN2	5	$F_{max}$ [kN]	50,8	3
		$k_s$ [kN/mm]	94,6	34,2
		$d_u$ [mm]	11,55	3,32
		$\omega$ [%]	13,9	0,6
NN3	5	$F_{max}$ [kN]	69,2	8,8
		$k_s$ [kN/mm]	150,4	63,5
		$d_u$ [mm]	1,78	0,18
		$\omega$ [%]	13,9	0,6
NN4	5	$F_{max}$ [kN]	56,9	5,6
		$k_s$ [kN/mm]	122	35,7
		$d_u$ [mm]	6,94	2,75
		$\omega$ [%]	13,9	0,6
NN5	5	$F_{max}$ [kN]	39,1	4,2
		$k_s$ [kN/mm]	57,7	19
		$d_u$ [mm]	6,69	3,31
		$\omega$ [%]	12,5	0,5

### 3.4 - Determinação de valores característicos

Como já foi referido um dos objectivos do estudo foi a determinação de valores característicos de capacidade de carga e módulo de escorregamento das duas ligações com melhor desempenho mecânico. Da análise dos resultados obtidos nos ensaios preliminares (Figura 15) seleccionaram-se as configurações GIR e GIR-N, pois foram aquelas que apresentaram maior rigidez de ligação e capacidade de carga mais elevada.

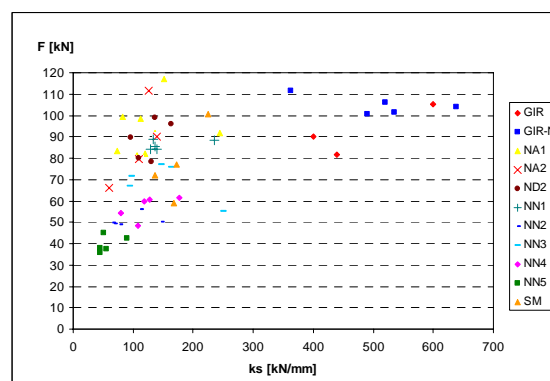


Fig. 15 – Relação entre a capacidade de carga e módulo de escorregamento nos ensaios preliminares.

Para tal foram realizados ensaios de corte adicionais, 23 para a ligação GIR e 26 para a ligação GIR-N. A Tabela 6 apresenta os valores médios e característicos obtidos a partir dos ensaios finais.

Tabela 6 – Resultados finais dos ensaios de corte.

Config.	Nº Ensaio	F, $k_s$	Valor obtido
GIR	23	$F_{med}$ [kN]	65,7
		$F_k$ [kN]	58,4
		$k_{s,med}$ [kN/mm]	139,3
		$k_{s,k}$ [kN/mm]	81,8
GIR-N	26	$F_{med}$ [kN]	97,4
		$F_k$ [kN]	87,5
		$k_{s,med}$ [kN/mm]	408,6
		$k_{s,k}$ [kN/mm]	273,7

### 3.5 - Conclusões

Dos ensaios realizados e das configurações estudadas pode-se concluir que a ligação GIR-N foi aquela que apresentou melhor performance mecânica.



Relativamente às variáveis em estudo (introdução de entalhe assimétrico na ligação com varão inclinado, inclinação da parede do entalhe, profundidade do entalhe e relação entre as superfícies resistentes de betão e madeira) foi também possível retirar algumas conclusões, tais como:

- A introdução de um entalhe assimétrico na ligação com varão nervurado inclinado aumenta a capacidade de carga e módulo de escorregamento, altera o modo de rotura e conduz a um aumento da ductilidade da ligação.
- A alteração da inclinação das paredes dos entalhes simétricos de 20° para 0°, relativamente à vertical, conduziu a uma diminuição da capacidade de carga e módulo de escorregamento, contudo o modo de rotura não se alterou.
- O aumento da profundidade dos entalhes de 20mm para 30mm não provocou alterações significativas no desempenho mecânico da ligação nem no seu modo de rotura.
- Verificou-se que existe uma relação entre a relação das superfícies de madeira e betão resistentes com o modo de rotura.

Globalmente pode concluir-se que alterações na disposição dos entalhes, nomeadamente a sua posição, influenciam o comportamento da ligação, a capacidade de carga, módulo de escorregamento e o modo de rotura.

## 4- ENSAIOS DE CORTE EM LIGAÇÕES PARA PONTES

### 4.1 - Introdução

No estudo de ligações mistas madeira-betão para aplicação em pontes foram estudadas 2 configurações de ligações, à escala real.

Para cada uma destas foram realizados ensaios monotónicos com o

objectivo de determinar a capacidade de carga e módulo de escorregamento até à rotura. E ensaios cíclicos com inversão da carga com o objectivo de determinar a evolução da rigidez de ligação com a evolução dos ciclos de carga.

Foram ensaiados 3 provetes em cada ligação, para cada tipo de ensaio, monotónico ou cíclico.

### 4.2 - Descrição dos ensaios

As configurações foram designadas por “Ligação A” (Figura 16 e 17) e Ligação B” (Figura 18 e 19).

A Ligação A foi composta por um entalhe simétrico no elemento de madeira associado a 2 varões roscados M20 os quais se destinam a aplicar um pré-esforço na ligação por pós-tensão.

A Ligação B foi composta por um entalhe assimétrico e 3 varões nervurados com diâmetro de 20 mm, inclinados a 45° com o fio da madeira, dois varões foram introduzidos na parede menos inclinada do entalhe e voltados para o entalhe, o outro varão foi disposto no meio dos outros dois e com o sentido oposto.

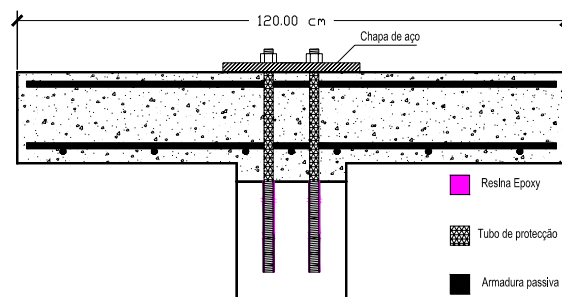


Fig. 16 – Ligação A vista de frente.

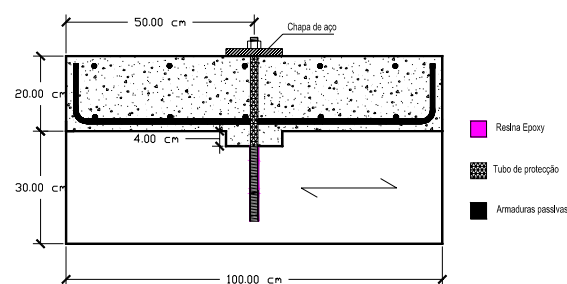


Fig. 17 – Ligação A vista lateral

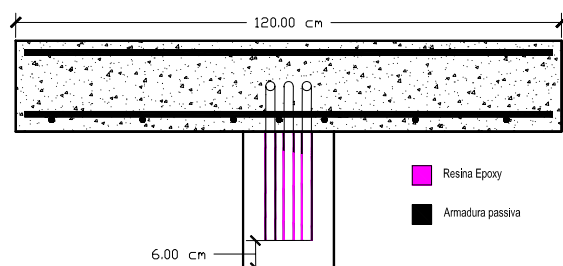


Fig. 18 – Ligação B vista frente.

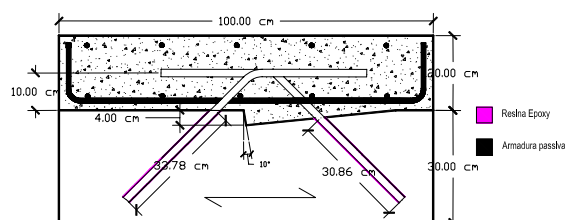


Fig. 19 – Ligação B vista lateral.

A madeira utilizada nestes provetes foi madeira maciça de Pinho bravo, classificada visualmente através da norma NP4305:1995, como classe “E”, com correspondência à classe C18 (NP EN1912:2000).

O betão utilizado na construção dos provetes foi betão pronto da classe C25/30, do qual foram retirados cubos com 15 cm de aresta para realizar posteriormente ensaios à compressão. No elemento de betão foi colocada uma armadura, de modo, a simular a armadura existente no tabuleiro de uma ponte. A armadura inferior era constituída por 7Ø10 na direcção longitudinal e 5 Ø10 na direcção transversal, a armadura superior era constituída apenas por 5 Ø10 na direcção transversal. O aço utilizado foi o A500NR.

Na Ligação A foram utilizados varões roscados M20 da classe 8.8 e uma chapa de aço com 200x100x16 mm de dimensão, para a posterior aplicação do pré-esforço.

Na ligação B foram utilizados varões nervurados de 20mm de diâmetro da classe A400NR, os quais foram dobrados a 45°.

A construção dos provetes foi realizada por 3 fases. Na primeira fase foram preparadas as madeiras, abertura dos entalhes e furos com diâmetro de 24mm. Após a abertura dos furos foram colados os

varões com uma resina epoxídica (HILTI RE500) e deixaram-se os provetes imóveis durante 48, para que a cola ganhasse presa. Por último dispuseram-se os provetes nas cofragens, colocaram-se as armaduras e procedeu-se à betonagem, nos provetes da Ligação A protegeram-se os varões roscados com tubo plástico, para que o betão não aderisse aos varões roscados.

Na Ligação A foi aplicado um pré-esforço por pós-tensão, imediatamente, antes do início do ensaio através do aperto das porcas contra a chapa metálica. Foi aplicado um binário de aperto de 300Nm, através de uma chave dinamométrica, que corresponde a uma força de tracção de 180kN em cada varão (determinada experimentalmente).

O procedimento de carga utilizado nos ensaios monotónicos foi o indicado na norma EN26891:1991 (Figura 1). Nos ensaios cíclicos o carregamento aplicado foi cerca de 20% da capacidade de carga estimada para cada ligação (Figura 20), uma carga aproximadamente igual à que seria esperada em situação de serviço.

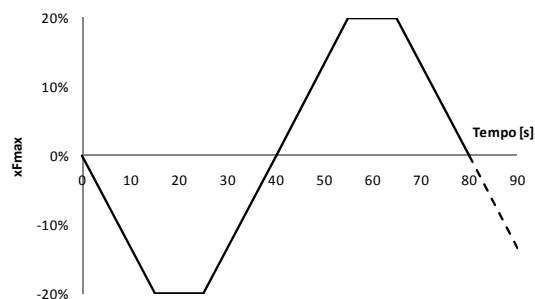


Fig. 20 – Procedimento de carga dos ensaios cíclicos.

Durante a realização dos ensaios foi registada a carga aplicada pelo actuador e o deslocamento relativo entre as peças de madeira e betão. A capacidade de carga foi registada através de uma célula de carga de 100tf de capacidade. O deslocamento relativo entre as peças de madeira e betão foi registado através de 4 transdutores de deslocamento (LVDT) com 25 mm de capacidade, colocados em ambos lados da peça de madeira, afastados 10 cm da mesma e a 1/4 e 3/4 da altura do provete, conforme ilustra a Figura 21. O deslocamento relativo entre a madeira e o

betão foi considerado como a média das 4 leituras.

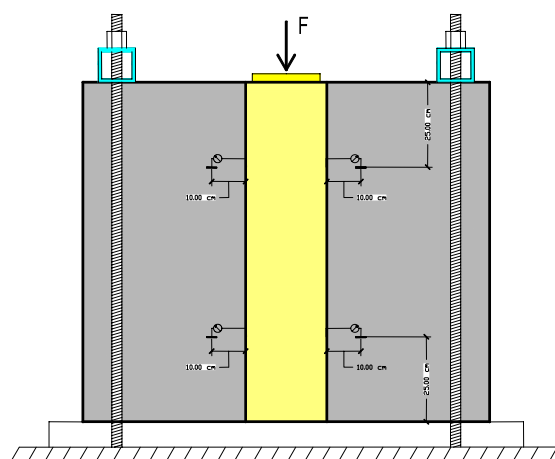


Fig. 21 – Posicionamento dos LVDT.

### 4.3 - Resultados

Para cada uma das ligações foi determinada a capacidade de carga de cada ligação e o módulo de escorregamento através da norma EN26891:1991. Foram também determinados o deslocamento último, o teor em água da madeira no momento do ensaio e o modo de rotura de cada ligação.

Para ambas as ligações verificou-se que a rotura ocorreu pelo elemento de betão.

A Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados obtidos nos ensaios monotónicos.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios monotónicos.

Ligação	Nº Ensaio	Variável	Valor Médio	Desvio Padrão
A	2	$F_{est}$ [kN]	525,0	-
		$F_{max}$ [kN]	347,8	15,3
		$k_s$ [kN/mm]	458,2	60,3
		$d_u$ [mm]	1,61	0,16
		$\omega$ [%]	13,1	0,8
		$F_{est}$ [kN]	525,0	-
B	3	$F_{max}$ [kN]	436,5	63,9
		$k_s$ [kN/mm]	688,5	236,5
		$d_u$ [mm]	2,85	1,52
		$\omega$ [%]	37,7	14,4

Nos ensaios cíclicos foram aplicados cerca de 1500 ciclos de carga com inversão da mesma, após o

carregamento cíclico os provetes foram ensaiados até à rotura seguindo o procedimento de carga dos ensaios monotónicos.

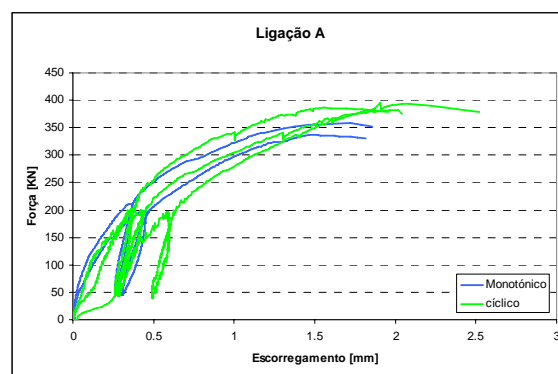


Fig. 22 – Comparação dos ensaios monotónicos, com e sem aplicação de carregamento cíclico.

Durante o carregamento cíclico foi registada a carga aplicada e o deslocamento relativo entre a madeira e o betão. As leituras foram realizadas com uma periodicidade de 5 segundos, garantindo desta forma sempre uma medição no patamar de carga constante.

Os ensaios cíclicos não puderam ser contínuos, devido a constrangimentos do laboratório tendo os mesmos de ser interrompidos durante a noite e retomados no dia seguinte, este facto pode ter influenciado o comportamento da ligação.

Neste estudo, apesar de o carregamento cíclico ter inversão da carga, analisou-se apenas a rigidez da ligação durante a fase de compressão. A rigidez da ligação foi determinada pelo declive da recta que une o ponto em que a carga mais se aproxima do zero e o ponto em que a carga foi registada no patamar.

A Tabela 8 apresenta a quebra de rigidez da Ligação A em cada dia de ensaio, onde se considera a rigidez inicial a média das rigidezes dos 25 ciclos iniciais e a rigidez final a média dos últimos 25 ciclos.

Tabela 8 – Quebra de rigidez da ligação A.

Ligação	Ensaio	Rigidez [kN/mm]		Variação [%]
		Início	Fim	
A	1	490,4	353,9	27,8%
	2	465,4	304,9	34,5%
	3	338,2	123,9	63,4%
B	1	360,8	282,2	21,8%
	2	82,1	64,4	21,6%

#### 4.4 - Conclusões

Dos ensaios monotónicos realizados pode-se concluir que a Ligação B obteve uma maior capacidade de carga e módulo de escorregamento que a Ligação A.

Através da análise dos ensaios cíclicos conclui-se que o carregamento cíclico aplicado não influencia o modo de rotura da ligação, nem afectou de forma significativa a capacidade de carga das ligações, contudo verifica-se uma variação da rigidez. O aumento da capacidade de carga nos ensaios monotónicos com carregamento cíclico, relativamente, aos ensaios monotónicos simples, deve-se ao facto do betão utilizado nos primeiros ter uma resistência à compressão superior ( $f_{cm}=32.4$  MPa) comparativamente com o betão utilizado nos ensaios monotónicos simples ( $f_{cm}=27.3$  MPa).

Conclui-se também que houve uma quebra de rigidez da ligação ao longo do carregamento cíclico. Contudo para uma melhor compreensão deste fenómeno seria necessário ter ensaios com um maior número de ciclos e se possível sem interrupções.

#### 5- CONCLUSÕES

Nos ensaios de arrancamento verificou-se que o aumento da massa volumica da madeira e a diminuição do ângulo entre o ligador e o fio da madeira, conduz a ganhos de capacidade de carga e módulo de escorregamento da ligação. A variação da classe de exposição entre a classe de serviço 1 e 2 não aparenta ter grande influência na capacidade de carga, todavia conduziu a uma perda de módulo

de escorregamento considerável. Em condições extremas (classe de serviço 3) confirmou-se a inadequação deste tipo de ligação, devido a perdas significativas de capacidade de carga e módulo de escorregamento.

Nos ensaios de corte em ligações destinadas a edifícios, verificou-se que a introdução de entalhe na ligação com varão nervurado melhora de modo significativo o comportamento da ligação. A variação da profundidade dos entalhes de 20 mm para 30mm não altera de forma significativa o comportamento da ligação, enquanto a variação da inclinação das paredes do entalhe conduz a uma redução das propriedades mecânicas da ligação.

Nos ensaios em ligações destinadas à aplicação em pontes, verificou-se que a rotura em ambos os casos se registou pelo elemento de betão. O carregamento cíclico conduziu a uma diminuição da rigidez da ligação ao longo dos ciclos, no entanto não afectou a capacidade de carga.

#### 6- REFERÊNCIAS

- Ballerini, M., Crocetti, R. e Piazza, M. 2002. An experimental investigation on notched connections for timber-concrete composite structures, Proceedings of the 7<sup>th</sup> WCTE, Malaysia.
- Bathon, L. e Graf, M. 2000. A continuous wood-concrete composite system, Proceedings of the 6<sup>th</sup> WCTE, Vancouver, Canada.
- Dias, A.M.P.G. 2005. Mechanical behaviour of timber-concrete joints, Tese de Doutoramento, University of Delft.
- EN 26891: EUROPEAN STANDARD. 1991. Timber structures: Joints made with mechanical fasteners: General principles for determinations of strength and deformation characteristics.
- EN 338: EUROPEAN STANDARD. 2003. Structural timber: Strength classes.
- EN 1995-1-1: EUROPEAN STANDARD. 2002. Eurocode 5: Design of timber structures Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- EN 1995-2: EUROPEAN STANDARD. 2003. Eurocode 5: Design of timber structures Part 2: Bridges.

Martins, H.M.G.; Jorge, L.F.C.; Dias, A.M.P.G.

Gutkowski, R., Brown, K., Shigidi, A. e Natterer, J. 2004. Investigation of notched composite wood-concrete connections, Journal of structural engineering, ASCE.

Jorge, L.F.C. 2005. Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.

Martins, H.M.G. 2008. Sistemas de ligação madeira-betão com o uso de ligadores metálicos associados a resinas epoxídicas, Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.

Michelfelder, B. e Kuhlmann, U. 2004. Grooves as shear connections in timber-concrete composite structures, Proceedings of the 8<sup>th</sup> WCTE, Lahti, Finland.

NP 4305: NORMA PORTUGUESA. 1995. Madeira serrada de pinho bravo.

NP EN 1912: NORMA PORTUGUESA. 2000. Classes de resistência e atribuição de classes de qualidade e espécies.

Tommola, J., Salokangas, L. e Jutila, A. 1999. Wood-concrete composite bridges – Tests on shear connectors, Nordic Timber Council, Sweden.