

# COMPORTAMENTO SEMI-RÍGIDO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA

**Branco, J.M.<sup>1</sup>; Cruz, P.J.S.<sup>2</sup>; Piazza, M.<sup>3</sup>; Varum, H.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Assistente, <sup>2</sup>Prof. Associado com Agregação  
ISISE, DEC, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal

<sup>3</sup>Prof. Catedrático

Dpto de Engenharia Mecânica e Estrutural, Universidade de Trento, Via Mesiano 77, 38050 Trento, Itália

<sup>4</sup>Prof. Auxiliar

Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal



## SUMÁRIO

*Apresentam-se os principais resultados de uma campanha experimental sobre ligações tradicionais de madeira. Através de ensaios monotónicos e cíclicos, analisaram-se ligações originais (não reforçadas) e estudaram-se três soluções típicas de reforço, nomeadamente, soluções com recurso a: braçadeira, esquadro e varões. Com base nestes resultados experimentais foi implementado e calibrado um modelo simplificado para a simulação do comportamento histerético das ligações entre elementos estruturais nas asnas tradicionais de madeira.*

## 1- INTRODUÇÃO

Na análise estrutural das asnas de madeira é usual assumir que as ligações dos seus elementos constituintes são articuladas. Contudo, estas ligações apresentam uma rigidez não desprezável. Esta capacidade de transmissão de momentos nas ligações pode alterar significativamente a resposta das asnas, particularmente quando sujeitas a ações não simétricas, como as induzidas por neve, vento e sismos. No caso particular da reabilitação e/ou reforço de coberturas tradicionais de madeira, a dificuldade em prever o real comportamento das suas ligações geralmente conduz a intervenções excessivamente do lado da segurança e intrusivas. O presente trabalho pretende salientar a importância do conhecimento do comportamento semi-rígido das ligações típicas em asnas tradicionais de

madeira e algumas soluções possíveis para a melhoria do seu desempenho.

## 2 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

A campanha de ensaios foi realizada no Laboratório de Ensaio de Estruturas (LEST), do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, e inclui ensaios à escala real de ligações tradicionais de madeira de dente simples [Branco *et al.* (2005a)]. Foram estudadas ligações representativas da ligação linha-perna, de Pinho bravo (*Pinus pinaster*, Ait.), com um ângulo de abertura de 30° e 60°. Ligações originais, ou seja, não reforçadas, numa primeira fase, e posteriormente ligações reforçadas foram submetidas a ensaios monotónicos (abertura de ângulo: Monot. + e fecho do ângulo: Monot. -) e cíclicos. Entre as ligações não reforçadas, avaliou-se ainda a

influência do nível de tensão de compressão da perna ( $\sigma_c$ ) no comportamento da ligação. Para cada parâmetro avaliado realizaram-se ensaios sobre 3 provetes. Os ensaios das ligações foram precedidos de uma campanha de ensaios de caracterização da madeira [NP 4305:1995 e EN 408:2003] utilizada na sua construção. A tabela 1 resume os ensaios realizados sobre as ligações.

**Tabela 1** - Ensaios realizados.

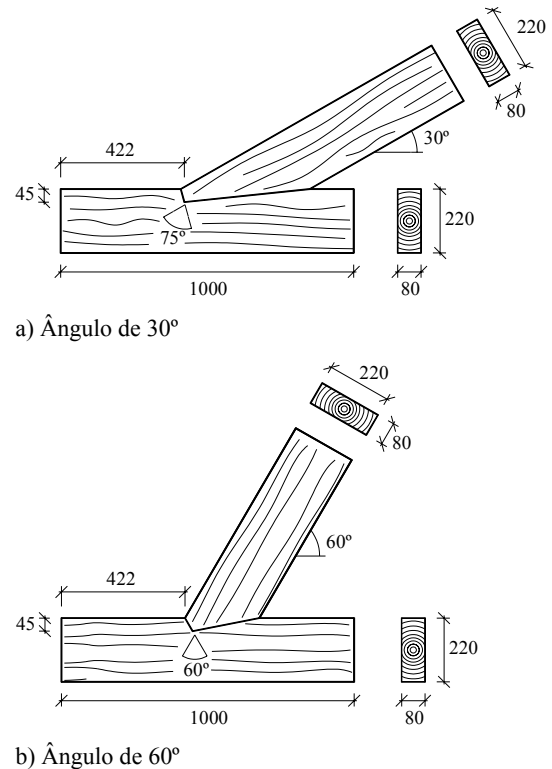
Ligação		$\alpha$	$\sigma_c$ (MPa)	Ensaio
Não reforçada		30°	1.4	Monot. +
		e	e	Monot. -
		60°	2.5	Cíclico
Reforça	Esquadro	30°	1.4	Monot. +
	Varão	e		Monot. -
	Braçadeira	60°		Cíclico

**2.1- Caracterização da madeira e geometria da ligação**

Procedeu-se à caracterização da madeira (Pinho bravo) utilizada nas ligações ensaiadas. Ainda na carpintaria, o Pinho foi classificado visualmente como pertencente à Classe EE, de acordo com a Norma Portuguesa NP 4305 (1995). No Laboratório, usando alguns provetes recolhidos durante a execução das ligações, foram realizados ensaios de caracterização da resistência e do módulo de elasticidade, em flexão e em compressão, na direcção paralela às fibras, segundo as instruções da EN 408 (2003). A ligação analisada pretende representar a ligação entalhada entre elementos de madeira mais frequente nas estruturas tradicionais correntes em Portugal: madeira de Pinho bravo; ângulo de abertura de 30° e 60°; dente simples sem mecha e respiga; e secção transversal de 80 x 200 mm<sup>2</sup> para a linha e para a perna, figura 1.

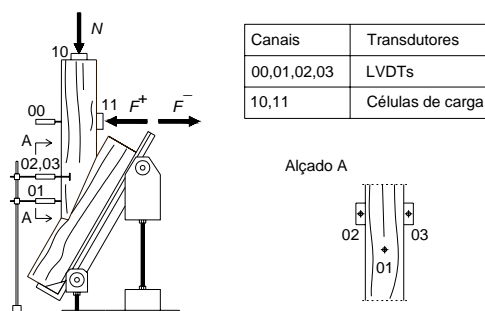
**2.2 Esquema de ensaio e instrumentação**

As ligações foram ensaiadas com recurso a dois actuadores controlados independentemente, um horizontal e um vertical. O actuador vertical, alinhado com o eixo



**Fig 1** – Geometria das ligações ensaiadas (milímetros).

da perna, permite aplicar um esforço de compressão na perna constante durante todo o ensaio, simulando o esforço axial na perna devido às cargas permanentes da cobertura. O actuador horizontal, posicionado a 70 cm em relação ao centro da ligação, permite a aplicação de forças cíclicas transversais. Os dois actuadores utilizados têm uma capacidade máxima em força de 50 e 200 kN, e um curso máximo de 160 e 50 mm, respectivamente. Ao longo do ensaio registaram-se as evoluções de força ( $F$ ) e de deslocamento ( $d$ ). O esquema geral de ensaio é apresentado na figura 2, onde se representam as células de força e os LVDT's (Linear Voltage Differential Transducers).



**Fig 2** - Esquema de ensaio e instrumentação adoptados.

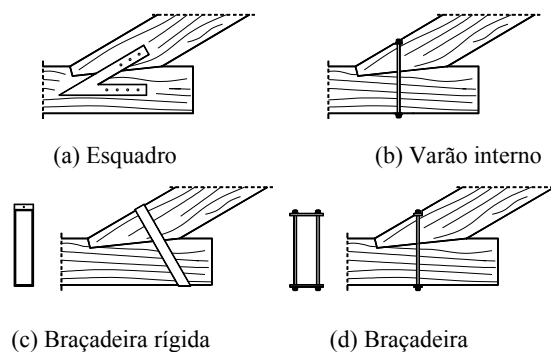
## 2.3 Procedimento de carga

Os ensaios foram controlados em deslocamento ao nível do canal 00, aplicando um deslocamento máximo de 50 mm a uma velocidade de 0.028 mm/s. Inicialmente, foi aplicada uma força de compressão na perna, que se manteve constante durante todo o ensaio. De seguida, aplicou-se a força transversal na perna, através do actuador horizontal. Convencionou-se como direcção positiva da força transversal ( $F^+$  e  $d^+$ ) aquela que corresponde à abertura da ligação, e a direcção negativa ( $F^-$  e  $d^-$ ) aquela que produz o fecho do ângulo da ligação. Nos ensaios monotónicos, após a aplicação da força de compressão na perna, impôs-se o deslocamento crescente até 50 mm na direcção pretendida. Nos ensaios cíclicos, as ligações foram submetidas a ciclos de carga e descarga, de acordo com o procedimento patente na norma EN 12512 (2001). A sequência de carregamento incluiu um ciclo na gama  $[0.25 d_e^+; 0.25 d_e^-]$ ; um ciclo na gama  $[0.50 d_e^+; 0.50 d_e^-]$ ; três ciclos na gama  $[0.75 d_e^+; 0.75 d_e^-]$ ; três ciclos na gama  $[(1+n) d_e^+; (1+n) d_e^-]$  com  $n = 0, 1, 2, \dots$ , até à rotura da ligação. O valor de referência do deslocamento elástico limite para cada direcção, positivo ( $d_e^+$ ) e negativo ( $d_e^-$ ), foi determinado com base nos resultados dos ensaios monotónicos. Nas ligações não reforçadas foram considerados dois níveis de força de compressão na perna, 25 e 44 kN, que correspondem a valores de tensão de 1.4 e 2.5 MPa, respectivamente. Estes dois níveis de tensão de compressão foram definidos com base nos resultados de análises numéricas realizadas previamente [Branco *et al.* (2005b)], para as acções permanentes (1.4 MPa) e para o Estado Limite de Utilização (2.5 MPa), de acordo com as acções preconizadas no RSA (1983).

## 2.4 - Soluções de reforço estudadas

O reforço das ligações em estruturas de madeira poderá repor o contacto entre os elementos contíguos, desunidos pela diminuição das forças de compressão e/ou pela deformação da estrutura. Em zonas de perigosidade sísmica moderada/alta, em

particular, o reforço afigura-se necessário para garantir estabilidade e adequado comportamento da ligação para as acções cíclicas. As três soluções de reforço analisadas são baseadas em técnicas tradicionais: o esquadro, o varão e a braçadeira (figura 3).



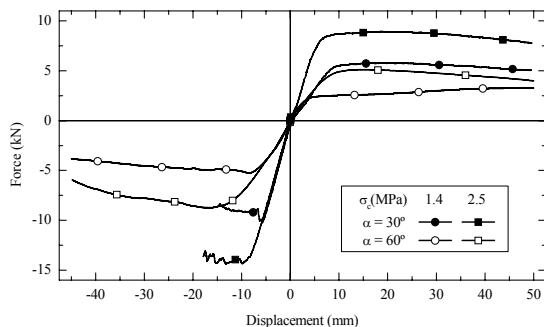
**Fig 3** - Soluções de reforço estudadas.

O uso de esquadros metálicos, aplicados nas duas faces da ligação de elementos em asnas de madeira, é uma técnica de reforço tradicional da construção portuguesa. Neste estudo, considerou-se o uso de esquadros metálicos, materializados por duas chapas soldadas, em forma de V. Cada chapa (S235 JR) tem uma largura de 50 mm e espessura de 5 mm. Os esquadros foram fixados através de parafusos de 6 mm de diâmetro. Uma solução de reforço, mais actual, consiste na inserção de um varão metálico no interior da ligação de forma a este absorver parte do momento que aí se desenvolve. O uso de um varão roscado (S235 JR) de diâmetro igual a 12 mm, colocado no interior da ligação, na direcção normal à linha foi assim estudado neste trabalho. O varão possuía em cada uma das suas extremidades uma porca para aperto a uma chapa de 5 mm de espessura (dimensões:  $70 \times 30 \text{ mm}^2$ ) colocada sobre a superfície da madeira. O uso de braçadeiras, actualmente em desuso, foi muito frequente na construção de coberturas no século XIX. Foram estudadas duas versões actualizadas desta técnica: a) ligação cintada com recurso a uma braçadeira rígida, constituída por uma cinta metálica (S235 JR) de 50 mm de largura e 5 mm de espessura, colocada na direcção normal à perna; e, b) ligação cintada realizada com

duas chapas metálicas (S235 JR), uma inferior à linha e outra superior à perna, com dimensões de  $40 \times 159 \text{ mm}^2$  e 10 mm de espessura, ligadas através de dois varões roscados de 12 mm de diâmetro. Nesta última solução, os varões de aperto nas chapas, com anilha e porca, permitem o controlo da força instalada e eventual reaperto ao longo da vida útil da ligação. A primeira solução, designada por braçadeira rígida, foi apenas analisada para o caso das ligações com ângulo de  $30^\circ$ .

### 3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

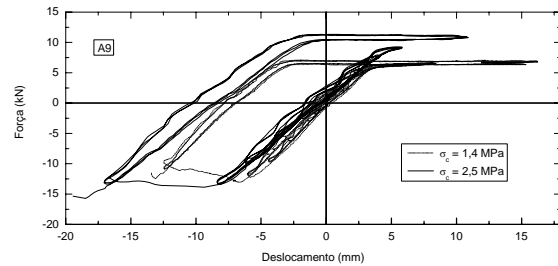
As ligações em asnas tradicionais de madeira e, particularmente, a ligação linha-perna, mesmo quando não é previsto qualquer reforço, exibem uma capacidade de transmissão de momentos significativa. Os resultados dos ensaios experimentais (figura 4) mostram que esta capacidade depende do nível de tensão de compressão na perna e do ângulo da ligação, como também de outros parâmetros como: a profundidade do entalhe [Palma *et al.* (2007)]; a largura dos elementos (perna ou linha); e o coeficiente de atrito [Parisi (2000)].



**Fig 4** – Efeito do ângulo da ligação e da tensão de compressão na perna no comportamento sob carregamento monotónico das ligações não reforçadas.

Como se esperava, as curvas força-deslocamento resultantes dos ensaios cíclicos mostram um comportamento assimétrico (figura 5). A dissipação de energia apenas ocorre quando o ângulo da ligação tende a fechar (direcção negativa). O escorregamento da perna quando puxada na direcção negativa, é o principal mecanismo responsável pela dissipação de

energia. Contudo, as curvas força-deslocamento são não-lineares em ambas as direcções. Quando se aumenta a tensão de compressão aplicada na perna (figura 5), o desenvolvimento das curvas de comportamento força-deslocamento permanece idêntico, registando-se apenas um aumento dos valores máximos da força. A energia dissipada aumenta com a tensão de compressão na perna.



**Fig 5** – Efeito da tensão de compressão na perna no comportamento cíclico de ligações não reforçadas com ângulo de  $30^\circ$

Comparando os resultados experimentais obtidos, em termos de curva força-deslocamento, das ligações não reforçadas com as ligações reforçadas, facilmente se conclui que todas as soluções de reforço estudadas são eficientes: a capacidade resistente da ligação vem substancialmente aumentada, sendo a rigidez superior, em particular na direcção positiva. Contudo, a vantagem mais importante das soluções de reforço de ligações estudadas, quando comparadas com as originais não reforçadas, é o ganho ductilidade (figura 6). O comportamento frágil das ligações não reforçadas quando o ângulo da ligação tende a fechar (direcção negativa), é transformado num comportamento tipicamente dúctil, para qualquer solução de reforço. Na direcção positiva, a solução de reforço com recurso à braçadeira é a solução menos eficiente em termos de capacidade resistente.

Na direcção negativa de carregamento, a solução de reforço menos eficiente é a que recorre à braçadeira metálica em termos de ductilidade e resistência. Na verdade, na direcção negativa, as ligações reforçadas com braçadeiras rígidas atingiram a rotura antes que o valor máximo do deslocamento imposto (50 mm) fosse

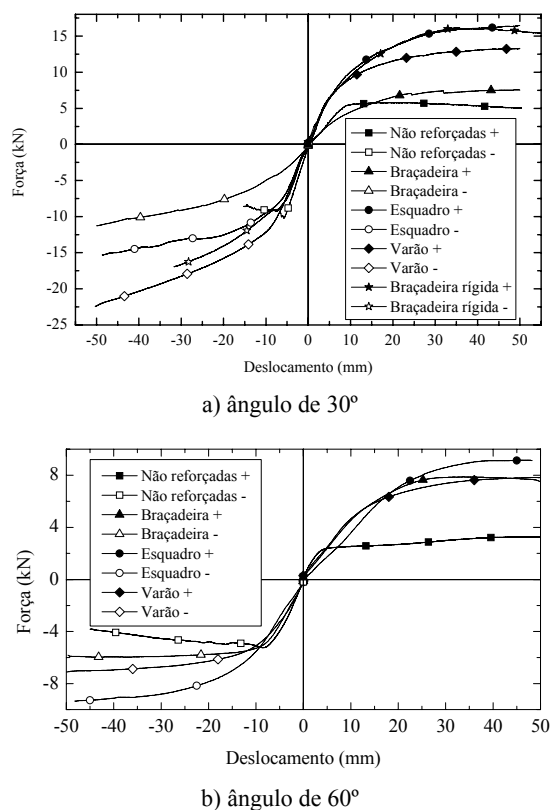


Fig 6 - Curvas força-deslocamento médias das ligações não reforçadas e reforçadas obtidas nos ensaios monotônicos ( $\sigma_c = 1.4$  MPa).

atingido. Como já foi dito, todas as soluções de reforço consideradas resultaram num melhoramento do comportamento histerético das ligações. Essa melhoria é traduzida pelo aumento substancial do coeficiente equivalente de amortecimento viscoso ( $V_{eq}$ ). O reforço não só aumentou a capacidade resistente das ligações, como garantiu também a estabilidade do comportamento das mesmas para um maior número de ciclos de carga. Com o aumento do número de ciclos com comportamento estável, maior é a capacidade de dissipação de energia ( $Ed$ ). Como exemplo, na tabela 2 e na figura 7 apresentam-se os principais resultados e as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios cíclicos de ligações com ângulo de 30 e 60°, respectivamente. As ligações foram designadas U se não reforçadas, S, B, BSR e BS se reforçadas com esquadro, varão, braçadeira rígida e braçadeira, respectivamente. O primeiro algarismo refere-se ao ângulo, 3 e 6 para 30° e 60° respectivamente, e o segundo designa a numeração dos provetes (os seis primeiros foram ensaiados monotonicamente e os três restantes foram submetidos a ensaios cíclicos).

Tabela 2 – Resultados dos ensaios cíclicos de ligações com ângulo de 30°.

Ligações		$\sigma_c$ (MPa)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$Ed$ (kJ)	$V_{eq}$ (%)
Não reforçadas		1.4	11.57	230	2.45
		2.5	17.00	380	3.96
Reforçadas	Esquadro	1.4	18.09	1859	14.57
	Varão		21.08	1877	11.28
	Braçadeira rígida		25.47	2874	6.85
	Braçadeira		11.26	554	12.83

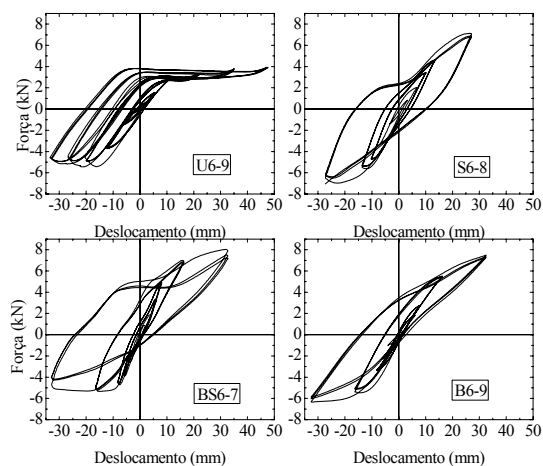


Fig 7 - Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios cíclicos para as ligações com ângulo de 60° e  $\sigma_c = 1.4$  MPa.

Na figura 8 representam-se os modos de rotura mais comuns exibidos pelas ligações reforçadas no final dos ensaios cíclicos.

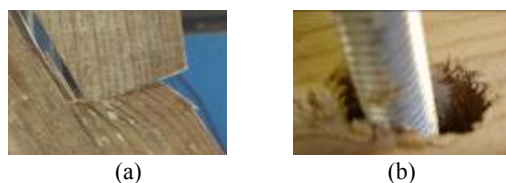


Fig 8 - Roturas mais comuns obtidas nos ensaios cíclicos das ligações reforçadas. (a) Esmagamento localizado na linha nas ligações com braçadeira (b) Flexão do varão com esmagamento localizado.

## 4 – ANÁLISE NUMÉRICA

### 4.1 – Ensaios monotônicos

Os resultados experimentais podem ser traduzidos por leis numéricas com diferentes níveis de rigor. Contudo, e normalmente por razões de custos

computacionais, são adoptadas comumente leis de comportamento global multilíneas. No caso dos ensaios monotónicos, curvas bilineares podem ser suficientes para representar o comportamento global da ligação [Parisi (1998)]. Para a sua definição, os pontos de intersecção entre os diferentes ramos deverão ser estipulados com base nas curvas experimentais momento-rotação ( $M-\phi$ ). Para tal, os seguintes parâmetros devem ser definidos (figura 9):

- rigidez inicial  $k_0^+$  (campo positivo, abertura do ângulo) e  $k_0^-$  (campo negativo, fecho do ângulo);
- valores máximos para o momento e rotação, determinados a partir das curvas  $M-\phi$  dos ensaios monotónicos, para o campo positivo e campo negativo ( $M_u^+, M_u^-, \phi_u^+, \phi_u^-$ );
- o valor do momento e da rotação correspondentes ao ponto de cedência (transição entre o comportamento elástico e plástico),  $M_y^+, M_y^-, \phi_y^+, \phi_y^-$ .

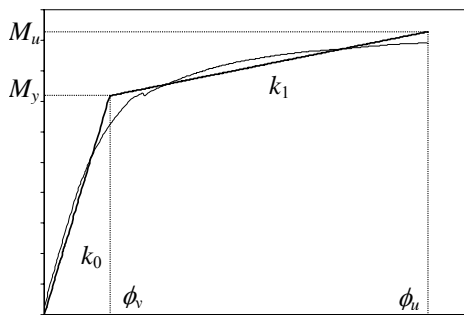
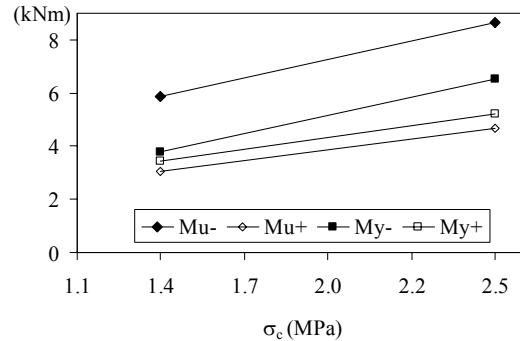


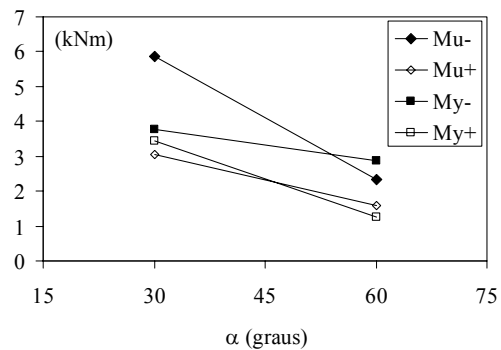
Fig 9 – Definição dos parâmetros do modelo global adoptado para simulação do comportamento das ligações.

A EN 12512 (2001) sugere dois métodos distintos, de acordo com a forma da curva experimental, para a obtenção destes parâmetros necessários à definição da lei bilinear. No entanto, em vez de recorrer a estes métodos, optou-se pela melhor aproximação bilinear à curva experimental, o que garante o menor erro em termos de energia dissipada. Nas ligações analisadas, ligações entalhadas não reforçadas, cujo comportamento depende do atrito entre os elementos ligados, os valores de  $M_u$  e  $M_y$  são função

da tensão de pré-compressão na perna e do ângulo da ligação (o ângulo do entalhe e, conseqüentemente, o ângulo entre os esforços internos e as fibras deriva do ângulo da ligação), figura 10.



a) influência do nível de compressão na perna



b) influência do ângulo da ligação

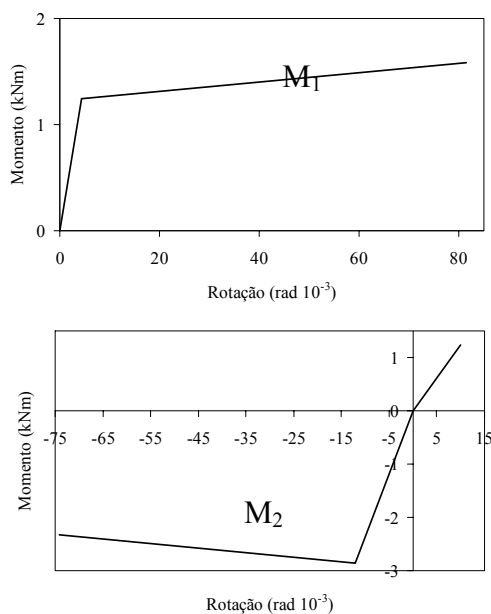
Fig 10 – Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo semi-rígido adoptado para os ensaios monotónicos.

#### 4.2 – Ensaio cíclicos

É possível simular o comportamento das ligações estudadas, quando solicitadas por acções cíclicas, recorrendo à linearização das curvas  $M-\phi$ . Na bibliografia podem-se encontrar algumas propostas de modelos histeréticos para as ligações de madeira, como por exemplo: [Kivell *et al.* (1981), Stewart (1987), Dolan (1989), Ceccotti (1990) e Parisi (1998)]. No entanto, apenas o último se refere a ligações tradicionais de madeira.

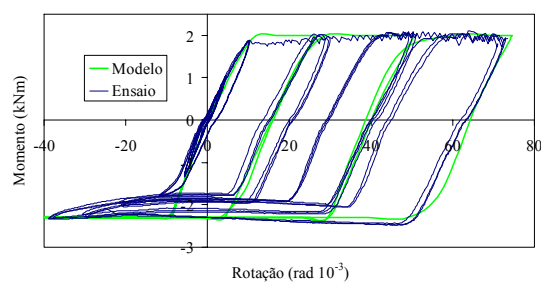
Na modelação dos ensaios cíclicos recorreu-se ao programa de elementos finitos SAP2000, através de um modelo simples de elementos de barra com comportamento linear, onde toda a não-linearidade é admitida concentrada em

elementos localizados nas extremidades do tipo *Nlink*. Nestes elementos concentrou-se o comportamento não-linear observado nos ensaios, com recurso a leis de comportamento bilinear um conjunto de regras de histerese. Para a correcta simulação do comportamento histerético foi necessário usar dois *Nlink* associados em série ( $M_1$  e  $M_2$ ), figura 11.



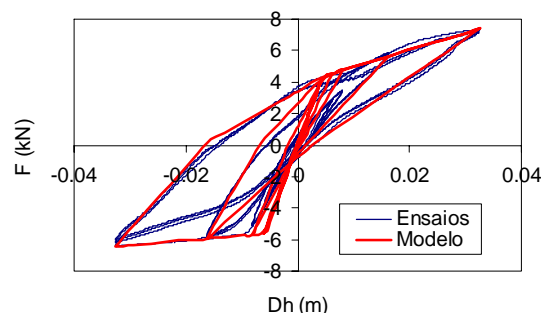
**Fig 11** – Comportamento atribuído aos *Nlink*.

A um deles atribuiu-se um comportamento multilinear plástico e ao outro um comportamento multilinear elástico. Ao primeiro, atribuiu-se ainda um comportamento histerético do tipo *kinematic*. No processo de calibração foi necessário atribuir à ligação uma rigidez axial de 4000 kN/m. Na figura 12 apresenta-se o confronto entre os resultados obtidos com o modelo numérico e os resultados experimentais, para o caso das ligações não reforçadas com ângulo de 60°.



**Fig 12** – Ligação não reforçada: Curva força-deslocamento (modelo numérico e ensaio experimental).

De forma análoga, procedeu-se à modelação das ligações reforçadas ensaiadas. Como exemplo, na figura 13 apresentam-se para as ligações com um ângulo de 60° reforçadas com varão, a comparação entre as curvas força-deslocamento obtidas experimentalmente e numericamente.



**Fig 13** – Ligação reforçada: Curva força-deslocamento (modelo numérico e ensaio experimental).

## 5 – CONCLUSÕES

As ligações de asnas tradicionais de madeira, mesmo quando não é previsto qualquer reforço, exibem uma capacidade de transmissão de momentos não desprezável. Os resultados de uma série de ensaios experimentais mostram que esta capacidade depende do nível de tensão de compressão na perna e do ângulo da ligação. A campanha experimental realizada foi importante para a compreensão do comportamento real das ligações tradicionais de madeira, permitindo evidenciar os mecanismos presentes, salientar os parâmetros mais relevantes, verificar os modos de rotura e identificar possíveis formas de reforço.

O reforço das ligações tradicionais, normalmente executado pela adição de elementos metálicos, é indispensável para assegurar o comportamento estável destas, em particular, quando sujeitas a solicitações sísmicas, podendo surgir inversão de esforços na ligação. Todas as soluções de reforço analisadas, que representam versões actuais de técnicas tradicionais, revelaram-se eficientes no melhoramento do comportamento global da ligação. Além das ligações reforçadas exibirem maior capacidade resistente e

rigidez, apresentam uma melhoria substancial na ductilidade. Garantiram ainda a estabilidade das ligações para um maior número de ciclos de carga, resultando numa melhoria significativa da capacidade de dissipação de energia, traduzido num aumento considerável do coeficiente equivalente de amortecimento viscoso.

Com base nos resultados experimentais obtidos, sobre provetes à escala real de ligações tradicionais de madeira, foi implementado e calibrado um modelo global simplificado para a simulação do comportamento cíclico e histerético destas ligações.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o apoio concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através da atribuição da bolsa SFRH/BD/18515/2004. A investigação apresentada insere-se no projecto de investigação POCI/ECM/56552/2004 financiado pela FCT.

## REFERÊNCIAS

- Branco, J.M., Cruz, P.J.S., Piazza, M. e Varum, H., Experimental Analysis of Birdsmouth Joints. Report E-11/05. DECivil, University of Minho, 2005, 49 p.
- Branco, J.M., Cruz, P.J.S., Piazza, M. e Varum, H., Asnas Tradicionais de Madeira. Comportamento estático e dinâmico de asnas simples. Relatório E-19/05. DECivil, Universidade do Minho, 2005, 50 p.
- Ceccotti, A. e Vignoli, A., Engineered timber structures: An evaluation of their seismic behaviour, in Proceedings, 1990 International Timber Engineering Conference, Tokyo, Japan, pp. 946-953.
- Dolan, J.D., The dynamic response of timber shear walls, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1989.
- EN 408:2003, Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. CEN, European Committee for Standardization.
- EN 12512:2001, Timber structures. Test methods – cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. CEN, European Committee for Standardization.
- Kivell, B.T., Moss, P.J. e Carr, A.J., Hysteretic modelling of moment resisting nailed timber joints, Bull. New Zeal. Nat. Soc. Earthquake Engineering, 14(4) (1981) 233-245.
- NP 4305:1995, Structural maritime pine swan timber – Visual grading, CT 14 LNEC.
- Palma, P., Cruz, H., Oliveira, F.P. e Morais, P.G., Sistema para ensaio de ligações estruturais em madeira. ICM 2007 - A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, 5 de Novembro de 2007, LNEC, Lisboa.
- Parisi, M.A. e Piazza, M., Seismic behaviour and modelling of traditional timber roof structures, Proceedings, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, 1998.
- Parisi, M.A e Piazza, M., Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections. J Struct Engrg.. ASCE, 2000, 126(12): 1395–1403.
- RSA, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Dec. – Lei n.º 235/83. Casa da Moeda. 31 Maio, 1983.
- Stewart, W.G., The seismic design of plywood sheathed shear walls, Ph.D. thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1987.