

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LIGAÇÕES MADEIRA-BETÃO ENTALHADAS COLADAS

Monteiro, S.R.S.¹; Dias, A.M.P.G.²; Negrão, J.H.J.O.³

¹Assistente, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil

²Prof. Auxiliar, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil

³Prof. Associado, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil



RESUMO

Neste trabalho são analisadas ligações madeira-betão realizadas com entalhes, obtidas por colagem de tacos no elemento estrutural de madeira (entalhes colados). Este tipo de ligação é bastante eficiente uma vez que, sendo económico, permite níveis de rigidez bastante altos, complementados com resistências compatíveis. A fim de avaliar o comportamento das ligações entalhadas adoptaram-se dois tipos de abordagem, experimental e numérica. Para tal levou-se a cabo um conjunto de ensaios experimentais de corte de curta duração em provetes mistos ligados através de entalhes colados. Na realização destes ensaios consideraram-se como variáveis de estudo o tipo de madeira que constituía o taco, a largura e a espessura do mesmo. Paralelamente foram desenvolvidos modelos numéricos 3D validados com base em resultados experimentais disponíveis. Os resultados experimentais e numéricos obtidos são apresentados e analisados.

1- INTRODUÇÃO

1.1- Enquadramento

Ao longo do último século tem-se verificado o aparecimento de novas combinações de materiais, nomeadamente, madeira e betão. A madeira unida com o betão, permite beneficiar do comportamento eficaz do betão à compressão e do comportamento eficaz da madeira à tracção. Esta combinação tem por base o mesmo princípio do betão armado, e conduz à obtenção de uma solução mista com características estruturais superiores às obtidas com a utilização de uma secção equivalente de qualquer um dos materiais em separado.

Idealmente, a geometria da secção deve ser tal que o eixo neutro da secção mista se situe na interface madeira-betão, quando a estrutura estiver sujeita a flexão. Desta forma os dois materiais podem funcionar eficientemente: a madeira à tracção e o betão à compressão.

Para unir os elementos de madeira e de betão existem vários tipos de ligações com comportamentos mecânicos bastante distintos, que podem conduzir a soluções com interacção parcial (ligações semi-rígidas) ou com interacção perfeita e escorregamento nulo (ligações rígidas). Nos elementos mistos madeira-betão um dos aspectos mais importantes a ter em

conta é a ligação entre os dois materiais, pois o comportamento mecânico da ligação está intimamente relacionado com as tensões e as deformações globais no elemento misto.

No caso de ligações semi-rígidas, o escorregamento não pode ser desprezado. Tal deve-se ao facto do estabelecimento de ligação ocorrer à custa de escorregamento entre as superfícies ligadas e da consequente sollicitação dos ligadores ao corte. Por conseguinte, as secções não se mantêm planas após a deformação, pelo que os modelos de cálculo a considerar devem ter esse facto em conta, implicando que não seja possível aplicar a teoria de flexão de vigas ao elemento misto. Contudo, é possível aplicá-la a cada um dos componentes individualmente, tal como é feito nos modelos analíticos normalmente usados em dimensionamento, ex: modelo do Anexo B da EN 1995-1-1 (2004) (Eurocódigo 5, Parte 1-1).

Cada ligação é essencialmente caracterizada pela respectiva curva carga-deslocamento, da qual se obtêm as propriedades consideradas representativas do seu comportamento: resistência (capacidade de carga da ligação) e rigidez (módulo de escorregamento do ligador). Assim, no dimensionamento de estruturas mistas com este tipo de ligação as propriedades mais importantes a considerar são: a resistência, a rigidez e os coeficientes de fluência, da madeira, do betão e da ligação.

Uma ligação eficiente deve garantir a transmissão de esforços de corte entre a madeira e o betão com um escorregamento mínimo entre os dois.

Aquando da concepção de um pavimento misto deste tipo, segundo Dias (2005), a situação ideal passaria por utilizar a curva carga-deslocamento real da ligação. Regra geral, tal não é possível, existindo necessidade de adoptar soluções aproximadas, que consistem na utilização de alguns parâmetros obtidos das curvas completas, geralmente, a capacidade de carga e a rigidez. O comportamento

mecânico das ligações e, consequentemente, os parâmetros das curvas carga-deslocamento, podem ser obtidos experimentalmente, destacando-se os ensaios de corte de curta duração baseados, por exemplo, na EN 26891 (1991), para a avaliação do comportamento de curto prazo e os ensaios de longa duração, para avaliação do comportamento a longo prazo.

1.2- Objectivos

O trabalho desenvolvido teve como objectivo principal a avaliação experimental e numérica do comportamento mecânico de ligações madeira-betão realizadas com ligações entalhadas com taco colado.

Para tal, realizaram-se quatro séries de ensaios experimentais em ligações mistas madeira-betão entalhadas com taco colado no elemento de madeira, em que se alteraram quer as dimensões quer o material constituinte do taco. Estes ensaios destinaram-se ao estudo da influência destes parâmetros no comportamento mecânico das ligações realizadas com este sistema. A fim de avaliar numericamente o comportamento mecânico deste tipo de ligação desenvolveram-se também modelos numéricos, validados com base em resultados de ensaios experimentais disponíveis.

2- ABORDAGEM EXPERIMENTAL

No âmbito da investigação do comportamento de ligações entalhadas com tacos colados, realizou-se um conjunto de ensaios experimentais de corte de curta duração em provetes mistos unidos por este tipo de ligação.

Os espécimes ensaiados eram compostos por um elemento central de betão ligado lateralmente a dois elementos de madeira, através de um entalhe, materializado por um taco colado ao elemento de madeira em cada um dos planos de corte, Fig. 1.

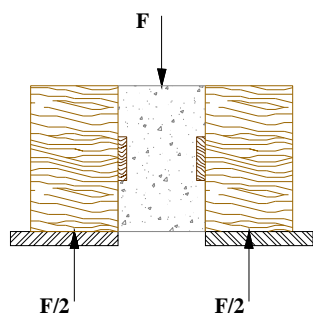


Fig. 1 – Esquema dos provetes ensaiados

Os ensaios foram realizados tendo por base a história de carga definida pela norma EN 26891 (1991). Para tal utilizou-se como estimativa para a capacidade de carga da ligação, F_{est} , o valor inicial de 59,5kN. Este foi obtido com base em ensaios realizados anteriormente.

2.1- Materiais e preparação dos provetes

Todos os provetes ensaiados eram constituídos por elementos de madeira lamelrada colada de Espruce, com lamelas classificadas como C18 segundo a EN 338 (2003), e por um elemento de betão da classe C25/30 de acordo com a classificação da EN 1992-1-1 (2004) (Eurocódigo 2, Parte 1-1). Aquando da betonagem, foi colada na superfície dos elementos estruturais de madeira que ficaria em contacto com o elemento de betão uma película fina de plástico, de modo a isolar a madeira da penetração da humidade do betão fresco e a diminuir o atrito entre os materiais ligados. A cada elemento de madeira foi colado um taco de madeira utilizando resina epoxídica ICOSIT K 101, da empresa Sika.

Além de serem compostos por materiais diferentes, os tacos também apresentavam dimensões distintas. Essas dimensões e as dos restantes componentes dos provetes ensaiados podem ser consultadas nas Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4. Para a constituição dos tacos utilizou-se Pinho bravo e Carvalho americano. Foram assim constituídas quatro séries de cinco provetes cada, identificadas com base no material e nas dimensões do entalhe de ligação, são elas, segundo a ordem por que foram ensaiadas:

- Pinho 100mmx100mmx15mm;

- Pinho 140mmx100mmx15mm;
- Pinho 100mmx100mmx20mm; e
- Carvalho 100mmx100mmx15mm.

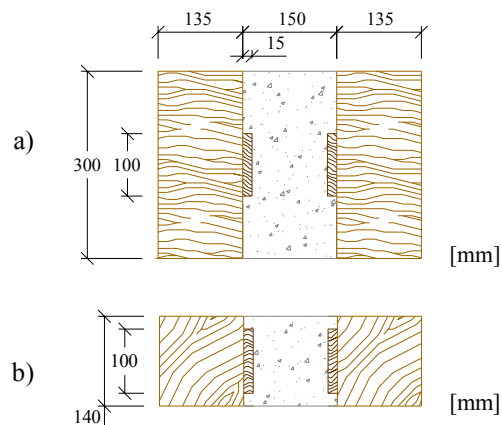


Fig. 2 – Dimensões dos elementos que compõem os provetes das séries Pinho 100mmx100mmx15mm e Carvalho 100mmx100mmx15mm: a) alçado; b) planta

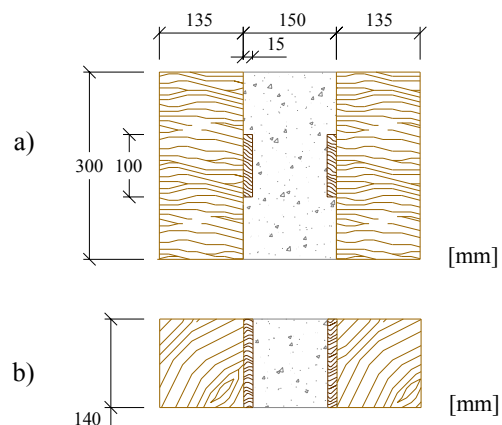


Fig. 3 – Dimensões dos elementos que compõem os provetes Pinho 140mmx100mmx15mm: a) alçado; b) planta

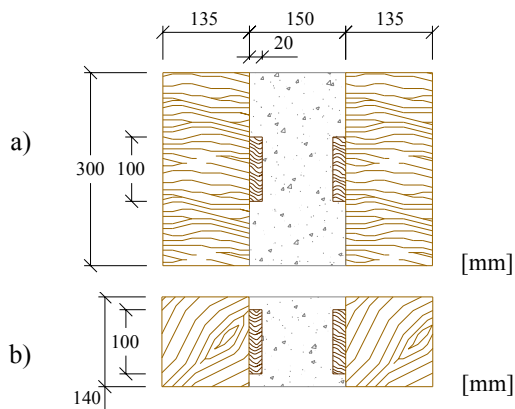


Fig. 4 – Dimensões dos elementos que compõem os provetes Pinho 100mmx100mmx20mm: a) alçado; b) planta

Antes de ensaiar cada um dos provetes foi removida a calda de cimento solidificada sobre a interface madeira-betão, de modo a não existir aí transmissão de carga. Teve-se especial atenção à escolha da face de betão em que eram aplicadas as cargas, optando por aquela que apresentasse menos imperfeições.

Os LVDT (Linear Voltage Displacement Transducer) utilizados para monitorizar as deformações foram solidarizados aos elementos de madeira através de bases magnéticas colocadas sobre chapas de aço em forma de “L” aparafusadas à madeira. Estas foram colocadas a um nível correspondente à meia-altura de cada provete (150mm) e a base foi colocada sobre a sua superfície horizontal com o eixo a 50mm da face do elemento de betão. A medição dos deslocamentos foi feita a 20mm da face do elemento de betão, no caso das primeira, terceira e quarta séries, e a 30mm no caso da segunda série, para que as chapas que serviram de batente à haste dos LVDT, não entrassem em contacto com o taco de madeira, uma vez que nesta série a face lateral do taco fazia parte da face exterior do provete.

O provete foi ainda dotado de um “sistema de confinamento” cujo objectivo era limitar a separação entre a madeira e o betão, evitando a possibilidade de ocorrência de uma rotura precoce. Este era constituído por duas peças metálicas de 260mmx55mmx50mm, cada uma com dois orifícios onde foram colocados dois varões roscados de 10mm de diâmetro. Estas peças foram ajustadas aos elementos de madeira através de quatro porcas metálicas.

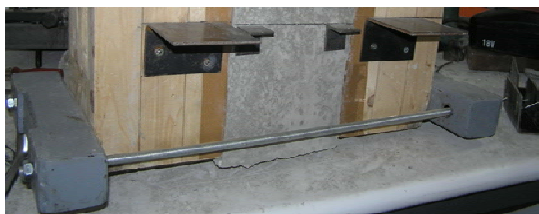


Fig. 5 – Pormenor das chapas de aço em “L” e do “sistema de confinamento” no provete

Uma vez que este sistema não se destinava a apertar uns elementos contra os

outros, existiu um especial cuidado aquando da sua colocação, para que as porcas não fossem apertadas introduzindo esforço na madeira, mas apenas ajustadas.

2.2- Dispositivo experimental

Para proceder à aplicação do carregamento foi utilizada uma máquina universal de 20tf programada com uma história de carga de acordo com a norma EN 26891 (1991). Para tal o pistão da mesma exerceu pressão sobre duas chapas de aço de 100mmx100mmx20mm e 120mmx120mmx20mm, fazendo a última a transferência da carga à superfície do elemento de betão.

Foram usados quatro LVDT com curso máximo de 25mm, bem como, quatro bases magnéticas para suporte dos mesmos aquando da medição dos deslocamentos.

Para a recolha e armazenamento da informação associada a cada ensaio utilizou-se uma unidade de aquisição de dados, *Datalogger* da TML, Modelo 602.

Durante os ensaios os elementos de madeira estiveram assentes sobre uma estrutura de apoio rígida saliente.

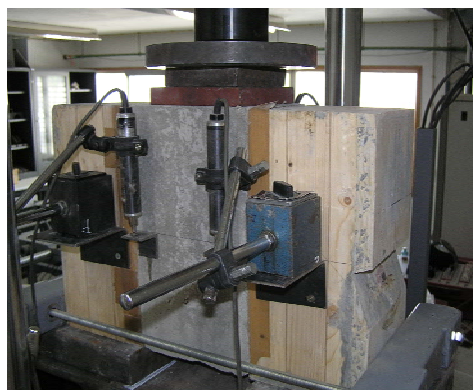


Fig. 6 – Provette colocado na máquina, dotado dos dispositivos de recolha de dados, pronto a ser ensaiado

2.3- Resultados experimentais

O gráfico da Fig. 7 representa a forma genérica do comportamento de cada série de provetes ensaiada, através da apresentação de uma curva representativa de cada uma. Esta curva foi obtida tendo em conta o valor dos deslocamentos e cargas médias obtidos para cada provete.

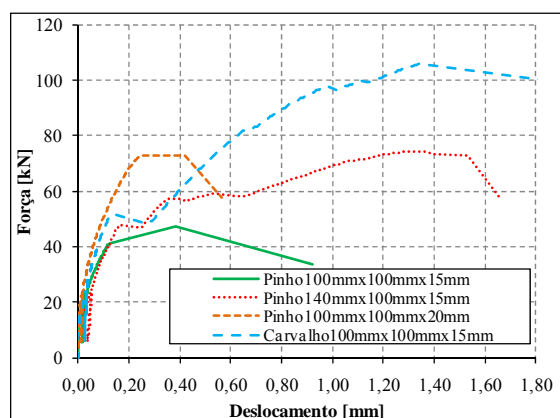


Fig. 7 – Gráfico representativo do comportamento de cada série de provetes

Tabela 1 – Valores médios da capacidade de carga, rigidez, deslocamento máximo e deslocamento último obtidos para cada uma das séries ensaiadas

Série	$F_{máx}$ (kN)	K_s (kN/mm)	$\delta_{máx}$ (mm)	δ_{ult} (mm)
Pinho 100mmx100mm x15mm	72,6	393,5	1,26	2,05
Pinho 140mmx100mm x15mm	80,9	362,1	2,96	7,89
Pinho 100mmx100mm x20mm	96,8	513,2	0,93	1,20
Carvalho 100mmx100mm x15mm	127,9	305,9	3,72	4,18

A Tabela 1 apresenta os valores médios da capacidade de carga ($F_{máx}$), rigidez (K_s), deslocamento máximo ($\delta_{máx}$) e deslocamento último (δ_{ult}), obtidos para cada uma das séries de provetes. Destas grandezas apenas a rigidez da ligação não é obtida directamente do gráfico carga-deslocamento do ensaio. A capacidade de carga da ligação é a carga máxima suportada pela ligação durante o ensaio, o deslocamento máximo é o deslocamento verificado quando se atinge a carga máxima e o deslocamento último é o deslocamento verificado aquando da rotura do provete. Já a rigidez da ligação corresponde ao declive da recta que une os pontos em que se atingem, pela primeira vez, 10% e 40% da capacidade de carga, Eq. (1).

$$K_s = \frac{3}{4} \cdot \frac{0,4 \cdot F_{máx}}{\delta_{04} - \delta_{01}} \quad (1)$$

onde $F_{máx}$ é a capacidade de carga da ligação, δ_{01} é o deslocamento associado ao primeiro ponto onde se atinge 0,1 $F_{máx}$ e δ_{04} é o deslocamento associado ao ponto onde se atinge 0,4 $F_{máx}$.

A EN 26891 (1991) indica uma fórmula para o cálculo da rigidez da ligação que se distingue da Eq. (1) por utilizar o valor estimado da capacidade de carga, F_{est} , em vez de $F_{máx}$, capacidade de carga efectivamente medida no ensaio.

2.4- Análise dos resultados

Da análise dos resultados experimentais puderam observar-se, entre os provetes das quatro séries, comportamentos distintos em alguns aspectos mas semelhantes noutros.

De uma maneira geral, todas as séries apresentaram um comportamento bastante frágil. O valor médio da capacidade de carga das ligações, considerando todos os ensaios, foi de 94,5kN, enquanto o valor médio da rigidez foi de 387,44kN/mm. Estes valores mostram que as ligações ensaiadas têm uma rigidez e capacidade de carga que pode ser considerada elevada quando comparada com os mesmos parâmetros para outras ligações madeira-betão com elementos de madeira de secções semelhantes.

Os provetes da série Carvalho100mmx100mmx15mm foram aqueles que apresentaram maior resistência ao corte, *i.e.*, maiores valores para a capacidade de carga. O valor médio obtido para esta série foi de 127,9kN. Por oposição, os provetes da série Pinho100mmx100mmx15mm foram aqueles que apresentaram os menores valores para $F_{máx}$, com um valor médio de 72,6kN. Estes resultados, associados com o facto de a rotura de todos os provetes da série Carvalho100mmx100mmx15mm ocorrerem no betão, podem ser consequência do uso de uma madeira com maior resistência ao corte, conduzindo a

maiores resistências das ligações mas aumentando a probabilidade de rotura no betão.

Relativamente à rigidez da ligação, avaliada através do módulo de escorregamento da ligação, K_s , os resultados mostram a série Pinho100mmx100mmx20mm como aquela que apresenta o maior valor médio, 513,2kN/mm, por oposição aos valores da série Carvalho 100mmx100mmx15mm, com uma rigidez média de 305,9kN/mm.

Na série com o taco de 20mm de espessura verificou-se a existência de roturas mais frágeis dos provetes, não chegando a formar-se fendas visíveis no elemento de betão. Tal pode dever-se ao facto de o taco ser mais espesso, e consequentemente, resultar numa menor concentração de tensões. A série Pinho100mmx100mmx20mm foi aquela que apresentou o menor valor médio para o deslocamento na rotura (0,93mm).

De referir que em algumas séries se verificaram alguns problemas de leituras que resultaram na medição de deslocamentos médios negativos até níveis de carga relativamente elevados. Tal resultou numa sobrestimação irrealista dos valores obtidos para a rigidez.

3- ABORDAGEM NUMÉRICA

A fim de prever e modelar o comportamento mecânico das ligações madeira-betão entalhadas foram utilizados modelos numéricos baseados em elementos finitos. Para tal, foi necessário ter em conta fenómenos de comportamento material considerando o comportamento elástico dos materiais, bem como alguns aspectos do seu comportamento não-linear, e a interacção entre os materiais considerando contacto com atrito. Dado o comportamento predominantemente elástico linear dos materiais em causa, a modelação centrou-se essencialmente na fase elástica linear do comportamento das ligações.

3.1- Modelações numéricas

O primeiro tipo de ligação modelada foi a correspondente ao corte duplo de um provete composto por dois elementos de madeira e um elemento central de betão ligados através de entalhes em contraplacado densificado (densified veneer wood - dvw), sem camada intermédia (c.i.), Monteiro (2009), e serviu para validar o modelo numérico. O dvw é um material composto por camadas de madeira coladas sob pressão, dispostas de forma que as fibras numa camada sejam perpendiculares às das camadas imediatamente acima e abaixo.

A obtenção do modelo considerado como final teve por base um processo iterativo de definição de propriedades materiais, malhas e cálculos numéricos, tendo sido validado com base em resultados de ensaios experimentais existentes, Dias (2005).

Depois de se ter procedido ao cálculo numérico do modelo final puderam obter-se os deslocamentos em função do carregamento aplicado, e consequentemente, a rigidez da ligação. Para tal foram tidos em conta os locais onde as medições experimentais haviam sido recolhidas. Os resultados obtidos foram comparados com algumas curvas carga-deslocamento experimentais, nomeadamente, a correspondente à maior rigidez, à menor rigidez e aquela com rigidez mais próxima do valor da média aritmética, tendo o modelo permitido a obtenção de resultados dentro do leque de variação dos resultados experimentais. A diferença entre o valor da rigidez da ligação obtido numericamente, 328,84kN/mm, e a rigidez média experimental, 304,8kN/mm, é de aproximadamente 7,31%.

No seguimento da validação do modelo procedeu-se à modelação do comportamento dos provetes cujos resultados experimentais foram apresentados anteriormente.

Uma vez que o provete em consideração apresenta dois planos de

simetria, apenas se procedeu à modelação de um quarto do mesmo no *software*. Partindo da modelação obtida para o provete com taco em dvw sem c.i. procedeu-se à alteração da geometria de cada provete conforme o exposto nas Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4. As condições de apoio utilizadas na definição do modelo correspondem às reais, e estão definidas para o exemplo da série de provetes Pinho140mmx100mmx15mm na Fig. 8. Na sua definição foi considerada não só a existência de simetria mas também a inexistência de deslocamento horizontal na base do elemento de madeira durante o ensaio.

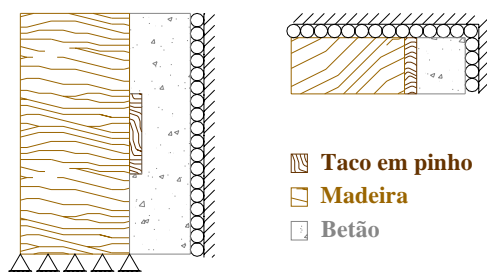


Fig. 8 – Condições de apoio utilizadas na modelação da série de provetes Pinho140mmx100mmx15mm

Na definição da geometria do provete, não se considerou o entalhe como uma parte independente colada à superfície de madeira, mas sim como pertencente a essa parte. Para tal definiu-se uma partição que permitiu a diferenciação material entre o elemento de madeira propriamente dito e o taco. Esta opção tornou mais célere, não só a definição do modelo, mas também o tempo de cálculo, uma vez que diminuiu o número de parâmetros envolvidos. Contudo, ela só pôde ser adoptada pois a cola, desde que adequada à ligação dos dois materiais em causa e sendo aplicada convenientemente, apresenta uma elevada resistência ao corte. Tal como ficou demonstrado nos ensaios experimentais.

A malha de elementos finitos utilizada foi definida de forma semelhante à usada na modelação que serviu de base, tendo em conta a obtenção de um modelo que requeresse o menor tempo de cálculo sem prejuízo para a precisão dos resultados.

Com base na existência de zonas do provete em que se previa concentração de tensões de contacto definiram-se elementos finitos de menores dimensões a fim de melhor caracterizar os fenómenos aí ocorridos. As dimensões dos restantes elementos que constituem a malha foram definidas de forma a obter uma evolução entre as zonas com a malha mais fina e as zonas com malha mais grosseira. Esta “operação” foi desenvolvida ao longo do eixo X, Fig. 9, tendo-se adoptado uma divisão uniforme segundo o eixo Y de 8,33mm e segundo o eixo Z de 5,00mm.

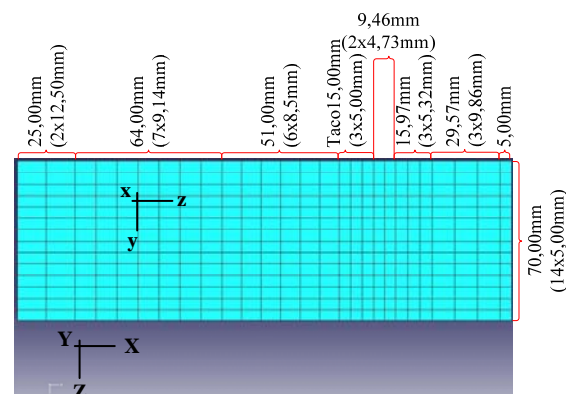


Fig. 9 – Identificação das zonas de discretização e das dimensões da malha de elementos finitos do provete no plano XZ

Depois de analisar os tipos de elementos finitos de que o *software* dispunha, assim como o tipo de integração que podia ser utilizada optou-se por modelar o provete utilizando elementos finitos do tipo hexaédrico linear de oito nós, com integração reduzida (1 ponto de integração). Esta escolha concorda com a recomendação dos manuais de utilização do *software Abaqus* (2007) para o tipo de modelação desenvolvida (problema com contacto).

Na definição das características materiais considerou-se a madeira como material ortotrópico. No que respeita à madeira do elemento estrutural consideraram-se para a sua definição as propriedades correspondentes à madeira da classe utilizada na fabricação dos provetes, Espruce da classe C18 segundo EN 338 (2003), adoptando as relações indicadas nessa norma para os módulos de elasticidade e de distorção. Quanto aos

coeficientes de Poisson, estes foram definidos com base nas propriedades tabeladas no Wood Handbook (1999) para o Espruce marítimo (*Pinus sitchensis*), nos módulos de elasticidade e nos módulos de distorção, garantindo a ortotropia do material, Dias da Silva (2004).

No caso da madeira dos tacos, foi necessário definir as propriedades do Pinho bravo e do Carvalho americano, para as correspondentes séries modeladas. No caso da madeira de pinho, uma vez que não se conhecia a classe a que pertencia optou-se por realizar um conjunto de duas modelações considerando que numa se tratava de madeira da classe E e noutra que se tratava de madeira da classe EE, classes definidas segundo a norma NP 4305 (1995). Com estas duas modelações consideraram-se as situações limites em termos de propriedades da madeira. No caso da madeira de carvalho, uma vez que também esta espécie não estava classificada para aplicações estruturais, considerou-se como sendo Carvalho branco, tendo-se assumido as propriedades tabeladas no Wood Handbook (1999) para essa madeira (*Oak, White*).

Quanto aos coeficientes de Poisson adoptaram-se os mesmos valores que na definição do elemento de madeira uma vez que esta propriedade mostrou ter pouca influência no resultado final da modelação.

O betão por sua vez foi considerado como material isotrópico com propriedades elásticas correspondentes à de um betão classificado como C25/30, de acordo com a classificação da EN 1992-1-1 (2004), tendo-se utilizado os valores tabelados nesta referência.

Tanto para o betão como para os materiais dos tacos foi definido comportamento elasto-plástico, uma vez que se esperava que, tanto o elemento de betão como o taco estivessem sujeitos a concentrações de tensões significativas na zona de contacto que pudessem conduzir a cedências localizadas no material. Para tal, assumiu-se uma aproximação bastante simplificada, tendo sido definida uma

relação tensão-extensão bilinear (comportamento elasto-plástico perfeito), com uma superfície de cedência de Von Mises. Esta simplificação considerou-se adequada uma vez que a finalidade essencial do estudo em curso, nomeadamente, a avaliação da rigidez das ligações entalhadas tem lugar para zonas em que ocorrem regimes elásticos dos materiais. A definição do comportamento não-linear teve como objectivo essencial identificar zonas de ocorrência de deformações plásticas e limitar as tensões máximas. O modelo desenvolvido permitiu caracterizar correctamente o regime elástico do comportamento das ligações em estudo, limitando as tensões máximas nos materiais aos valores definidos.

Para definir as tensões de cedência associadas às espécies que constituíam os tacos procedeu-se, no caso do pinho, ao cálculo do valor médio da tensão de compressão com base no valor característico desta propriedade. Para tal recorreu-se à relação entre o valor médio e o valor característico, assumindo uma distribuição normal,

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot s \quad (2)$$

onde f_{ck} é o valor característico da tensão resistente à compressão, f_{cm} é o valor médio da tensão resistente à compressão e s é o desvio padrão.

O valor característico da tensão resistente à compressão para as duas classes de Pinho bravo foi obtido da especificação do LNEC, Madeira para construção, M2 (1997), enquanto o desvio padrão para as características da espécie em questão (20%) foi obtido com base no Wood Handbook (1999). No caso do Carvalho branco, o valor da tensão resistente à compressão médio foi obtido do Wood Handbook (1999), para a respectiva espécie. As tabelas seguintes, Tabela 2 a Tabela 6, resumem as propriedades adoptadas para caracterizar os vários materiais dos provetes modelados, nomeadamente: o módulo de elasticidade ao longo do eixo i (E_i), o coeficiente de Poisson para deformações

ao longo do eixo j causadas por tensão ao longo do eixo i (v_{ij}), o módulo de distorção baseado na extensão no plano ij e nas tensões nos planos iz e jz (G_{ij}) e a tensão resistente à compressão (f_{cm}). Para o efeito considerou-se que os eixos locais x , y e z correspondiam, respectivamente, aos eixos longitudinal, tangencial e radial das peças de madeira utilizadas.

A interação entre materiais foi definida através de duas propriedades de contacto, normal e tangencial. A primeira foi definida através da opção “*Hard contact*” do *software* enquanto que para a segunda se seleccionou a formulação do atrito como “*Penalty*” assumindo um coeficiente de atrito madeira-betão de $\mu = 0,55$, com base nos estudos de Dias (2004) e Dias (2005). Esta formulação garante que, até se atingir a tensão tangencial crítica, as superfícies em contacto não sofram um deslocamento superior ao definido como deslocamento elástico máximo. A força de corte aplicada durante o ensaio de corte duplo foi modelada através da aplicação de uma força crescente de 0kN até um determinado valor, no topo do elemento de betão sob a forma de carregamento distribuído. O valor em questão foi definido com base na capacidade de carga de cada ligação em estudo, *i.e.*, considerando os valores obtidos experimentalmente para a carga máxima da ligação, em cada série de provetes, dividido por quatro, uma vez que apenas está em análise um quarto de provete. A Tabela 7 resume os valores utilizados como carregamento de cada uma das séries.

Tabela 2 – Características materiais da madeira (segundo os eixos locais)

Módulos de Elasticidade (GPa)		Coeficientes de Poisson (-)	Módulos de Distorção (GPa)	
E_x	9,00	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0,75$	$G_{xy} = G_{xz} = 0,29$	
$E_y = E_z$	0,30	$\nu_{yx} = \nu_{zx} = 0,03$	$G_{yz} = 0,02$	

Tabela 3 – Características do Pinho bravo, Classe E, utilizado para o taco nas modelações dos provetes ensaiados no DEC-FCTUC (segundo os eixos locais)

Módulos de Elasticidade (GPa)		Coeficientes de Poisson (-)	Módulos de Distorção (GPa)		Tensão de Cedência (MPa)
E_x	12,00	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0,75$	$G_{xy} = G_{xz} = 0,39$		$f_{cm} = 26,8$
$E_y = E_z$	0,400	$\nu_{yx} = \nu_{zx} = 0,03$	$G_{yz} = 0,15$		

Tabela 4 – Características do Pinho bravo, Classe EE, utilizado para o taco nas modelações dos provetes ensaiados no DEC-FCTUC segundo os eixos locais)

Módulos de Elasticidade (GPa)		Coeficientes de Poisson (-)	Módulos de Distorção (GPa)		Tensão de Cedência (MPa)
E_x	14,00	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0,75$	$G_{xy} = G_{xz} = 0,45$		$f_{cm} = 36,8$
$E_y = E_z$	0,467	$\nu_{yx} = \nu_{zx} = 0,03$	$G_{yz} = 0,17$		

Tabela 5 – Características do Carvalho branco utilizado para o taco nas modelações dos provetes ensaiados no DEC-FCTUC segundo os eixos locais)

Módulos de Elasticidade (GPa)		Coeficientes de Poisson (-)	Módulos de Distorção (GPa)		Tensão de Cedência (MPa)
E_x	13,53	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0,75$	$G_{xy} = G_{xz} = 0,44$		$f_{cm} = 51,3$
$E_y = E_z$	0,451	$\nu_{yx} = \nu_{zx} = 0,03$	$G_{yz} = 0,03$		

Tabela 6 – Características do betão utilizado nas modelações dos provetes ensaiados no DEC-FCTUC

Módulo de Elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson (-)	Tensão de cedência (MPa)
E	31,00	$f_{cm} = 33,0$

Tabela 7 – Carregamentos utilizados nas modelações dos provetes ensaiados no DEC-FCTUC

Modelação:	Carregamento (kN)
Pinus100mmx100mmx15mm	72,6/4=18,2
Pinus140mmx100mmx15mm	80,9/4=20,2
Pinus100mmx100mmx20mm	96,8/4=24,2
Quercus100mmx100mmx15mm	127,9/4=32,0

3.2- Resultados numéricos

A curva carga-deslocamento obtida para cada uma das modelações, bem como os resultados experimentais a que cada uma está associada são apresentados nas figuras seguintes, Fig. 10 a Fig. 14.

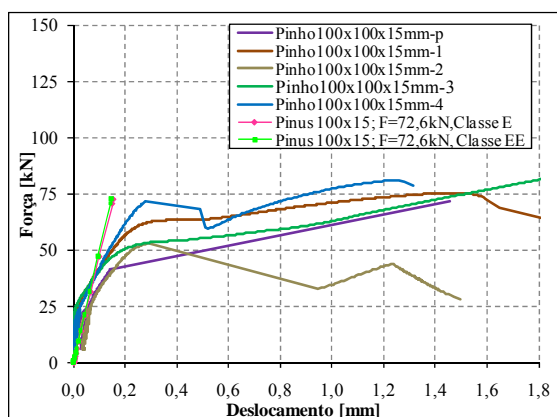


Fig. 10 – Curvas experimentais e numéricas do provete com taco em Pinho bravo da série Pinho100mmx100mmx15mm

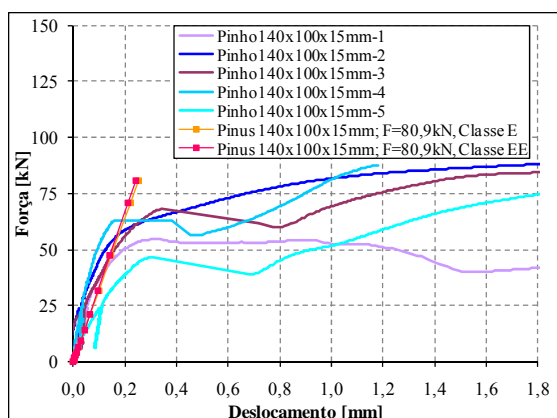


Fig. 11 – Curvas experimentais e numéricas do provete com taco em Pinho bravo da série Pinho140mmx100mmx15mm

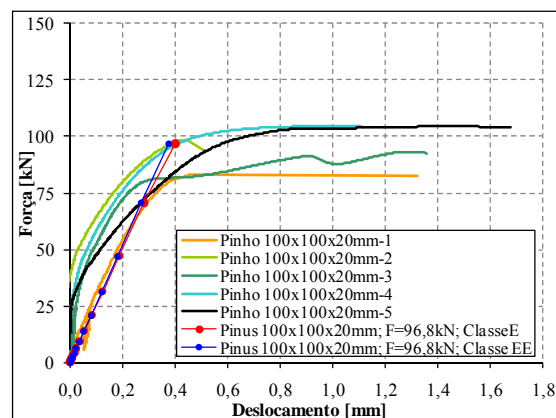


Fig. 12 – Curvas experimentais e numéricas do provete com taco em Pinho bravo da série Pinho100mmx100mmx20mm

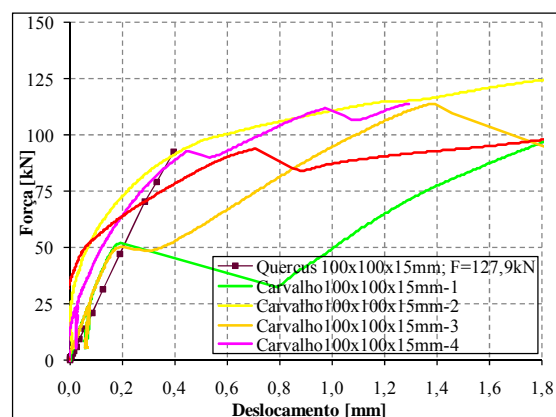


Fig. 13 – Curvas experimentais e numéricas do provete com taco em Carvalho branco da série Carvalho100mmx100mmx15mm

Os valores da rigidez da ligação, experimental e numericamente obtidos, são apresentados nas tabelas seguintes, Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Rigidez experimental da ligação, para os provetes ensaiados no DEC-FCTUC

Série:	Rigidez experimental (kN/mm)		
	Superior	Média	Inferior
Pinho100mmx100mmx15mm	605,3	393,5	278,9
Pinho140mmx100mmx15mm	576,2	362,1	187,4
Pinho100mmx100mmx20mm	741,4	513,2	260,5
Carvalho100mmx100mmx15mm	368,7	305,9	257,9

Tabela 9 – Rigidez numérica da ligação para os provetes ensaiados no DEC-FCTUC

Modelação:	Rigidez (kN/mm)	
Pinus100mmx100mmx15mm	246,40*	258,18**
Pinus140mmx100mmx15mm	320,47*	334,52**
Pinus100mmx100mmx20mm	250,83*	262,43**
Quercus100mmx100mmx15mm	254,34	

* - Pinho da Classe E; ** - Pinho da Classe EE

3.3- Análise de resultados

De uma forma geral, as curvas carga-deslocamento obtidas com as modelações mostram uma evolução semelhante às curvas experimentais na fase inicial, marcada por um comportamento linear elástico. Contudo, da análise dos gráficos referidos pôde verificar-se que para algumas séries as modelações não são abrangidas pelo “intervalo de variação” experimental.

A série Pinho140mmx100mmx15mm foi aquela para a qual os resultados numéricos se aproximaram mais dos experimentais. De referir que tanto as modelações obtidas definindo as duas classes de Pinho bravo, para essa série como para a série Pinho100mmx100mmx15mm, permitiram a obtenção de valores de rigidez inseridos no intervalo de variação experimental desta propriedade.

Em termos percentuais, podem constatar-se diferenças entre as rigidezes experimentais médias e as obtidas numericamente que variam entre os 7,62% e 51,1%, obtidos para as séries Pinho140mmx100mmx15mm e Pinho100mmx100mmx20mm, respectivamente.

De uma maneira geral os valores obtidos estão relativamente próximos dos valores médios experimentais, como era pretendido, verificando-se diferenças da mesma ordem de grandeza das observadas para os provetes com taco em dvw (7,31%).

4- CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

De uma forma sucinta é possível tecer as seguintes conclusões acerca do estudo desenvolvido. Dos ensaios experimentais efectuados em quatro séries de provetes, alterando as dimensões e o material constituinte do taco, foi possível observar que de uma maneira geral todas as séries exibiram um comportamento bastante frágil. A série Carvalho100mmx100mmx15mm foi aquela que apresentou maior valor para a rigidez da ligação, enquanto a série Pinho100mmx100mmx20mm foi aquela em que se obtiveram valores de resistência superiores.

Das modelações numéricas levadas a cabo pôde verificar-se que o comportamento linear elástico foi bem aproximado, tendo-se obtido curvas numéricas com comportamentos semelhantes aos experimentais.

Quando comparados os valores experimentais e numéricos para as várias séries de provetes em estudo, a proximidade é mais evidente para os provetes com taco em dvw, tendo-se observado diferenças médias inferiores a 8%. No que respeita às restantes séries, apesar de os valores apresentarem maiores diferenças, consideram-se aceitáveis tendo em conta vários factores que podem ter contribuído para tal, designadamente: o conhecimento limitado das propriedades dos materiais modelados, a variabilidade de propriedades mecânicas dentro da mesma espécie de madeira, a existência de desvios em relação à situação perfeita modelada, a existência de problemas de leituras durante o ensaio, entre outros, são alguns dos factores que podem ter afectado as curvas carga-deslocamento experimentais e consequentemente os valores da rigidez.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dias, A.M.P.G. (2005). Mechanical Behaviour of Timber-Concrete Joints, Tese de Doutoramento, Delft Technical University.

- Dias, A., Cruz, H., Lopes, S. e Van de Kuilen, J.W.G. (2004). Experimental Shear-Friction Tests on Dowel Type Fastener Timber-Concrete Joints, 8th WCTE Finland.
- Dias da Silva, V. (1.^a ed., 1995). Mecânica e Resistência dos Materiais. 3.^a ed., ZUARI, Coimbra.
- EN 1992-1-1 (2004). Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels.
- EN 1995-1-1 (2004). Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels.
- EN 26891 (1991), Timber Structures – Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics, CEN, Brussels.
- EN 338 (2003). Structural timber – Strength classes, CEN, Brussels.
- Manuais de Utilização do Software de Cálculo Numérico *Abaqus/CAE Version 6.7* (2007).
- Madeira para construção, M2 (1997). Pinho bravo para estruturas, LNEC.
- Monteiro, S.R.S. (2009). Avaliação experimental e numérica do comportamento mecânico de ligações madeira-betão entalhadas. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Wood Handbook (1999). Wood Handbook - Wood as an engineering material, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.