

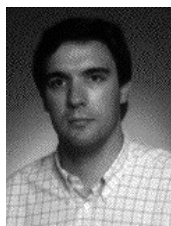
APLICAÇÃO DO EUROCÓDIGO 5 NA AVALIAÇÃO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA AO FOGO

Cachim, P.B.¹; Lopes, N.¹; Cruz, H.²; Branco, J.³; Vila Real, P.¹; Palma, P.²

¹ Departamento de Engenharia Civil & LABEST, Universidade de Aveiro

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil

³ Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho



RESUMO

Ensaios de fogo preliminares realizados em ligações tradicionais de madeira foram comparados com os métodos simplificados e avançado propostos no Eurocódigo 5, observando-se uma boa concordância entre os modelos de cálculo e os resultados experimentais, em termos da área das secções residuais. Contudo, os ensaios realizados não permitem esclarecer a influência da densidade na carbonização, o que pode ser importante face à grande variabilidade das propriedades do Pinho bravo. Para além disso, os valores previstos no Eurocódigo 5 para os métodos avançados não contemplam a condutibilidade térmica na direcção paralela às fibras, o que poderá influenciar os resultados da modelação numérica destas ligações, uma vez que, devido aos entalhes, os topos das peças têm áreas significativas expostas à acção do fogo.

1- INTRODUÇÃO

As estruturas de madeira utilizadas como elemento de suporte das coberturas existem em número muito significativo em Portugal, designadamente em edifícios de grande valor histórico e patrimonial. Estas estruturas possuem ligações realizadas fundamentalmente através de entalhes nas peças a ligar aos quais são muitas vezes associados elementos metálicos (ferragens) que permitem consolidar as ligações e absorver os esforços que os entalhes não são capazes de suportar. Como em qualquer tipo de estrutura, as ligações assumem neste caso um papel fundamental quer em situação normal quer em situação de incêndio devido à existência de peças metálicas e de entalhes.

Face ao maior risco de incêndio potencial associado aos edifícios antigos, é

fundamental um adequado conhecimento do comportamento e da resistência ao fogo das ligações tradicionais.

Esta comunicação constitui uma primeira abordagem, experimental e numérica, a este problema, contemplando materiais e ligações correntes em estruturas tradicionais comuns em Portugal e com base nas indicações do Eurocódigo 5 (EC5), norma europeia EN 1995-1-2:2004 (2004).

2- AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

2.1 - Exposição ao fogo de ligações tradicionais

Geometria das ligações e materiais

As ligações (Fig. 1) eram constituídas por peças de madeira de Pinho bravo, com uma secção transversal de $7,5 \times 15,5$ cm². A

profundidade do entalhe era 4,5 cm e o comprimento do talão era 45 cm (Fig. 2).

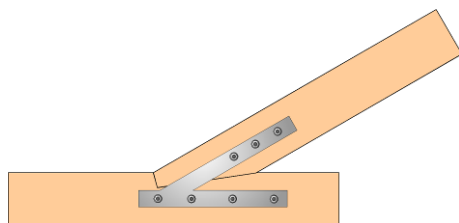


Fig. 1 – Ligação com esquadros metálicos.

Os esquadros metálicos foram executados a partir de barras rectangulares soldadas, com $3 \times 50 \text{ mm}^2$ de secção e 450 mm de comprimento. Os parafusos eram constituídos por troços de varão roscado com 8 mm de diâmetro e os respectivos furos tinham um diâmetro de 10 mm nos esquadros e de 9 mm na madeira.

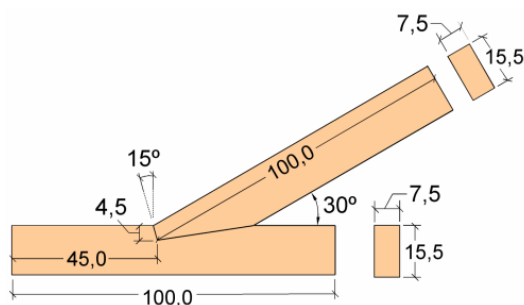


Fig. 2 – Dimensões (em cm).

Foram ensaiadas duas ligações, uma realizada com elementos de madeira com massa volúmica de 450 kg/m^3 (designada por Fig. 1) e outra com 570 kg/m^3 (designada por Fig. 2).

Na altura da realização dos ensaios, o teor de água da madeira era de 12 %.

Os topos das peças afastados da zona da ligação foram envolvidos com material isolante térmico.

As duas ligações ensaiadas ao fogo tinham sido anteriormente sujeitas a ensaio mecânico, mas não apresentavam danos significativos para além de algum esmagamento localizado da madeira na zona frontal do entalhe e a rotura parcial da soldadura dos esquadros. Estes ensaios

mecânicos criaram folgas, da ordem de 1 cm, entre os dois elementos no ângulo interior do entalhe.

Curva de incêndio

Os ensaios das ligações ao fogo foram realizados no forno vertical do Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo da Universidade de Aveiro, com uma dimensão de $3 \times 3 \text{ m}^2$. A temperatura imposta procurou seguir a curva da norma ISO 834 mas acabou por ser ligeiramente diferente no início, conforme se ilustra na Fig. 3, devido neste ensaio o controlo de temperatura ter sido realizado com poucos termopares do forno e estes estarem relativamente dispersos. Esta diferença entre a ISO 834 e curva do ensaio está no entanto dentro dos limites previstos na Norma Europeia de ensaios de resistência ao fogo EN 1363-1:1999. A duração total dos ensaios foi de 18 minutos.

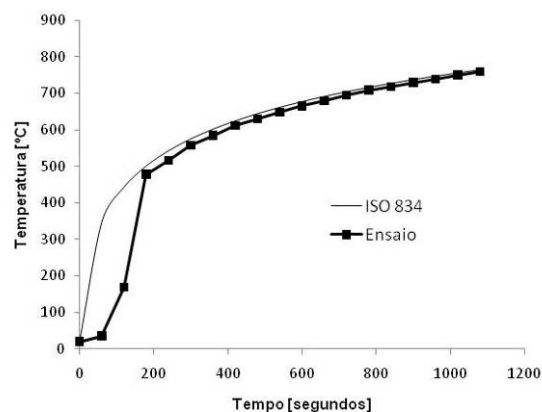


Fig. 3 – Evolução da temperatura.

2.2 - Propriedades térmicas da madeira

Os métodos avançados de cálculo propostos no EC5 consideram as propriedades térmicas da madeira, em particular a sua condutibilidade térmica e o calor específico.

Estas propriedades foram determinadas em estudos anteriores para a temperatura de 25 °C (Cruz e Custódio, 2006), com o objectivo de prever a temperatura de linhas de cola localizadas no interior de elementos de madeira colados, quando sujeitos a variação da temperatura ambiente.

Os ensaios incidiram sobre as seguintes espécies florestais: Pinho bravo (*Pinus pinaster*), Espruce (*Picea abies*), e Mucoso (*Erythrophloeum africana*).

O calor específico das madeiras foi determinado por meio de análise DSC, usando o equipamento Setaram DSC 121 existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), segundo a norma ASTM E1269-01 (2001).

A condutibilidade térmica foi determinada segundo o método descrito na norma europeia EN 12667:2001 (2001), usando o equipamento HOLOMETRIX RK-80 RAPID-K existente no LNEC.

3- MODELAÇÃO NUMÉRICA DA REDUÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL

3.1 - Método simplificado

A área residual teórica foi estabelecida com base nas indicações do EC5, considerando-se as dimensões iniciais das secções transversais, uma taxa de carbonização equivalente (β_n) de 0,8 mm/min, um período de exposição (t) de 18 min e que a carbonização ocorre apenas na direcção transversal às fibras (apesar dos entalhes nas peças). Nas secções transversais com furos para os parafusos considerou-se que não há carbonização da madeira a partir do perímetro do furo para o interior da secção. Os resultados são apresentados na Fig. 4.

Para uma dada profundidade de carbonização equivalente (igual a $\beta_n \cdot t$), quanto menor for a área da secção transversal inicial, maior será a redução de secção em percentagem, o que conduz ao declive das curvas na zona de secção variável nos entalhes e às ligeiras descidas nas zonas dos furos. A diferença entre as curvas das ligações 1 e 2 na Fig. 4a) deve-se a pequenas diferenças nas dimensões das secções transversais iniciais.

3.2 - Método avançado de cálculo

O modelo numérico utilizado para determinação das temperaturas no interior dos elementos de madeira baseia-se na equação

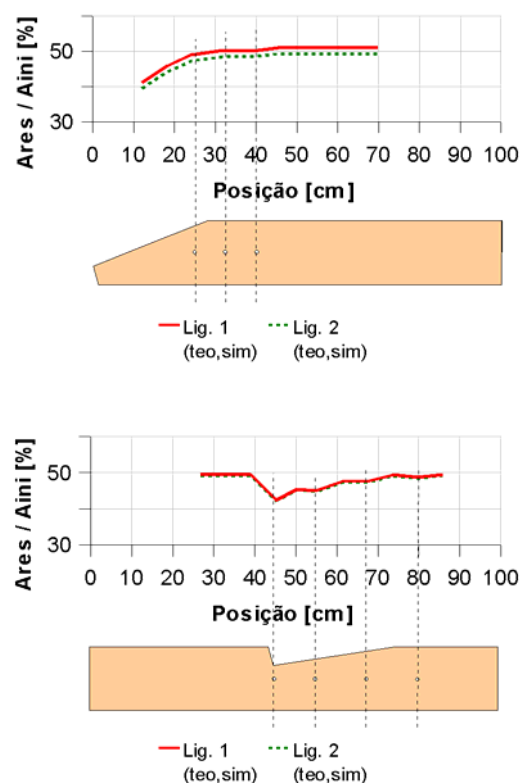


Fig. 4 – Área residual (A_{res}) das secções transversais dos elementos (em percentagem da área inicial A_{ini}) após 18 minutos de exposição ao fogo, considerando uma taxa de carbonização equivalente (β_n) de 0,8 mm/min.

de Fourier que rege a transmissão de calor por condução num meio contínuo. As acções térmicas são definidas pelo fluxo de calor efectivo que deve ser determinado considerando a radiação térmica e a convecção de e para o ambiente em que o fogo se desenvolve.

Efeitos como a transferência de massa no interior da estrutura (por exemplo movimentos da água), energia libertada na madeira pela sua pirólise ou degradação, fendilhação da camada carbonizada (que aumenta a transmissão de calor), podem ser considerados utilizando propriedades dos materiais que de forma equivalente os traduzam. O EC5 apresenta, no Anexo B, um conjunto de propriedades que de forma equivalente consideram o comportamento da madeira, designadamente no que se refere à condutibilidade térmica da camada carbonizada de forma a considerar o aumento da transmissão de calor devido à fendilhação da madeira carbonizada por

retração acima de 500 °C e o desaparecimento da madeira acima de aproximadamente 1000 °C. Os valores apresentados para o calor específico, incluem igualmente a energia necessária para provocar a evaporação da água.

Utilizaram-se as propriedades térmicas definidas na EN 1991-1-2:2002 (2002) (EC1) e no EC5. De acordo com o EC1, considerou-se um coeficiente de transmissão de calor por convecção (α_c) em superfícies expostas à curva de incêndio padrão de 25 W/m²K. A emissividade resultante da madeira utilizada nos cálculos foi 0,8. Para a condutibilidade térmica, o calor específico e a massa volúmica relativa foram considerados os valores do Anexo B do EC5.

No presente trabalho utilizou-se nas simulações com elementos finitos o programa SAFIR (Franssen, 2005) desenvolvido na Universidade de Liège, especificamente para o cálculo de estruturas submetidas a temperaturas elevadas. O programa SAFIR é largamente utilizado para determinação da resistência ao fogo de estruturas, encontrando-se por esse motivo amplamente testado.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Avaliação experimental das secções residuais

Após os ensaios de fogo as ligações foram desmontadas e as peças foram cortadas em troços, para que se obtivessem secções transversais de zonas com furos para os parafusos e de zonas maciças.

A área residual experimental foi determinada com base no tratamento das imagens digitalizadas das secções transversais, uma vez que o limite da camada carbonizada é facilmente distinguível do resto da secção (Fig. 5).

Não se observou uma diferença clara na taxa de carbonização devido à diferença das massas volúmicas dos dois elementos (450 e 570 kg/m³). No entanto este resultado deve ser visto com alguma reserva, devido à pequena diferença entre a massa volúmica das peças e ao carácter preliminar destes

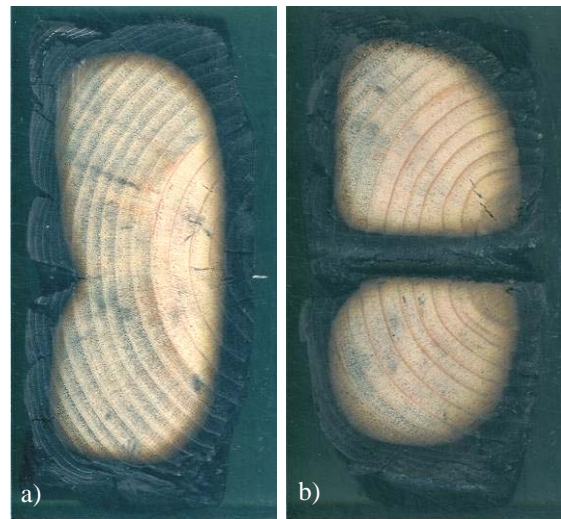


Fig. 5 – Vista da secção transversal nas ligações com furo e sem furo.

ensaios, o que pode ter introduzido ligeiras diferenças no tempo de exposição ao fogo das duas ligações.

Embora não tenha ocorrido carbonização significativa em torno dos furos (Fig. 5b)), excepto junto às faces laterais, essa carbonização correspondeu a um alargamento do diâmetro do furo nunca inferior a 2 mm, o que, embora possa ter pouco significado em termos da área carbonizada total, é muito significativo em termos de desempenho mecânico da ligação.

A análise das secções transversais permite observar que a presença de fendas radiais aumenta localmente a profundidade de carbonização (Fig. 5a)). Observa-se também que a profundidade de carbonização parece ser superior nos cantos em que há lenho mais antigo (menos denso) e o fluxo de calor se faz essencialmente na direcção tangencial, conduzindo ao maior arredondamento dos vértices do lado direito da secção apresentada na Fig. 6a).

4.2 - Método simplificado de cálculo

Na Fig. 6 apresenta-se a relação entre as áreas residuais medidas e as respectivas áreas das secções iniciais, para as peças do tipo “perna” das duas ligações. O gráfico inclui também as curvas com as secções residuais determinadas de acordo com o método simplificado, para comparação com os valores obtidos experimentalmente. Os valores medidos próximo do topo afastado

do entalhe (a cinzento) não devem ser considerados válidos devido à influência do isolamento térmico aplicado nessa zona.

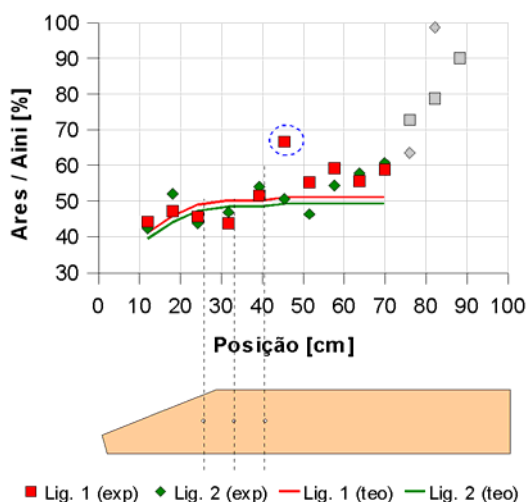


Fig. 6 – Áreas residuais determinadas experimentalmente para os elementos do tipo “perna”.

Ao fim de 18 minutos de exposição à curva de incêndio, as áreas residuais variam entre 40 e 60 % da respectiva área inicial e as áreas residuais determinadas através do método simplificado do EC5 aproximam-se dos valores efectivamente medidos.

A secção transversal assinalada na Fig. 6 com um traço descontínuo azul apresenta uma área residual significativamente superior às das secções adjacentes devido ao facto de nessa secção ocorrerem dois nós (Fig. 7), com massa volúmica e orientação das fibras distintas do material das restantes secções.

Nos elementos do tipo “linha” (Fig. 8) também se observou um bom ajustamento entre as curvas teóricas, obtidas de acordo com o EC5, e os valores das áreas residuais medidas.

Há que referir que também nestes proveites as secções transversais com nós de dimensão significativa (assinaladas com traço descontínuo azul na Fig. 8) apresentam áreas residuais superiores às secções adjacentes.

Uma vez que os ensaios foram realizados sem cargas aplicadas nas ligações, os parafusos não sofreram deformações visíveis. Numa ligação exposta ao fogo e em carga, os danos nos parafusos e



Fig. 7 – Alteração dos padrões de carbonização devido à presença de nós, nos elementos “perna” (a) e “linha” (b) da ligação 1.

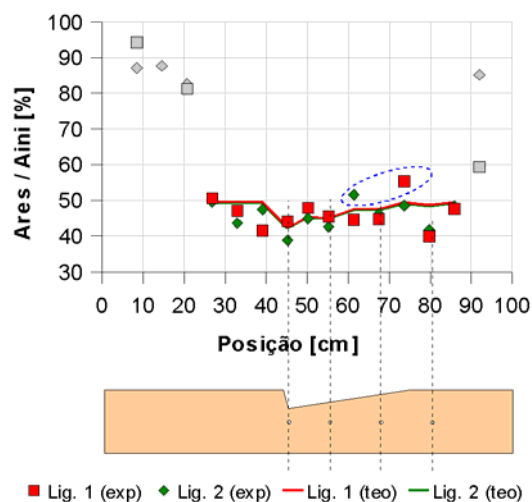


Fig. 8 – Áreas residuais determinadas experimentalmente para os elementos do tipo “linha”.

nos respectivos furos poderão ser superiores, pois a camada carbonizada, que isola termicamente o núcleo da secção, pode ser mais rapidamente destacada devido à deformação das ferragens.

4.3 - Propriedades térmicas da madeira

Os valores obtidos experimentalmente para o calor específico (Tabela 1) são semelhantes para as três madeiras, não havendo qualquer relação entre o calor específico da madeira e a sua massa volúmica. Refira-se que todas as amostras tinham sido previamente condicionadas até

massa constante em ambiente com 20 °C, 65 % HR, conduzindo a madeira a um teor de água próximo de 12 %.

Tabela 1 – Calor específico.

Espécie	Massa volúmica (kg/m ³)	Temperatura (°C)	Calor específico (kJ/kg·K)
Espruce	430		1,495
Pinho	660	25	1,528
Mucoso	1130		1,394

O valor sugerido pelo EC5, no seu Anexo B, para o calor específico (1,53 kJ/kg·K, a 20°C) é muito semelhante ao valor obtido experimentalmente para o Pinho bravo.

Relativamente à condutibilidade térmica, regista-se um aumento com a massa volúmica da madeira. Dentro de cada espécie existe uma influência marcada do ângulo entre a direcção do fluxo de calor transmitido e a direcção das fibras da madeira (Tabela 2).

A condutibilidade térmica parece ser semelhante nas direcções radial e tangencial (análise feita unicamente para o Pinho bravo). Para todas as madeiras analisadas, a condutibilidade na direcção das fibras é muito superior (1,7 a 2,6 vezes) à condutibilidade na direcção transversal às fibras.

O EC5, Anexo B, sugere a utilização do valor 0,12 W/m·K a 20 °C (crescendo linearmente até 0,15 W/m·K a 200 °C). Verifica-se que o valor da condutibilidade térmica correspondente a 20 °C é próximo dos determinados experimentalmente para o Pinho bravo na direcção perpendicular às fibras (direcções radial e tangencial), mas muito inferior ao obtido na direcção paralela às fibras.

Embora a exposição corrente dos elementos de madeira ao fogo em edifícios corresponda ao avanço da carbonização na direcção transversal, a exposição de topos dos elementos de madeira, como acontece nas ligações estruturais, em particular com entalhes, poderá conduzir a taxas de carbonização superiores à calculada com a adopção dos valores indicados no EC5.

Tabela 2 – Condutibilidade térmica.

Espécie	Direcção do fluxo de calor relativamente ao fio da madeira	Condutibilidade térmica (W/m·K)
Espruce (430 kg/m ³)	Perpendicular	0,0965
	Paralelo	0,1997
Pinho (660 kg/m ³)	Radial	0,128
	Perpend. Tangencial	0,131
	Paralelo	0,341
Mucoso (1130 kg/m ³)	Perpendicular	0,203
	Paralelo	0,344

É ainda interessante analisar a menor taxa de carbonização determinada experimentalmente nas secções transversais ocupadas pelos nós da madeira. Embora a orientação das fibras que integram os nós seja aproximadamente perpendicular à da madeira que os envolve (sendo assim paralela ao fluxo de calor, o que poderia propiciar uma mais rápida carbonização), esse efeito parece ser ultrapassado pela muito maior massa volúmica da madeira dos nós.

4.4 - Método avançado de cálculo

A análise numérica foi realizada considerando a malha de elementos finitos sólidos representada na Fig. 9, composta por um total de 5000 elementos. A temperatura ambiente considerada seguiu a curva de temperatura do ensaio real representada na Fig. 3. Admitiram-se fronteiras convectivas e radiativas em toda a superfície exterior da estrutura. Fizeram-se duas análises numéricas. Numa admitiu-se contacto perfeito entre os elementos de madeira na zona do entalhe (AN1) e na outra considerou-se que existia uma separação entre a linha e a perna (AN2), uma vez que após os ensaios mecânicos o contacto no entalhe deixou de ser uniforme. Neste último caso admitiu-se aproximadamente que, na folga existente entre a linha e a perna, a temperatura era igual à temperatura exterior do forno.

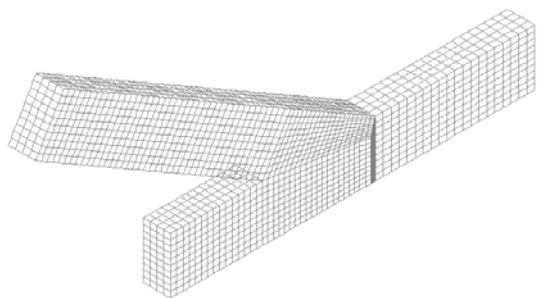


Fig. 9 – Malha de elementos finitos.

A diferença entre as análises AN1 e AN2 pode ser facilmente observada na Fig. 10 onde se ilustra o perfil de temperaturas no final do ensaio para as duas situações. Consta-se imediatamente que apenas a análise AN2 poderá ser utilizada, uma vez que a análise dos resultados experimentais permite concluir que apesar das faces dos entalhes da linha e da perna na Lig. 1 se encontrarem próximas, a transmissão de calor se faz como se as peças se encontrassem totalmente separadas (Fig. 10).

Em termos da análise numérica, a diferença entre a Lig. 1 e a Lig. 2 traduz-se apenas pela diferente massa volúmica da madeira.

A análise das secções transversais e consequente determinação da área residual foi efectuada tendo por base a definição da taxa de carbonização e que corresponde à superfície interior à isotérmica dos 300 °C. Na Fig. 11 e Fig. 12 ilustra-se o perfil de temperaturas para quatro secções transversais das ligações 1 e 2, respectivamente, a partir das quais é possível determinar a secção residual. Por não ser relevante para o problema e facilitar a leitura, todas as zonas com temperaturas superiores a 300 °C foram consideradas com a cor branca. Apesar de semelhantes, os resultados obtidos conduzem a secções residuais diferentes.

Na Fig. 13 apresentam-se as áreas residuais (em percentagem da área inicial) obtidas através do modelo avançado. Na análise numérica a diferente massa volúmica da madeira das Lig. 1 e 2 afecta a taxa de carbonização e a consequente secção residual, ao contrário dos resultados experi-

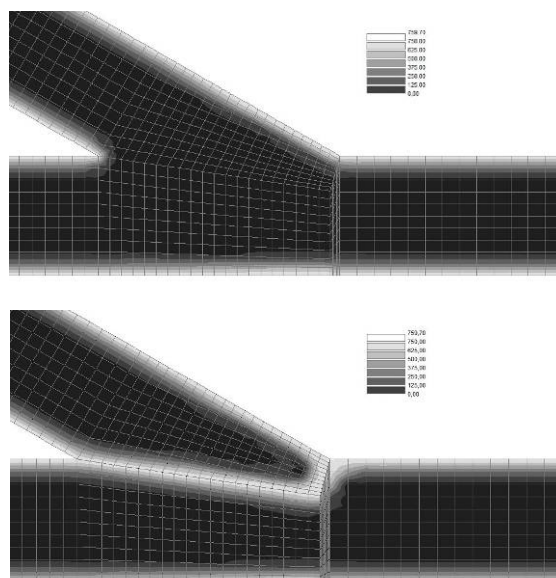


Fig. 10 – Perfil de longitudinal de temperaturas no final do ensaio para AN1 (em cima) e AN2 (em baixo).

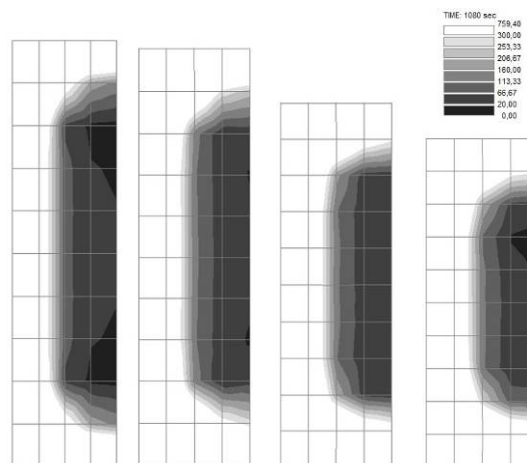


Fig. 11 – Perfil de transversal de temperaturas na Lig. 1, na linha, no final do ensaio para as secções com abcissa 80, 67, 55 e 45 cm (ver Fig. 13).

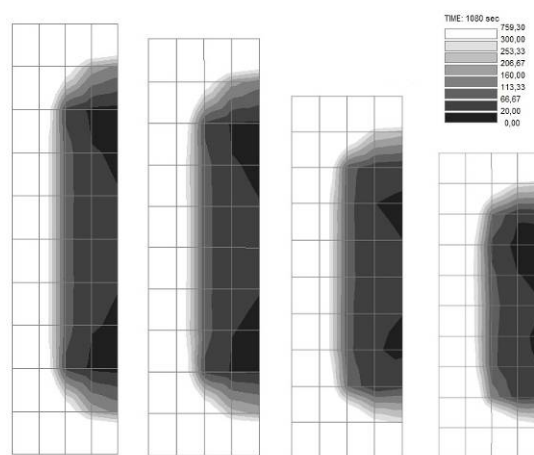


Fig. 12 – Perfil de transversal de temperaturas na Lig. 2, na linha, no final do ensaio para as secções com abcissa 80, 67, 55 e 45 cm (ver Fig. 13).

mentais. Esta diferença também não foi tida em conta no método simplificado do EC5, que considera uma taxa de carbonização única para todas as madeiras resinosas maciças de massa volúmica superior a 290 kg/m^3 .

Os valores obtidos com a análise numérica da Lig. 1 são razoavelmente coincidentes com os valores experimentais medidos, ao contrário da Lig. 2 em que as áreas residuais obtidas com a análise numérica são em geral ligeiramente superiores às experimentais. Estas diferenças devem-se à sensibilidade do modelo numérico à massa volúmica da madeira introduzida na análise.

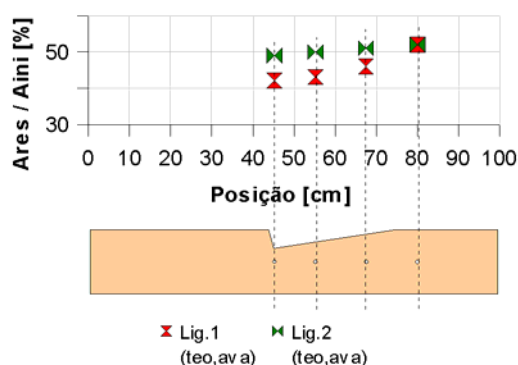


Fig. 13 – Áreas residuais obtidas com a análise numérica.

Na Fig. 14 compara-se uma fotografia da secção real após o ensaio com a secção residual obtida pela análise numérica. É possível constatar que, tirando uma assimetria em relação ao eixo da peça observada no ensaio experimental, ambas as secções residuais são bastantes coincidentes.

5- CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentam-se os resultados preliminares de ensaios laboratoriais e simulações numéricas que pretendem aferir o comportamento de ligações tradicionais de madeira sob acção do fogo. Os resultados obtidos mostram que:

- os valores da condutibilidade térmica, na direcção perpendicular às fibras, a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, propostos pelo EC5 são adequados para a madeira de Pinho bravo utilizada nesta



Fig. 14 – Comparação entre a secção residual experimental e a obtida com a análise numérica.

campanha preliminar;

- os valores determinados para as outras duas espécies (Espruce e Mucoso) sugerem uma forte dependência desta propriedade relativamente à massa volúmica, pelo que para madeiras de outras espécies, ou mesmo para Pinho bravo com massa volúmica distinta da ensaiada (a massa volúmica do Pinho bravo pode variar entre 450 e 750 kg/m^3), a aplicação dos métodos avançados implica a determinação prévia das propriedades térmicas da madeira;
- o arredondamento dos cantos das secções transversais parece ser mais pronunciado junto aos vértices onde há lenho mais antigo (material menos denso) e simultaneamente o fluxo de calor perpendicular às faces incide tangencialmente às fibras;
- a influência da massa volúmica na carbonização carece de confirmação;
- a existência de folgas nos entalhes da ligação afecta negativamente o seu desempenho ao fogo, para além de afectar também o seu comportamento mecânico a frio (Palma, 2009). As

intervenções em estruturas antigas devem ter em conta este aspecto;

- os parafusos metálicos conduzem o calor para o interior da secção, provocando o alargamento dos furos, o que tem consequências graves no desempenho das ligações; esse alargamento é mais acentuado nos cantos da secção transversal junto aos furos, o que em ensaios em carga poderá provocar o destacamento da camada carbonizada, agravando a carbonização nessa zona;
- a análise numérica realizada considerando o modelo avançado proposto pelo EC5 permitiu simular adequadamente os resultados de ensaios ao fogo, para a geometria e os materiais ensaios.

6- REFERÊNCIAS

- ASTM E1269-01. Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry. ASTM International, 2001.
- Cruz, H, Custódio, J. (2006). “Thermal performance of epoxy adhesives in timber structural repair”. WCTE 2006, Portland, USA.
- EN 1363-1:1999. Fire resistance tests – Part 1: General requirements. CEN, 1999.
- EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. CEN, 2002.
- EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design. CEN, 2004.
- EN 12667:2001. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. CEN, 2001
- Franssen, J-M (2005). SAFIR: A Thermal/Structural Program Modeling Structures under Fire, Engineering Journal, A.I.S.C., Vol 42, No. 3, 143-158
- Palma, P (2009). “Ligações tradicionais em estruturas de madeira - Avaliação experimental do seu comportamento mecânico”. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico.