

Sériell

número7

Julho2010

r p e e
revista portuguesa
de engenharia
estruturas

Um modelo discreto de partículas para análise da fractura em betão armado

Nuno Monteiro Azevedo ∞ J. Vieira de Lemos ∞ J. Rocha de Almeida

Influência dos painéis de enchimento de alvenaria de tijolo na resposta sísmica de estruturas existentes de betão armado

João Milheiro ∞ Hugo Rodrigues ∞ António Arêde

Uma abordagem Bayesiana à amostra aleatória normal

João Casaca ∞ José Piteira Gomes

Método experimental para determinação da espessura carbonizada na madeira quando submetida a altas temperaturas

Elza M. M. Fonseca ∞ Luisa M. S. Barreira

Monitorização e análise de um viaduto metálico durante a construção e ensaio de carga

Américo Ocua Dimande ∞ Bruno J. Afonso Costa ∞ Carlos Félix ∞ Joaquim Azevedo Figueiras

Propriedades dos betões com agregados reciclados e a susceptibilidade às reacções álcalis-sílica

Miguel Barreto Santos ∞ Jorge de Brito

Notícias, Publicações e Eventos

INEC

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

editorial	3	Editorial
artigos científicos	5	Um modelo discreto de partículas para análise da fractura em betão armado Nuno Monteiro Azevedo ∞ J. Vieira de Lemos ∞ J. Rocha de Almeida
	15	Influência dos painéis de enchimento de alvenaria de tijolo na resposta sísmica de estruturas existentes de betão armado João Milheiro ∞ Hugo Rodrigues ∞ António Arêde
	25	Uma abordagem Bayesiana à amostra aleatória normal João Casaca ∞ José Piteira Gomes
	33	Método experimental para determinação da espessura carbonizada na madeira quando submetida a altas temperaturas Elza M. M. Fonseca ∞ Luísa M. S. Barreira
realizações	41	Monitorização e análise de um viaduto metálico durante a construção e ensaio de carga Américo Ocua Dimande ∞ Bruno J. Afonso Costa ∞ Carlos Félix ∞ Joaquim Azevedo Figueiras
notas técnicas	53	Propriedades dos betões com agregados reciclados e a susceptibilidade às reacções álcalis-silica Miguel Barreto Santos ∞ Jorge de Brito
divulgação	63	Notícias, Publicações e Eventos

Método experimental para determinação da espessura carbonizada na madeira quando submetida a altas temperaturas

Experimental method for timber charring layer determination when submitted to high temperatures

Elza M. M. Fonseca
Luísa M. S. Barreira

Resumo

A utilização da madeira como material de construção requer o cumprimento de princípios normativos, nomeadamente contra riscos de incêndio. A forte vulnerabilidade da madeira a altas temperaturas ou em presença da acção do fogo requer uma rigorosa avaliação térmica e mecânica. No entanto, quando comparada com outros materiais de construção, a madeira apresenta uma boa resistência a altas temperaturas. Com o presente trabalho, pretende-se determinar a espessura da camada carbonizada em elementos estruturais de madeira, função do tempo, quando submetida a elevadas temperaturas. Será utilizado um método experimental para a caracterização deste tipo de acções. Os ensaios são efectuados em perfis de madeira de pinheiro (*Pinus pinaster*). Os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos obtidos num programa de elementos finitos.

Abstract

The use of timber as a construction material requires compliance with principles and rules, including fire risk. The high timber vulnerability, due to accidental conditions, requires rigorous thermal and mechanical assessment. However, when compared with other building materials, timber material provides a good resistance to high temperatures. The main objective of this study is to determine the charring layer thickness on structural timber elements, function of time, when submitted to high temperatures. An experimental method for action characterization will be used. The tests were made on pine wood profiles (*Pinus pinaster*). The experimental results are compared with numerical results obtained using a finite element tool.

Palavras-chave: Madeira / Camada carbonizada / Altas temperaturas

Keywords: Timber / Charring layer / High temperatures

Elza M. M. Fonseca

Doutor/Professor
Instituto Politécnico de Bragança
Bragança
efonseca@ipb.pt

Luísa M. S. Barreira

Mestre/Técnica
Instituto Politécnico de Bragança
Bragança
lbarreira@ipb.pt

1 Introdução

A madeira pode ser utilizada em vários tipos de construções interiores e exteriores de edifícios, paisagismo, ferrovias, pontes e outras aplicações. As principais vantagens da utilização da madeira, relativamente a outros materiais, são a facilidade na construção e na manutenção, a agradável aparência, a leveza e sua resistência estrutural. A utilização deste tipo de elementos exige a verificação da sua resistência, através de regras e códigos de segurança. A resistência ao fogo, por exemplo, pode ser determinada em função de ensaios específicos de forma a quantificar o tempo para o qual a estrutura não entra em colapso. Uma vez que a madeira é um material combustível, existem grandes preocupações inerentes ao projecto e à protecção deste material. Mas a combustão da madeira é lenta e regular e o seu comportamento torna-se previsível, apresentando por isso um comportamento diferente e que lhe é favorável [1-2].

Tal como outros combustíveis sólidos, a madeira, em condições normais, não arde directamente: primeiro decompõe-se em gases que, expostos ao calor, se convertem em chamas que aquecem a madeira ainda não atingida, libertando mais gases inflamáveis, alimentando assim a combustão [3].

Quando a secção recta do componente de madeira é robusta, se exposta a elevadas temperaturas, forma-se uma camada superficial de carvão, que actua como isolante, impedindo a rápida saída dos gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da secção.

Neste caso, o elemento estrutural apresenta uma capacidade resistente favorável em relação a outros materiais, uma vez que o interior da secção permanece a baixas temperaturas. Quando a madeira é submetida a altas temperaturas ocorre um processo de degradação térmica (pirólise), produzindo gases e redução na sua secção resistente. O processo de queima na madeira pode ser descrito por diferentes fases, conforme se representa na Figura 1.

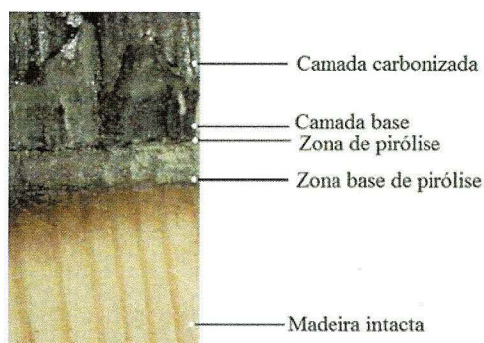


Figura 1 Zonas de degradação numa secção em madeira

A temperatura na camada base da madeira carbonizada, que está em contacto com o núcleo da secção, é de aproximadamente 300 °C, conforme o Eurocódigo 5,

Quando a secção recta do componente de madeira é robusta, se exposta a elevadas temperaturas, forma-se uma camada superficial de carvão, que actua como isolante, impedindo a rápida saída dos gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da secção.

Com o presente estudo pretende-se demonstrar uma técnica alternativa experimental que permite avaliar e determinar a espessura carbonizada em perfis de madeira, quando submetidos a altas temperaturas.

EC5 [4]. As propriedades térmicas da madeira relacionam-se com o teor de água, a orientação do grão, a composição química e a permeabilidade, sendo função da temperatura. A rigidez e a resistência da madeira diminuem significativamente com o aumento da temperatura [4, 5]. Com base nestes conhecimentos, é possível avaliar a segurança de estruturas em madeira, afectadas pela acção do fogo ou em presença de elevadas temperaturas, prevendo-se com precisão o tempo de resistência dos elementos estruturais antes do colapso da estrutura. A determinação da carbonização em diferentes espécies de madeira tem sido objecto de estudo por investigadores em diferentes países [1 a 3, 5 a 7].

Com o presente estudo pretende-se demonstrar uma técnica alternativa experimental que permite avaliar e determinar a espessura carbonizada em perfis de madeira, quando submetidos a altas temperaturas.

2 Resistência da madeira a altas temperaturas

Quando se calcula a capacidade da resistência de elementos estruturais em madeira, submetidos a elevadas temperaturas ou à acção do fogo, os factores mais importantes são a degradação térmica do material e a formação da camada de carbonização. A massa volúmica da madeira varia em função da camada carbonizada, devida à degradação do material, provocada pela pirólise durante a presença de elevadas temperaturas. Por seu lado, esta zona não tem resistência efectiva fazendo com que exista uma redução da secção recta do componente estrutural. Por outro lado, a profundidade de carbonização depende do tempo da exposição a elevadas temperaturas. A verificação destas características contribui para avaliar a sua capacidade de resistência. Por comparação com outros elementos de construção tradicionais, verifica-se que a madeira

apresenta uma excepcional resistência. Ao contrário do que ocorre com estruturas em aço, em que o colapso resulta da diminuição das propriedades mecânicas do material com o aumento da temperatura, a falha da capacidade na madeira só acontece pela diminuição, por carbonização, da secção resistente. Excluindo os componentes de ligação da estrutura, cuja protecção a altas temperaturas deve ser objecto de particular atenção, um correcto dimensionamento da secção dos elementos de construção em madeira, assegura, sem recurso a sistemas de protecção especiais, o tempo de estabilidade a possíveis acções devidas à presença de elevadas temperaturas.

2.1 A madeira de pinheiro

A espécie de madeira em estudo neste trabalho é o pinheiro (*Pinus pinaster*). Esta espécie conífera representa aproximadamente 40% da área florestal portuguesa, constituindo uma das mais típicas paisagens nacionais. A sua importância económica é elevada e tem sido amplamente utilizada na construção, na indústria do papel e na produção de resina.

As características físicas da madeira de pinheiro adoptadas para o desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente na simulação numérica, são as referenciadas em [5], em que se considerou a massa volúmica igual a 509 kg/m³. Essas características foram obtidas em elementos de madeira com um teor de água inicial entre 8% e 9% e expostos ao fogo em função da curva normalizada ASTM E119.

2.2 Modelos analíticos

Existem alguns modelos analíticos para o cálculo da espessura da camada de carbonização da madeira, conforme proposto pelo EC5 [4]. A equação de projecto (1) permite determinar a espessura da camada carbonizada em função da velocidade de carbonização para superfícies não protegidas, expostas ao fogo normalizado numa direcção:

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (1)$$

$d_{char,0}$ representa a espessura da camada de carbonização numa direcção em mm, t o tempo de exposição ao fogo em min e β_0 a velocidade de carbonização na direcção do fogo igual a 0,65 mm/min, para o caso de espécies coníferas EC5 [4].

Em geral, há concordância entre vários autores de que a temperatura a partir da qual as propriedades da madeira variam é considerada a partir dos 300 °C. Um dos modelos mais utilizados, apresentado por [5], é obtido através de resultados experimentais em diferentes espécies de madeira. Esse modelo simples é linear, equação (2), permitindo determinar o tempo de exposição ao fogo baseado na espessura da camada de carbonização:

$$t = \beta' d_c \quad (2)$$

t é o tempo em min, β' representa a taxa de carbonização linear igual a 1,24 min/mm, referido em [5], e d_c a espessura da camada de carbonização em mm.

As equações 1 e 2 serão utilizadas neste trabalho para a comparação dos resultados numéricos em elementos sob acção do fogo.

2.3 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas da madeira têm um comportamento não linear, variando em função da temperatura. Para a madeira de pinheiro foram consideradas as características físicas conforme referenciado em [5]. O anexo B do EC5 [4] representa os valores das propriedades térmicas a utilizar em projecto, na situação de exposição a um fogo normalizado. Valores de temperatura inferiores a 350 °C traduzem as propriedades da madeira normal e valores acima de 350 °C representam as propriedades da camada carbonizada.

As tabelas seguintes resumem os valores da condutibilidade térmica, do calor específico e da massa volúmica da madeira, assumindo um teor de água inicial de 12%.

Na Tabela I encontram-se os valores da condutibilidade térmica da madeira em função da temperatura, conforme EC5 [4].

Tabela I Condutibilidade térmica, k , EC5 [4]

Temperatura (°C)	k (W/mK)
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

O calor específico da madeira e da camada carbonizada é função dos valores apresentados na Tabela II, conforme publicado pelo EC5 [4]. O pico verificado para um valor de temperatura a 100°C deve-se ao aquecimento necessário para a evaporação da água na madeira.

A presença de água na madeira faz variar o seu volume e a sua massa volúmica. Assim, esses valores são função de determinado teor de água na madeira. Quanto maior o teor de água, maior será o valor da massa volúmica. A variação da massa volúmica, com o teor de água da madeira, é aproximadamente linear até cerca de 25% a 30% do valor do teor de água. A proporção da massa volúmica da madeira seca, considerando um teor de água inicial de 12%, é função dos valores apresentados na Tabela III, EC5 [4].

Tabela II Calor específico, C_p , EC5 [4]

Temperatura (°C)	C_p (kJ/kgK)
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

Tabela III Razão da massa volúmica, ρ , EC5 [4]

Temperatura (°C)	ρ
20	1+w
99	1+w
120	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0

*w é a percentagem do teor de água inicial

3 Determinação da camada carbonizada da madeira

Neste trabalho utilizou-se um método experimental e numérico, para a determinação da camada carbonizada em perfis de madeira a altas temperaturas.

Para a realização do método experimental, utilizaram-se 12 perfis de madeira em pinheiro (*Pinus pinaster*), com a identificação E1, E2, ... E12, submetidos a altas temperaturas numa das suas faces de topo. O modelo numérico apresenta as mesmas dimensões (500 × 180 × 80 mm) que os perfis considerados na realização de ensaios.

3.1 Modelo numérico

O modelo numérico baseia-se no método dos elementos finitos com base na utilização do programa comercial Ansys.

Foram consideradas duas análises térmicas não-lineares em regime transiente, tendo sido utilizado um elemento plano (Plane 77) com dois graus de liberdade por nó. A malha de elementos finitos utilizada encontra-se representada na Figura 2. Em ambas as análises, foi considerada a imposição de condição de fronteira térmica na face superior do elemento estrutural, mantendo-se as restantes isoladas.

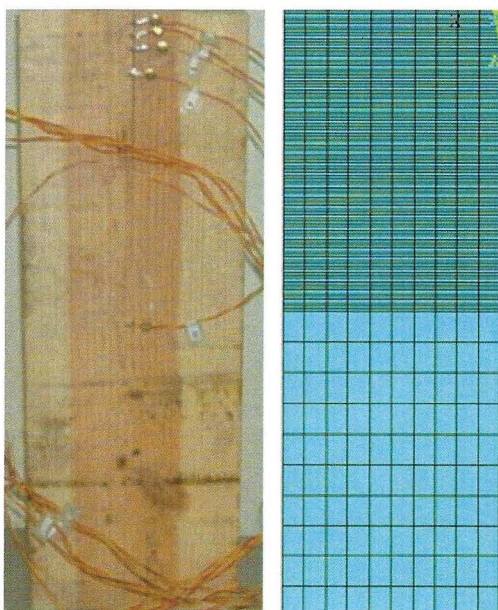


Figura 2 Perfil experimental e perfil numérico

Numa das análises, considerou-se o efeito da acção do fogo, com a imposição das condições de fronteira relativas à presença da convecção e radiação na estrutura. O coeficiente de transmissão de calor por convecção considerado, e de acordo com o Eurocódigo 1, EC1 [8], para a superfície exposta ao fogo utilizando a curva ISO834, é igual a 25 W/m² °C. O valor da emissividade da superfície do elemento estrutural considerado foi igual a 0,8, conforme proposto no ECS [4]. A temperatura ambiente evolui neste caso, de acordo com a equação da curva ISO834, tendo sido considerada uma temperatura inicial de 20 °C.

Na segunda análise transiente, considerou-se a imposição de uma taxa de aquecimento linear de 800 °C/hora, através da condição fronteira de temperatura prescrita na face superior do elemento estrutural, que permitirá comparar os resultados com os obtidos experimentalmente.

3.2 Modelo experimental

O método experimental utilizado em laboratório, pretende simular elevadas temperaturas através da imposição de uma taxa de aquecimento linear, sobre os elementos estruturais em madeira. Este método pode ser verificado nas imagens apresentadas, nas Figuras 3 e 4.

O processo de aquecimento a utilizar na metodologia experimental difere da queima da madeira submetida à acção do fogo, uma vez que no presente processo existe uma degradação anaeróbia da estrutura.

A Figura 3.a representa as amostras em madeira maciça a utilizar nos ensaios com os respectivos pontos de medição para a temperatura. A camada carbonizada na madeira é determinada pela medição da temperatura nesses 5 pontos diferentes, utilizando termopares do tipo K. A medição da temperatura é efectuada a 1, 2, 3, 5 e 25 cm do topo superior da amostra exposta a altas temperaturas, medida no interior da madeira a 40 mm de profundidade. A ligação dos termopares é efectuada a um sistema de leitura para aquisição de dados, o MGCPlus, conforme se observa na Figura 3.b.

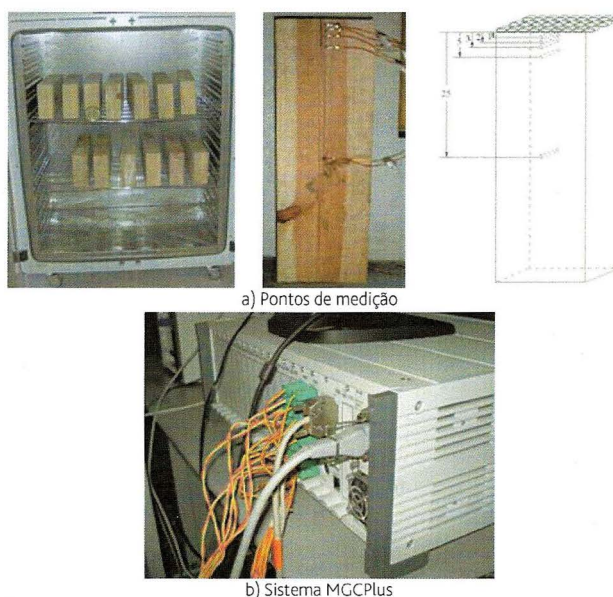


Figura 3 Método experimental

A exposição a altas temperaturas da madeira é efectuada através da colocação de resistências electrocerâmicas numa face de topo do elemento, conforme se observa na Figura 4.a. As resistências são ligadas a uma unidade térmica de aquecimento cuja potência corresponde a 70 kVA, Figura 4.b. A curva de aquecimento imposta na unidade térmica é programável e controlada ao longo de todo o ensaio, tendo sido utilizada uma taxa de aquecimento igual a

800 °C/hora. Para garantir um maior rendimento no processo, é necessário isolar as resistências com material de fibra cerâmica com malha de aço inoxidável, através de mantas isolantes conforme se observa na Figura 4.c. O ensaio é realizado durante uma hora e apresenta a configuração final conforme se verifica na Figura 4.d.

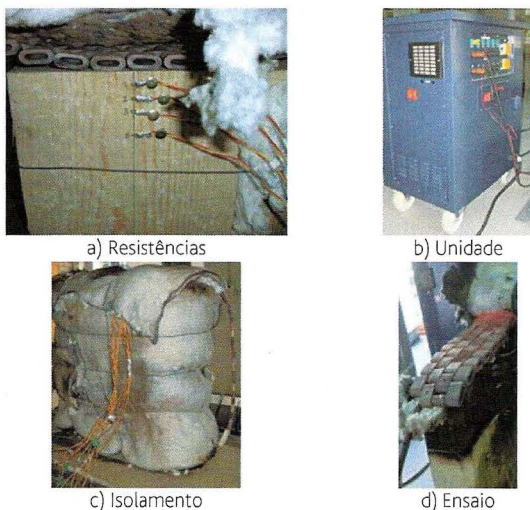


Figura 4 Equipamento

3.3 Discussão dos resultados obtidos

A Figura 5 representa a evolução da distribuição das temperaturas obtida com o modelo numérico para o caso em que a temperatura ambiente evolui de acordo com a curva ISO834 (a) ou em função de uma taxa de aquecimento linear imposta de 800°C/hora (b). Pode observar-se que o perfil submetido a altas temperaturas devido a uma taxa de aquecimento, apresenta temperaturas máximas ($T_{máx}$) inferiores em relação ao perfil que foi submetido à curva de incêndio normalizada ISO834.

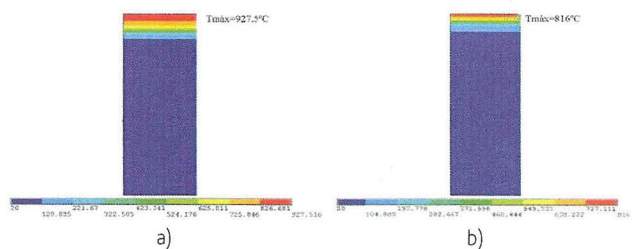


Figura 5 Distribuição de temperaturas no perfil de madeira, ao fim de 1 hora

Para cada uma das situações referidas, a evolução do perfil da temperatura no interior da madeira tem um comportamento diferente. No gráfico da Figura 6, representa-se a temperatura, em diferentes pontos de medição, para o caso em que foi utilizada a curva ISO834 durante uma hora.

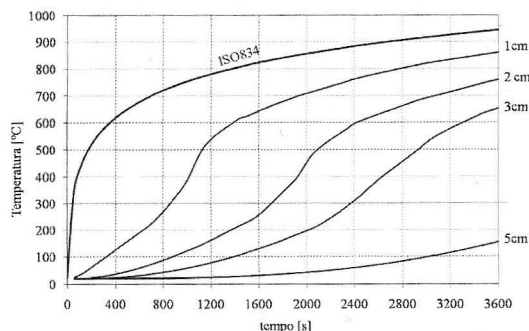


Figura 6 Temperatura em diferentes pontos, função da curva ISO834

Durante uma hora de exposição à acção do fogo, e considerando os pontos de medição, podem ser comparados os instantes de tempo em que ocorre a carbonização, utilizando os modelos enunciados nas equações 1 e 2. Na Tabela IV indicam-se os instantes de tempo obtidos com essas equações e com os valores obtidos no programa Ansys, para o modelo sob acção do fogo. Os valores obtidos numericamente aproximam-se aos obtidos com a equação 1, sendo os valores obtidos com a equação 2 inferiores. Observa-se ainda que durante uma hora sob efeito da acção térmica, a carbonização na madeira atinge todos os pontos de medição com excepção do ponto a 5 cm da frente térmica, tal como se observa na Figura 6.

Tabela IV Tempo necessário para a carbonização em diferentes pontos

Espessura carbonizada	Eq. 1, EC5 [4]	Eq. 2, White [5]	Ansys (ISO834)
1 cm	923,1s	744,0s	873,6s
2 cm	1846,2s	1488,0s	1735,0s
3 cm	2769,2s	2232,0s	2400,0s

O gráfico apresentado na Figura 7 traduz a evolução da temperatura nos mesmos pontos de medição, considerando agora o modelo numérico baseado na curva de aquecimento linear. Estes resultados não poderão ser comparados com as equações analíticas 1 e 2, sendo posteriormente analisados em conjunto com os resultados obtidos experimentalmente.

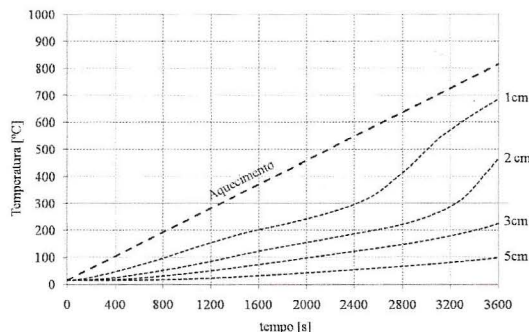


Figura 7 Temperatura em diferentes pontos, função da curva de aquecimento

No gráfico da Figura 7 verifica-se que só dois pontos de medição ultrapassam valores de temperatura a 300 °C, durante a exposição térmica, ficando nesses pontos a madeira carbonizada. Verifica-se ainda que em relação ao gráfico da Figura 6, a carbonização acontece mais tarde. Também as temperaturas registadas ao fim de uma hora, em qualquer um dos 5 pontos de medição, são sempre inferiores.

As Figuras 8 a 11 representam a evolução das temperaturas nos diferentes pontos de medição dos perfis de madeira obtidas experimentalmente, durante uma hora de exposição a altas temperaturas. Os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos, sendo representada a curva de aquecimento da unidade térmica em todos os ensaios.

Na Figura 8 apresenta-se a evolução da temperatura no ponto de medição da madeira a 1 cm da frente de aquecimento. Pode verificar-se que no intervalo entre 1800 s-2400 s de exposição a altas temperaturas, e na posição a 1 cm do topo da superfície aquecida, a madeira encontra-se carbonizada. Nesta posição, e após uma hora, a temperatura atinge valores compreendidos entre 700 °C - 800 °C, conforme se verifica nos 12 ensaios realizados. Verifica-se ainda que as temperaturas ao longo do tempo permanecem inferiores às impostas pela unidade de aquecimento, cuja taxa de aquecimento imposta foi atingir 800 °C/hora. Por outro lado, os resultados experimentais têm um comportamento semelhante aos obtidos numericamente. Numa fase final dos ensaios, verifica-se que a evolução da temperatura determinada numericamente regista valores inferiores aos resultados dos ensaios. Este comportamento pode justificar-se pelo facto de que os perfis de madeira utilizados apresentam um índice de água e massa volúmica diferentes do considerado no EC5 [4] e traduzido nas propriedades térmicas incorporadas no modelo numérico.

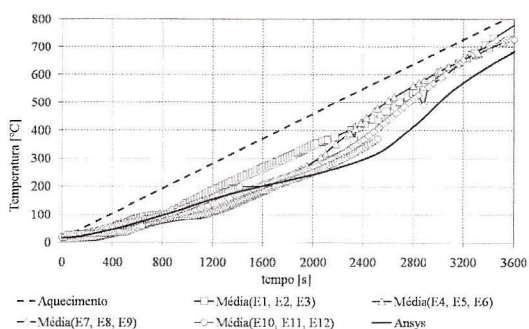


Figura 8 Evolução da temperatura a 1 cm do topo da superfície

Na posição a 2 cm do topo da superfície, a madeira carboniza após os 2800 s, conforme se observa no gráfico da Figura 9. Neste ponto de medição, e após uma hora de exposição a altas temperaturas, atingiram-se valores compreendidos entre 500 °C - 600 °C. Existe um comportamento aproximado entre a curva numérica e os valores médios obtidos nos ensaios.

A 3 cm do topo da superfície e até uma hora de exposição a altas temperaturas, as temperaturas na madeira apresentam-se inferiores a 250 °C - 350 °C, conforme se observa na Figura 10. Neste ponto, e durante este intervalo de tempo, a madeira não se encontra carbonizada. A tendência é a madeira ficar carbonizada

neste ponto, para instantes de tempo superiores a uma hora. Os valores experimentais registam uma boa concordância com os valores numéricos. Verifica-se ainda que, encontrando-se o ponto de medição mais distante da frente de calor, a gama de temperaturas registada vai sendo cada vez mais baixa.

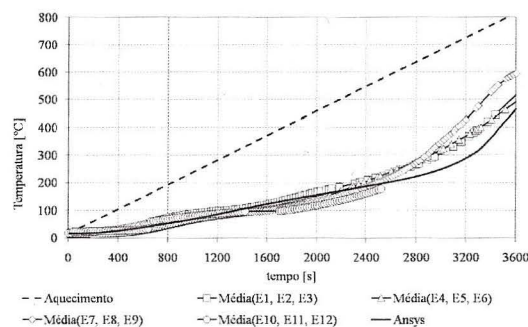


Figura 9 Evolução da temperatura a 2 cm do topo da superfície

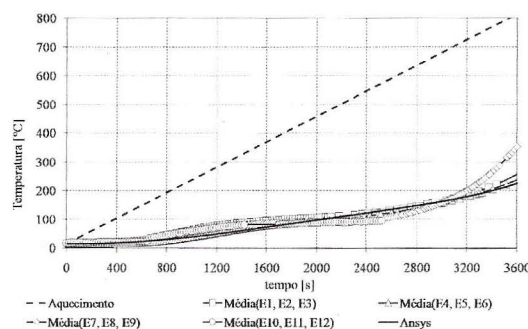


Figura 10 Evolução da temperatura a 3 cm do topo da superfície

Na Figura 11 apresenta-se o gráfico relativo ao registo efectuado do ponto de medição nos perfis de madeira a 5 cm do topo da superfície aquecida. Durante uma hora de exposição a altas temperaturas, os valores de temperaturas alcançados são inferiores a 100 °C, encontrando-se este ponto de medição não carbonizado. Neste caso, e a esta distância da frente de calor, considera-se que a madeira não foi afectada pela acção térmica.

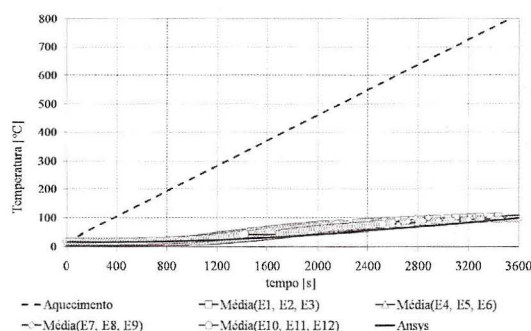


Figura 11 Evolução da temperatura a 5 cm do topo da superfície

Foram ainda registados os valores experimentais a 25 cm da superfície aquecida nos vários perfis de madeira. Durante uma hora

em que decorreu o ensaio, a secção dos diferentes perfis permaneceu sempre à temperatura normal de serviço, cujo valor médio obtido foi de 17,2 °C. Considera-se assim que, dependendo do tempo de exposição a elevadas temperaturas e em função das dimensões das secções, é possível identificar zonas intactas nos perfis de madeira.

A medição das temperaturas nos perfis, em função do tempo de exposição a elevadas temperaturas, será indicadora na determinação da secção útil resistente em perfis desta natureza.

Na Figura 12 apresenta-se o resultado do ensaio final em cada um dos perfis de madeira, após uma hora de exposição a altas temperaturas.

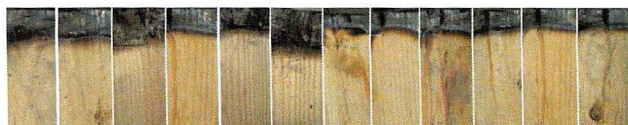


Figura 12 Camada carbonizada em perfis de madeira ensaiados

Como se pode observar, existe alguma diferença da espessura da camada carbonizada nas diferentes amostras. Esta diferença justifica-se pela dificuldade no controlo do teor de água nos diferentes elementos, que afecta a respectiva massa volúmica das amostras. No entanto, conclui-se que existem três zonas distintas nos perfis ensaiados, uma zona correspondente à camada carbonizada, uma zona intermédia considerada a zona da pirólise e a zona da madeira intacta ou núcleo frio.

4 Conclusões

A madeira exposta a altas temperaturas apresenta uma camada de carbonização que retarda o processo de deflagração para o seu interior. A superfície carbonizada pode ser considerada isolante num elemento estrutural, em função do tempo de exposição ao calor e das dimensões do elemento. Nos ensaios efectuados foi considerada unicamente a imposição de calor numa direcção do elemento estrutural, através de um processo de degradação anaeróbio. Foram apresentados resultados experimentais em diferentes perfis de madeira utilizando uma técnica alternativa. Esta técnica permitiu verificar a evolução da temperatura e da camada de carbonização ao longo de um perfil de madeira. Outras técnicas experimentais podem ser sugeridas, nomeadamente a utilização de fornos com queimadores a gás. Neste caso, a queima da madeira pode ser conseguida através de um processo de aquecimento sob acção do fogo normalizado. A metodologia apresentada no presente artigo, para a obtenção da camada carbonizada, pode ser utilizada independentemente do processo de aquecimento.

5 Referências

[1] Barreira L., Fonseca E., – “Cálculo da Espessura Carbonizada em estruturas de Madeira Quando Submetidas à Acção do Fogo”, II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica'08, Proceedings, Aveiro, 2008.

- [2] Fonseca E.M.M., Barreira L., – “Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures”, WIT Press, Third International Conference on Safety and Security Engineering, M. Guarascio, C.A. Brebbia, F. Garzia (Ed.), July, Roma, Italy, ISBN: 978-1-84564-193-1, pp. 449-457, 2009.
- [3] Moura E., – “Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para o Eucalyptus citriodora E. grandis”, Tese de Doutoramento, Universidade de S. Paulo, 2005.
- [4] [EN 1995-1-2] prEN 1995-1-2 – “Eurocode 5: Design of timber structures”, Part 1-2: General-Structural fire design, CEN, Brussels, 2003.
- [5] White R.H., Dietsberger M.A. – “Fire Safety”, Chapter 17, Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999.
- [6] Njankouo J. M., Dotreppe J.C., Franssen J.M. – “Fire Resistance of Timbers from Tropical Countries and Comparison of Experimental Charring Rates with Various Models”, Construction and Building Materials, Vol.19, pp. 376-386, 2005.
- [7] Hakkarainen T., Mikkola E., Östman B, Santaridis L., Brumer H., Piispanen P. – “InnoFireWood-Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications”, VTT, SP Trätek, KTH, 2005.
- [8] [EN1991-1-2] – “Eurocode 1: Actions in Structures”, Part 1-2: General Actions-Actions on structures exposed to fire. CEN, Brussels, 2002.