

## III Conferência Nacional em mecânica de fluidos, termodinâmica e energia

17 e 18 de Setembro de 2009, Bragança

[página inicial](#)

[áreas temáticas](#)

[comissão organizadora](#)

[comissão de honra](#)

[comissão executiva](#)

[comissão científica](#)

[datas importantes](#)

[submissão de trabalhos](#)

[programa \(novo\)](#)

[informações \(novo\)](#)

[inscrição e pagamento](#)

[como chegar](#)

[alojamento](#)

[patrocínio e apoios](#)

[contactos](#)

[Bragança](#)

### comissão científica

- A. F. Miguel - Universidade de Évora
- A. Heitor Reis - Universidade de Évora
- Abel Rouboa - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
- António C. Sousa - University of New Brunswick - Canadá
- António Gameiro Lopes - Universidade de Coimbra
- António Mendes - Universidade da Beira Interior
- António Moreira - Instituto Superior Técnico
- António Raimundo - Universidade de Coimbra
- Carlos Pinho - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Celestino R. Ruivo - Universidade do Algarve
- Falcão Campos - Instituto Superior Técnico
- Fernando Pinho - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- João Campos - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- João Viegas - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- Jorge Capote Abreu - Universidade de Cantabria



# Determinação da carbonização na madeira de pinheiro quando submetida a elevadas temperaturas para diferentes direcções das fibras

Luisa M S Barreira<sup>1</sup> e Elza M M Fonseca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Apartado 1134, Bragança, Portugal

email: [efonseca@ipb.pt](mailto:efonseca@ipb.pt) <http://www.ipb.pt>

---

## Sumário

*A grande vulnerabilidade da madeira quando submetida a uma acção accidental, requer uma avaliação rigorosa do seu comportamento térmico e mecânico, quando utilizada para fins de construção. Com o presente trabalho, pretende-se determinar experimentalmente a espessura da camada carbonizada em perfis de madeira de pinheiro, submetidos a elevadas temperaturas. Será verificada a influência da acção térmica nos perfis de madeira atendendo às diferentes direcções das fibras. Os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos obtidos utilizando um programa de elementos finitos, o Ansys.*

---

**Palavras-chave:** Madeira; Carbonização; Acção Térmica; Direcção das Fibras.

## 1 Introdução

A madeira é, provavelmente, o material de construção mais antigo dada a sua disponibilidade na natureza e a sua relativa facilidade de utilização. A madeira constitui um material complexo e com características muito diferentes de outros materiais de construção. 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 material exige a verificação da sua resistência e protecção contra acções de acidente, 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. Sendo a madeira combustível, existem grandes preocupações inerentes ao projecto e à protecção destes materiais. 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]. Quando se expõe ao fogo uma secção recta robusta em madeira, é formada uma camada superficial de carvão que actua como uma espécie de isolante, impedindo a rápida saída dos gases inflamáveis e a propagação do calor para o interior da secção. Desta forma, o aquecimento e a degradação do material realizam-se a uma velocidade menor, o que faz com que a sua capacidade resistente seja favorável em relação a outros materiais. Isto deve-se em parte, à conservação das suas propriedades físicas, mesmo após, ter sido exposta a elevadas temperaturas, mantendo-se o interior da secção a baixas temperaturas e a zona envolvente a altas temperaturas [2]. A temperatura na camada base carbonizada da madeira, em contacto com o núcleo da secção, é de aproximadamente 300°C, conforme o Eurocódigo 5, EC5 [3]. As propriedades térmicas da madeira relacionam-se com o teor de humidade, a orientação do grão, a composição química e a permeabilidade, sendo função da temperatura. Com base nesse conhecimento, é possível avaliar-se a segurança de estruturas em madeira afectadas por elevadas temperaturas e controlar, na fase de projecto, o tempo de resistência dos elementos estruturais antes do colapso da estrutura.

## 2 Metodologia do trabalho

A espécie de madeira em estudo neste trabalho é o pinheiro. 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 no desenvolvimento deste trabalho, são as referenciadas em [4], em que se considerou a massa específica igual a 509kg/m<sup>3</sup>. Essas características foram obtidas em elementos de madeira de pinheiro com uma humidade inicial entre 8% a 9% e expostos ao fogo em função da curva normalizada ASTM E119.

## 2.1 Modelo experimental

Neste trabalho apresenta-se um método experimental para a determinação da espessura carbonizada em perfis de madeira de pinheiro, figura 1. A camada carbonizada é determinada pela medição da temperatura em 5 pontos diferentes, utilizando termopares do tipo K e um sistema de leitura para aquisição de dados, o MGCPlus. A medição da temperatura é efectuada a 1, 2, 3, 5 e 25 cm da frente de exposição a altas temperaturas, permitindo avaliar a carbonização da madeira. A exposição a altas temperaturas na madeira é efectuada através da colocação de resistências eletro-cerâmicas, cuja potência da unidade térmica corresponde a 70kVA. A curva de aquecimento imposta na unidade térmica é programável e controlada ao longo de todo o ensaio, tendo sido utilizado uma taxa de aquecimento igual a 800°C/hora. A temperatura média registada na madeira é de 16°C.

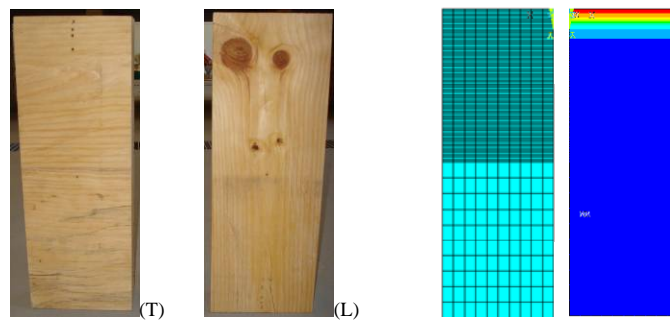


**Fig.1.** Método experimental.

São considerados vários perfis em pinheiro, conforme se representa na figura 1, de igual dimensão (500x180x180mm), mas orientados no corte segundo as direcções das suas fibras, figura 2. Alguns desses perfis foram submetidos, numa face de exposição, a altas temperaturas segundo a direcção transversal das fibras (T1, T2, ...Tn). Os restantes perfis foram submetidos, também numa face de exposição a altas temperaturas, mas segundo a direcção longitudinal das fibras (L1, L2, ...Ln).

## 2.2 Modelo numérico

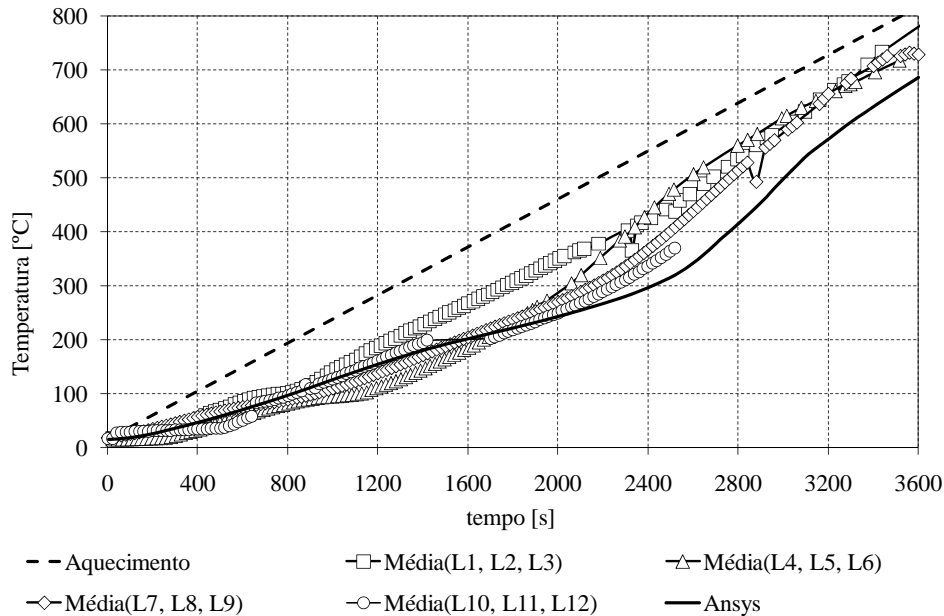
Utilizou-se um modelo numérico com as mesmas dimensões dos perfis para ensaio, conforme se representa na figura 2, tendo como base a utilização das propriedades térmicas enunciadas por [3]. As características físicas da madeira de pinheiro adoptadas neste estudo numérico são as referenciadas em [4]. O modelo numérico baseia-se no método dos elementos finitos com base na utilização do programa comercial Ansys. Foi considerada uma análise térmica não-linear em regime transiente, tendo sido utilizado um elemento plano (Plane 77) com dois graus de liberdade por nó. A figura 2 representa ainda a evolução da distribuição das temperaturas obtida com o modelo numérico, para o caso em que a temperatura ambiente evolui em função de uma taxa de aquecimento linear imposta de 800°C/hora. Foi considerada uma temperatura inicial na madeira de 16°C, tal como registada em ambiente laboratorial. Pode observar-se que o perfil submetido a altas temperaturas, no final de 1 hora, apresenta a temperatura máxima de 816°C junto à superfície aquecida.



**Fig.2.** Modelo experimental (T e L) e modelo numérico,  $T_{máx}=816^{\circ}\text{C}$ .

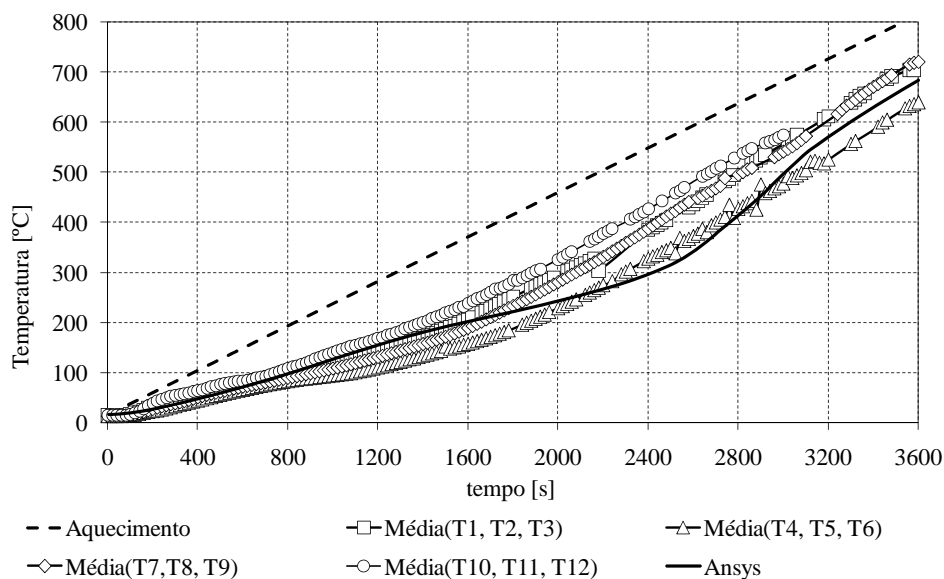
### 3 Discussão dos resultados

As figuras 3 a 6 representam a evolução da temperatura em dois dos diferentes pontos de medição nos perfis de madeira, 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 3 representa-se a evolução da temperatura a 1 cm da frente de aquecimento, na direcção das fibras longitudinais, durante uma hora de exposição, para 12 ensaios efectuados em perfis.



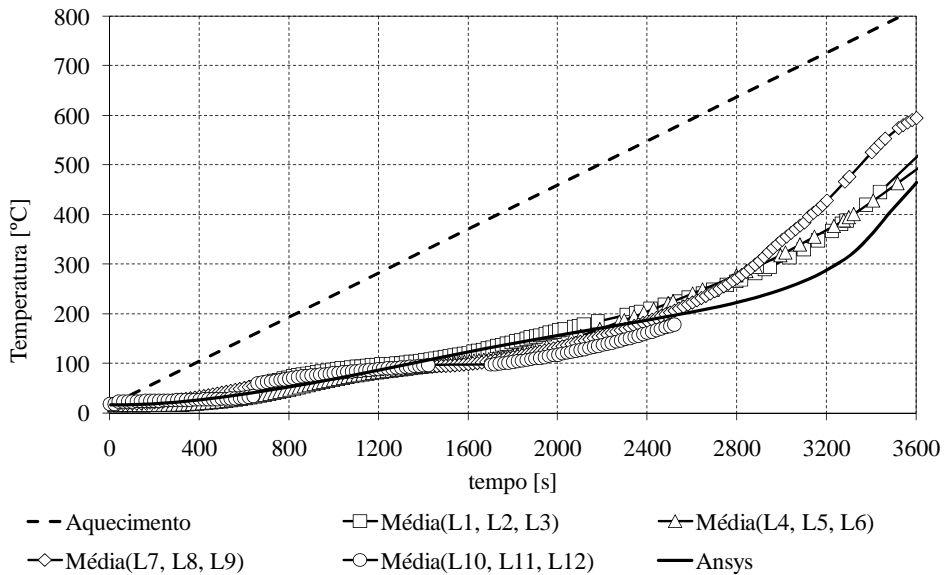
**Fig.3.** Evolução da temperatura a 1cm da frente térmica para os perfis (L).

Pode verificar-se que no intervalo entre 1700s-2300s de exposição a altas temperaturas, e na posição a 1cm 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. Por outro lado, os resultados experimentais têm um comportamento semelhante aos obtidos numericamente, mantendo-se ligeiramente superiores.



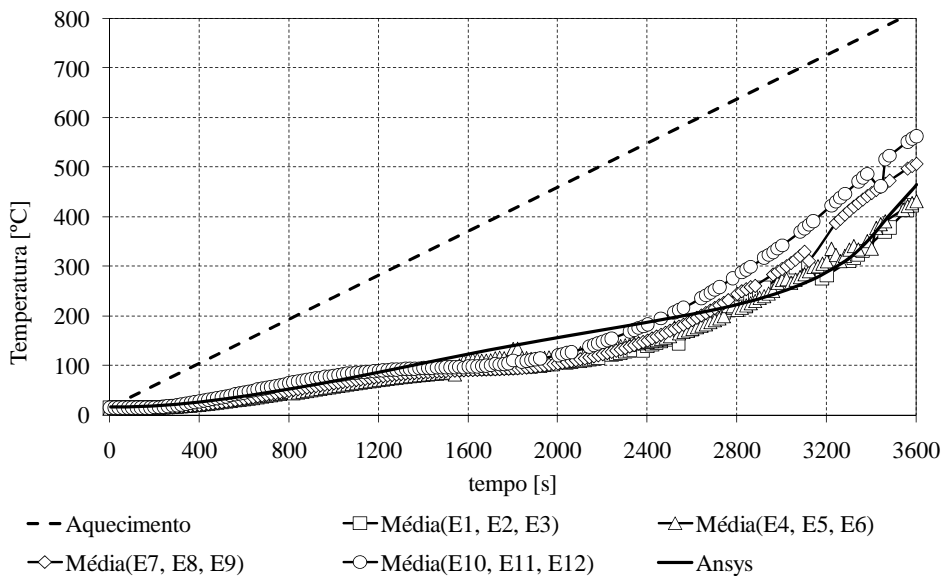
**Fig.4.** Evolução da temperatura a 1cm da frente térmica para os perfis (T).

Nos resultados da figura 4, pode verificar-se que o intervalo em que a madeira carboniza é entre 1800s-2400s, na posição a 1cm do topo da superfície aquecida. Após uma hora, a temperatura atinge valores compreendidos entre 600°C-700°C. Os resultados experimentais aproximam-se mais aos valores obtidos numericamente, do que quando se comparam com os resultados obtidos na figura 3. Pode concluir-se que com o aquecimento da madeira, na direcção transversal, há um retardamento no desenvolvimento da camada carbonizada.



**Fig.5.** Evolução da temperatura a 2cm da frente térmica para os perfis (L).

Os resultados obtidos na figura 5 permitem verificar que é o intervalo entre 2900s-3000s de exposição a altas temperaturas, e na posição a 2cm do topo da superfície aquecida, que a madeira se encontra carbonizada. Nesta posição, e após uma hora, a temperatura atinge valores compreendidos entre 500°C-600°C, conforme se verifica nos ensaios realizados. Por outro lado, os resultados experimentais continuam ligeiramente superiores aos obtidos numericamente.



**Fig.6.** Evolução da temperatura a 2cm da frente térmica para os perfis (T).

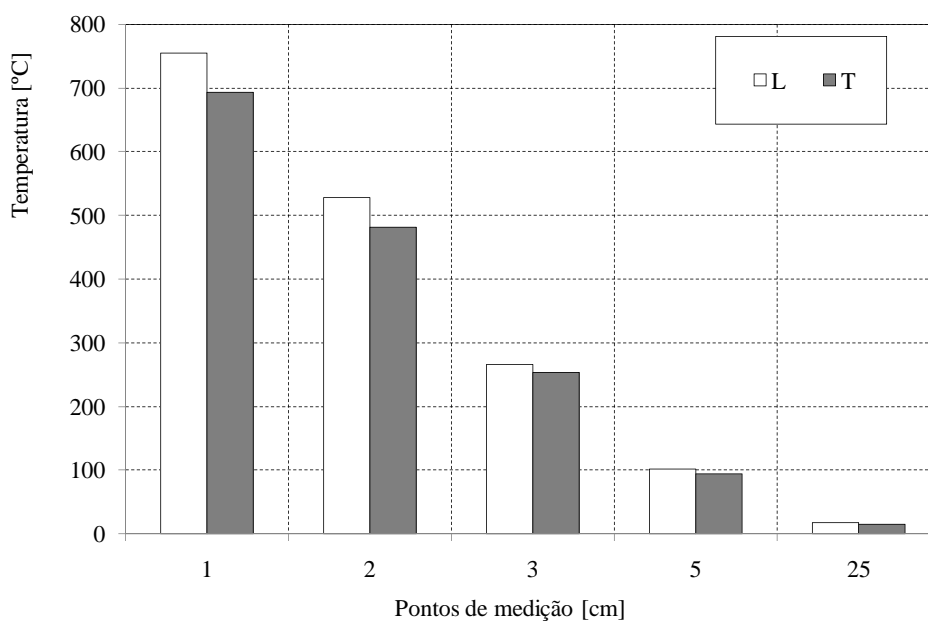
Na posição a 2cm da frente térmica, e após uma hora, a temperatura atinge valores compreendidos entre 450°C-550°C, conforme se verifica nos 12 ensaios apresentados na figura 6. Neste caso, os resultados obtidos permitem verificar que é no intervalo entre 2900s-3200s de exposição a altas temperaturas e na direcção das fibras transversais, que a madeira se encontra carbonizada.

Na tabela 1 apresentam-se os valores médios obtidos no final de 1 hora de exposição a altas temperaturas, para os diferentes perfis de madeira, nos diferentes pontos de medição.

**Tabela 1.** Valores médios de temperatura no final de 1 hora.

Posição	1cm	2cm	3cm	5cm
Pinheiro (L)	755.2	527.5	266.0	102.0
Pinheiro (T)	693.5	481.2	253.8	94.2
Diferença (L) e (T)	61.7	46.3	12.2	7.8

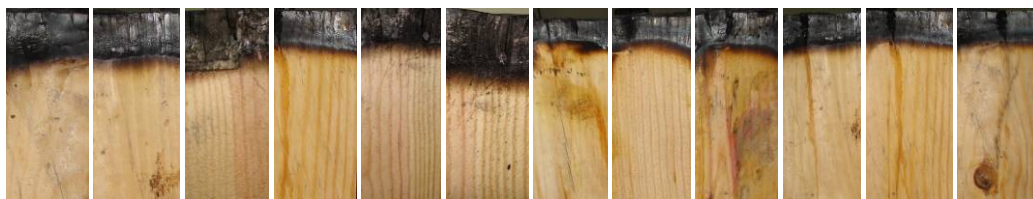
Os valores registados na tabela 1 permitem concluir que a madeira aquecida na direcção longitudinal atinge maiores temperaturas em relação à madeira aquecida na direcção transversal, em qualquer dos pontos de medição. A diferença entre os valores de temperatura são maiores na zona da espessura carbonizada do que ao longo do interior da madeira. A 25cm da frente de calor a madeira encontra-se à temperatura inicial de 16°C. O gráfico da figura 7 representa essa evolução, salientando-se que durante uma hora de exposição à frente térmica, os pontos a 1 e 2cm se encontram na zona da madeira carbonizada. As temperaturas obtidas nos pontos de medição a 3cm, no final de 1 hora, permitem identificar a zona intermédia entre a camada carbonizada e intacta da madeira, ou de pirólise.



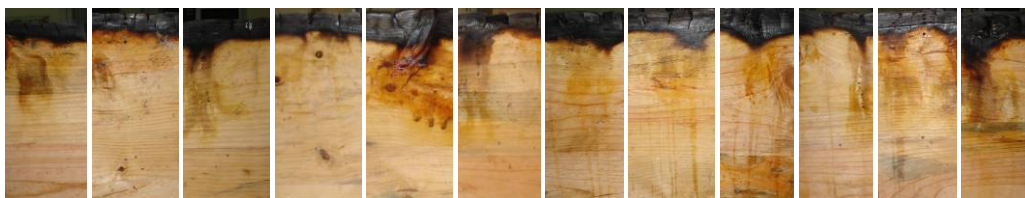
**Fig.7.** Valores médios ao longo da camada carbonizada, perfis (L) e (T).

Com base nos resultados apresentados, verificou-se que os valores de temperatura obtidos na direcção longitudinal são ligeiramente superiores aos da direcção transversal, para um mesmo intervalo de tempo. Desta forma e conforme referido por [4] a carbonização na direcção longitudinal do grão é alegadamente superior à da direcção transversal.

Nas figuras 8 e 9 apresentam-se os resultados dos ensaios finais em cada um dos perfis de madeira ensaiados, após uma hora de exposição a altas temperaturas.



**Fig.8.** Camada carbonizada em perfis (L) de madeira ensaiados.



**Fig.9.** Camada carbonizada em perfis (T) de madeira ensaiados.

Como se pode observar nas figuras 8 e 9, 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. Pode ainda verificar-se um ligeiro decréscimo na camada de carbonização obtida nos perfis de madeira com fibras na direcção transversal, em relação aos perfis com fibras longitudinais, para o mesmo tempo de exposição a altas temperaturas.

#### 4 Conclusões

A madeira exposta a altas temperaturas apresenta uma camada de carbonização que retarda o processo de deflagração para o seu interior. A diminuição da capacidade estrutural na madeira, quando submetida a elevadas temperaturas, acontece devido à redução da secção resistente por carbonização. A superfície carbonizada pode ser considerada isolante num elemento estrutural, em função do tempo de exposição ao calor e das dimensões do elemento. Este trabalho contribui com a apresentação de um método experimental alternativo na avaliação da capacidade resistente de elementos estruturais sob influência de altas temperaturas, na fase de projecto. Este estudo permite verificar a evolução da temperatura e da camada de carbonização ao longo de um perfil de madeira, para diferentes direcções das suas fibras. Pode verificar-se um decréscimo da espessura de carbonização em perfis de madeira de pinheiro aquecidos na direcção das fibras transversal, quando comparados para o mesmo instante de tempo, com o aquecimento dos perfis na direcção das fibras longitudinais. Este decréscimo, observado através do registo de temperaturas, é mais visível junto à frente de calor sendo menor no interior da madeira.

#### Referências

1. L. Barreira, E. Fonseca, Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures, WIT Press, *Third International Conference on Safety and Security Engineering*, C.A. Brebbia (Ed.), Italy, 2009.
2. E. Moura, 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.
3. [EN 1995-1-2] prEN 1995-1-2. *Eurocode 5: Design of timber structures*, Part 1-2: General-Structural fire design, CEN, Brussels, 2003.
4. R.H. White and M.A. Dietenberger, Fire Safety, Chapter 17, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999.