

Cálculo da espessura carbonizada em estruturas de madeira quando submetidas à acção do fogo

Luísa Barreira¹ e Elza Fonseca¹

¹Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão,
Apartado 1134, 5301-857 Bragança, Portugal
email: lbarreira@ipb.pt ; efonseca@ipb.pt <http://www.ipb.pt>

Sumário

A utilização da madeira em construção levanta algumas questões nomeadamente no cumprimento dos aspectos normativos contra riscos de incêndio. No entanto, quando comparada com outros materiais de construção, a madeira apresenta uma boa resistência ao fogo. Com o presente trabalho, pretende-se determinar a espessura da camada carbonizada em função do tempo em elementos estruturais, para diferentes cenários de exposição ao fogo, segundo a curva ISO834, utilizando-se uma ferramenta de elementos finitos.

Palavras chave: Madeira, carbonização, fogo, elementos finitos.

1 Apresentação do trabalho

A combustão da madeira é lenta e regular e o seu comportamento é previsível, apresentando por isso um comportamento diferente e que lhe é favorável. Tal como os 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. Quando a secção recta do componente em madeira é robusta, e exposta ao fogo, forma-se uma camada superficial de carvão, que actua como uma espécie de isolante, impedindo a rápida saída dos gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da secção. Uma vez que o aquecimento e a degradação do material se realizam a uma velocidade menor, a sua capacidade resistente torna-se 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. A temperatura na camada da madeira carbonizada que está em contacto com o núcleo da secção é de aproximadamente 300[°C], conforme o EC5, Eurocódigo 5 [1]. 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 nestes conhecimentos, é possível avaliar a segurança de estruturas afectadas por um incêndio e prever com precisão, o tempo de resistência dos elementos estruturais antes do colapso da estrutura.

No presente trabalho são estudadas duas espécies de madeira diferentes (pinheiro e cedro vermelho), sob acção de diferentes cenários de incêndio. Para cada uma das situações será calculada a espessura da camada carbonizada com base nos resultados obtidos numericamente através da utilização do programa Ansys, de elementos finitos para análise não linear térmica em regime transiente. Os valores obtidos serão comparados com a equação de projecto do EC5 e modelos empíricos propostos por [2]. As propriedades térmicas do material têm um comportamento não linear, tendo sido consideradas as características físicas do pinheiro e do cedro vermelho, conforme referenciado por [2].

A tabela 1 resume os valores determinados para a velocidade de carbonização nas espécies em estudo, para a exposição ao fogo, numa secção quadrangular. No caso do pinheiro, há uma concordância no valor obtido com o proposto pelo EC5. O cedro vermelho apresenta uma velocidade de carbonização ligeiramente superior à proposta pelo EC5 bem como no modelo linear proposto por [2]. O gráfico da figura 1 representa a evolução linear da camada carbonizada no tempo, para as duas espécies em estudo. O cedro vermelho apresenta para o mesmo tempo de exposição ao fogo, uma maior profundidade de camada carbonizada. As diferentes propriedades físicas da madeira utilizada, permitem concluir a sua influência no cálculo da velocidade de carbonização.

Tabela 1. Comparação da velocidade de carbonização no perfil quadrangular.

Espécie	Ansys [mm/min]	EC5 [1] [mm/min]	White et al [2] [mm/min]
Pinheiro	0.67	0.65 - 0.8	0.81
Cedro vermelho	0.89	0.65 - 0.8	0.82

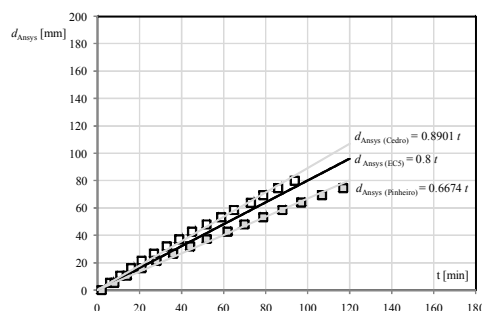
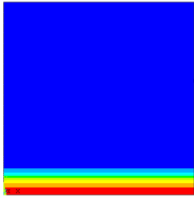
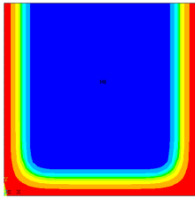
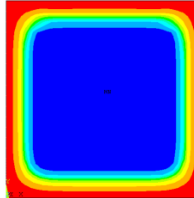
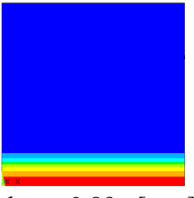
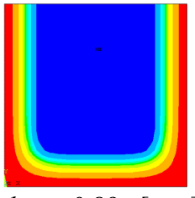
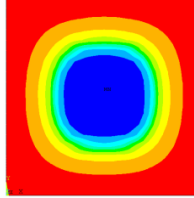


Fig.1. Espessura carbonizada na secção.

A tabela 2 apresenta o perfil de temperaturas obtido para a secção quadrangular em estudo, considerando os vários cenários de incêndio.

Tabela 2. Camada carbonizada no perfil 400x400[mm²] para t=60[min].

	Fogo num lado	Fogo em três lados	Fogo em quatro lados
Pinheiro	 $d_{\text{Ansys}} = 0.67 t$ [mm] $T_{\text{int}} = 20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}} = 928[^\circ\text{C}]$	 $d_{\text{Ansys}} = 0.67 t$ [mm] $T_{\text{int}} = 20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}} = 938[^\circ\text{C}]$	 $d_{\text{Ansys}} = 0.67 t$ [mm] $T_{\text{int}} = 20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}} = 938[^\circ\text{C}]$
Cedro vermelho	 $d_{\text{Ansys}} = 0.89 t$ [mm] $T_{\text{int}} = 20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}} = 930[^\circ\text{C}]$	 $d_{\text{Ansys}} = 0.89 t$ [mm] $T_{\text{int}} = 20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}} = 939[^\circ\text{C}]$	 $d_{\text{Ansys}} = 0.89 t$ [mm] $T_{\text{int}} = 23[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}} = 1043[^\circ\text{C}]$

Como se verifica, no caso do incêndio se efectuar numa das faces do elemento estrutural, a condução de calor dá-se numa só direcção considerando-se por isso uma variação linear. Quando a exposição ao fogo actua em mais que uma face da secção, a variação da camada carbonizada não é linear. Para este tipo de cenário verifica-se o arredondamento previsto nos cantos das diferentes secções estudadas.

2 Conclusões

O modelo numérico revelou-se de grande importância na determinação da camada carbonizada, não só na situação de diferentes cenários de fogo, como na utilização de diferentes materiais. Para além do cálculo do perfil de temperaturas em regime transiente, foi possível registar e calcular a velocidade de crescimento da camada de carbonização que ocorre na situação de exposição ao fogo em materiais de madeira. Verificou-se que o comportamento da madeira durante a combustão é afectado pela massa específica do material, ou seja, a baixa massa específica facilita a ignição. Para as espécies em estudo, o pinheiro apresenta uma maior resistência no desenvolvimento da camada carbonizada quando em comparação com o cedro vermelho. Por isso, a resistência térmica do pinheiro é mais elevada quando comparada com a do cedro. Por outro lado, em relação ao tamanho das secções, as maiores dimensões promovem uma superfície carbonizada considerada isolante no elemento estrutural em estudo.

Referências

- [EN 1995-1-2] prEN 1995-1-2. Eurocode 5: *Design of timber structures*, Part 1-2: General-Structural fire design, CEN, Brussels, 2003.
- 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.

Cálculo da espessura carbonizada em estruturas de madeira quando submetidas à acção do fogo

Luísa Barreira¹ e Elza Fonseca¹

¹Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão,
Apartado 1134, 5301-857 Bragança, Portugal
email: lbarreira@ipb.pt ; efonseca@ipb.pt <http://www.ipb.pt>

Sumário

A utilização da madeira em construção levanta algumas questões nomeadamente no cumprimento dos aspectos normativos contra riscos de incêndio. No entanto, quando comparada com outros materiais de construção, a madeira apresenta uma boa resistência ao fogo. Com o presente trabalho, pretende-se determinar a espessura da camada carbonizada em função do tempo em elementos estruturais, para diferentes cenários de exposição ao fogo, segundo a curva ISO834, utilizando-se uma ferramenta de elementos finitos.

Palavras chave: Madeira, carbonização, fogo, elementos finitos.

1 Introdução

A combustão da madeira é lenta e regular e o seu comportamento é previsível, apresentando por isso um comportamento diferente e que lhe é favorável. Tal como os 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. Quando a secção recta do componente em madeira é robusta, e exposta ao fogo, forma-se uma camada superficial de carvão, que actua como uma espécie de isolante, impedindo a rápida saída dos gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da secção. Uma vez que o aquecimento e a degradação do material se realizam a uma velocidade menor, a sua capacidade resistente torna-se 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. A temperatura na camada da madeira carbonizada que está em contacto com o núcleo da secção é de aproximadamente 300[°C], conforme o EC5, Eurocódigo 5 [1]. 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 nestes conhecimentos, é possível avaliar a segurança de estruturas afectadas por um incêndio e prever com precisão, o tempo de resistência dos elementos estruturais antes do colapso da estrutura.

2 Resistência ao fogo da madeira

Quando se calcula a capacidade da resistência ao fogo de elementos estruturais de madeira, a degradação térmica do material e a formação da camada de carbonização são os factores mais importantes. A massa específica da madeira varia com a camada de carbonização, devido à degradação do material provocada pela pirólise do fogo. Por seu lado esta zona não tem resistência efectiva fazendo com que exista uma redução da secção recta do componente. Há uma zona de transição entre o material queimado e o núcleo do material. A temperatura a partir da qual a madeira começa a carbonizar é de 300[°C] segundo o EC5. A secção recta reduz de uma quantidade igual em cada um dos lados em que for exposta ao fogo. A profundidade de carbonização depende do tempo da exposição ao fogo. Estas características geométricas contribuem para verificar a capacidade de resistência ao fogo. Por comparação com outros elementos de construção tradicionais, verifica-se que a madeira apresenta uma excepional resistência ao fogo. Ao contrário do que ocorre com estruturas em aço em que o colapso, por acção do fogo, resulta da diminuição das propriedades mecânicas do material com o aumento da temperatura, a falha da capacidade na madeira, só acontece pela perda, por carbonização, da secção resistente. Excluindo os elementos de ligação da estrutura, cuja protecção ao fogo deve ser objecto de particular atenção, um correcto dimensionamento da secção dos elementos de construção em madeira, considerando as solicitações a frio, acrescidas da perda de secção esperada em caso de incêndio, assegura, sem recurso a sistemas de protecção especiais, o tempo de estabilidade ao fogo desejado.

2.1 Espécies de madeira em estudo

As duas espécies de madeira em estudo são o pinheiro e o cedro vermelho. O pinheiro-bravo ou *Pinus pinaster* é uma das espécies mais utilizada, representando 40% da área florestal (Fonte: <http://pt.wikipedia.org>). O pinheiro-bravo é a conífera (de folha longa e fina) mais abundante, estendendo-se por toda a faixa litoral a norte do Tejo e avançando pelo interior, sobretudo ao longo dos vales do Mondego, do Vouga e do Douro. Constitui, assim, uma das mais típicas constantes da paisagem portuguesa. A sua importância económica é elevada, já que a madeira do pinheiro-bravo tem sido amplamente utilizada na construção, na indústria do papel e na produção de resina. Em relação ao cedro, as espécies mais utilizadas são o cedro-vermelho ou *Red Cedar* e o cedro-branco ou *White Cedar*. É uma espécie conífera de características leve a moderadamente pesada, é macia ao corte, durável em ambiente seco, com excelentes qualidades. Muito utilizada em compensados, contraplacados, esculturas e obras, móveis em geral, marcenaria, construção civil, naval e aeronáutica, etc. Esta árvore é ainda largamente utilizada no paisagismo de parques e de grandes jardins.

Para o trabalho em questão, as características físicas adoptadas para estas duas espécies de madeira, são as enunciadas por [2]. Tiveram como base ensaios de exposição ao fogo, função da curva normalizada ASTM E119, possuindo uma humidade percentual inicial entre os 8% a 9% de água.

Tabela 1. Características das espécies de madeira em estudo.

Espécies	ρ [kg/m ³]	Carbonização linear β' [min/mm]	Carbonização não-linear β' [min/mm ^{1,23}]
Pinheiro	509	1.24	0.56
Cedro vermelho	310	1.22	0.56

2.2 Modelos analíticos para cálculo da espessura da camada de carbonização na madeira

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

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

onde $d_{char,0}$ [mm] representa a espessura da camada de carbonização numa direcção, t o tempo em [min] de exposição ao fogo e β_0 [mm/min] a velocidade de carbonização na direcção do fogo.

Quando o fogo deflagra em mais que uma direcção, o efeito dos cantos arredondados na secção recta também devem ser incluídos. Nesse caso, o EC5 propõe a utilização da equação na seguinte forma:

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (2)$$

Neste caso, $d_{char,n}$ [mm] representa a espessura da camada de carbonização que incorpora o efeito do canto da secção e β_n [mm/min] a velocidade de carbonização nas diferentes direcções do fogo.

Os valores propostos para a velocidade de carbonização são função da massa específica da madeira, conforme se apresenta na tabela 2.

Tabela 2 - Velocidade de carbonização de espécies coníferas, segundo EC5.

Material	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
MLC, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Madeira maciça, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8

β_0 – velocidade de carbonização básica para exposição do fogo numa direcção;
 β_n – velocidade de carbonização nominal, incluindo o efeito de arredondamento nos cantos na secção e do aparecimento de fissuras.
MLC – madeira laminada colada

Em geral há concordância com a temperatura a partir da qual as propriedades da madeira variam, considerada a partir dos 288[°C]-300[°C]. Um dos modelos mais utilizados, apresentado por [2], é obtido através de resultados experimentais em diferentes espécies de madeira. É um modelo simples linear que permite determinar o tempo de exposição ao fogo baseado na espessura da camada de carbonização:

$$t = \beta' d_c \quad (3)$$

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

É também apresentado por [2], um modelo não linear como método alternativo ao anterior, uma vez que estudos têm demonstrado que a velocidade de carbonização na madeira é dependente das suas propriedades físicas:

$$t = \beta' d_c^{1.23} \quad (4)$$

β' é o coeficiente que representa a taxa de carbonização não linear (tabela 1) em [$\text{min}/\text{mm}^{1.23}$].

2.3 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas do material têm um comportamento não linear, tendo sido consideradas as características físicas do pinheiro e do cedro vermelho, conforme referenciado por [2] através da tabela 1. O anexo B do EC5 representa os valores das propriedades térmicas a utilizar em projecto, na situação de exposição ao fogo normalizado. As tabelas seguintes resumem os valores da condutividade térmica, do calor específico e da densidade da madeira, assumindo uma humidade inicial de 12%. Na tabela 3 e na figura 1 encontram-se os valores da condutividade térmica da madeira função da temperatura.

Tabela 3. Condutividade Térmica k .

Temperatura [°C]	k [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
20	0.12
200	0.15
350	0.07
500	0.09
800	0.35
1200	1.50

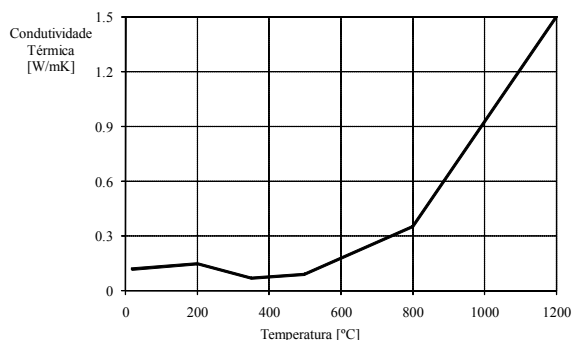


Fig.1. Variação da Condutividade Térmica.

O calor específico da madeira e da camada carbonizada é função dos valores apresentados na tabela 4 e graficamente apresentados na figura 2. O pico verificado para um valor de temperatura igual a 100[°C] deve-se ao aquecimento necessário para a evaporação da humidade da madeira.

Tabela 4. Calor Específico C_p .

Temperatura [°C]	C_p [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
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

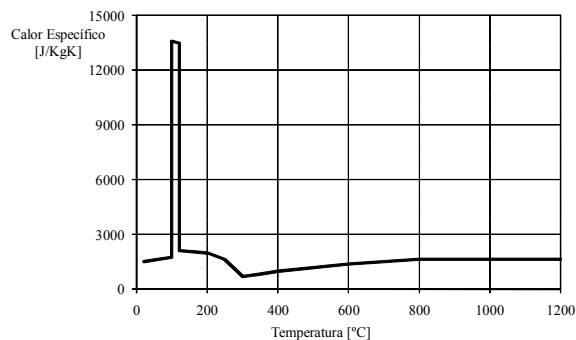


Fig.2. Variação do Calor Específico.

A presença de água na madeira faz variar tanto a massa como o volume da madeira, afectando a sua massa específica. Assim, esses valores são função de determinado teor de humidade da madeira. Quanto maior o teor de humidade maior o valor da massa específica. A variação da massa específica, com o teor de humidade de madeira, é aproximadamente linear até cerca de 25% a 30% do valor do teor de humidade. A taxa da massa específica da madeira seca e considerando uma humidade inicial de 12% é função dos valores apresentados na tabela 5. Na figura 3 representa-se a evolução com a temperatura da massa específica para as duas espécies em estudo.

Tabela 5. Massa Específica ρ .

Temperatura [°C]	Taxa
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

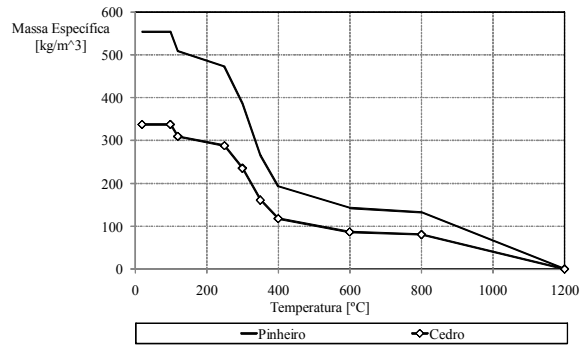


Fig.3. Variação da Massa Específica das duas espécies.

2.4 Curva de fogo normalizada

A evolução da temperatura de um incêndio pode ser dada através de curvas nominais da temperatura em função do tempo ou sob a forma de curvas paramétricas, definidas para o efeito no EC1, Eurocódigo 1, [3]. A curva de incêndio padrão ISO834, especificação ISO:1975, permite obter a evolução da temperatura ambiente em função da seguinte expressão analítica:

$$T = T_0 + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (5)$$

onde T representa a temperatura ambiente em [°C], a temperatura dos gases do compartimento de incêndio no instante t , T_0 é a temperatura inicial do compartimento de incêndio, geralmente a 20[°C] e t o tempo decorrido desde o início em [min].

A resistência ao fogo é o tempo [min], durante o qual um determinado sistema construtivo mantém, em condições de fogo normalizado ISO834, as exigências que lhe são solicitadas em termos de estabilidade; ausência de emissão de gases inflamáveis pela face não exposta ao fogo, estanqueidade à passagem de chamas, gases quentes e resistência térmica suficiente para impedir que na face não exposta se alcancem temperaturas superiores, [4]. A figura 4 representa a curva temperatura-tempo correspondente à condição de fogo normalizado.

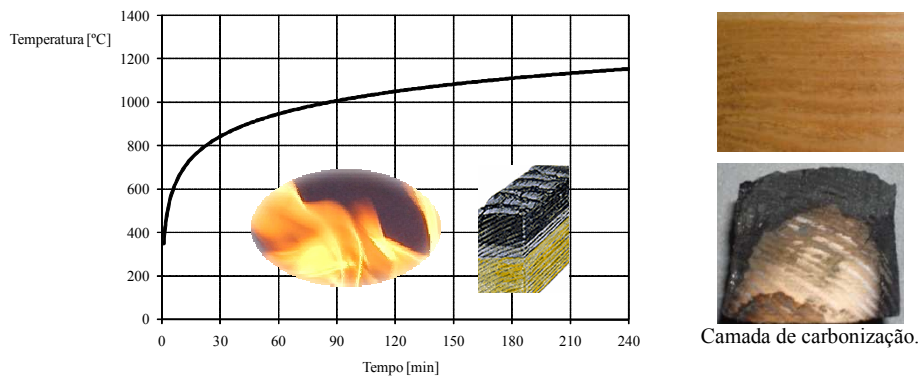


Fig. 4. Curva padrão da temperatura, função do tempo. Degradação da madeira exposta ao fogo.

3 O método dos elementos finitos aplicado à equação de calor

A equação básica que governa a transferência de calor através de um sólido [6-8], num material isotrópico é obtida através da equação:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Onde \dot{Q} representa a quantidade de calor gerado internamente por unidade de volume e tempo, ρ a massa específica, c_p o calor específico e λ a condutividade térmica.

A equação diferencial da condução do calor (6) tem que satisfazer as condições iniciais e de fronteira do problema, indicadas na figura 5.

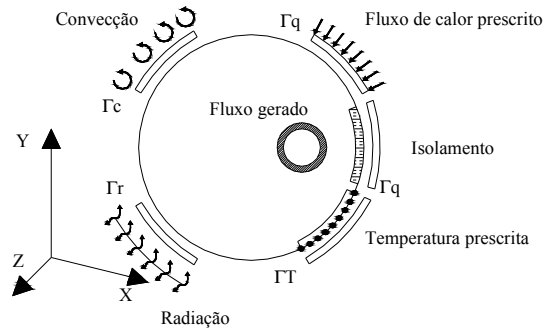


Fig.5. Condições fronteira em problemas térmicos.

No problema em estudo, e considerando a acção do fogo, são consideradas as condições de fronteira relativas à presença da convecção, radiação e isolamento na estrutura. Assim, o coeficiente de transmissão de calor por convecção considerado, e de acordo com o EC1, para superfícies expostas ao fogo utilizando a curva ISO834 é igual a $25[\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$ e o valor da emissividade da superfície do elemento estrutural igual a 0.8, conforme proposto no EC5. A temperatura ambiente evolui de acordo com a equação (5), tendo sido considerada uma temperatura inicial de $20[\text{°C}]$.

O método dos resíduos pesados permite passar da forma diferencial das equações à sua forma integral, conforme referido por vários autores [6-8]. A aplicação do método dos elementos finitos permite obter um sistema global de equações, com a seguinte forma:

$$[K] \{T\} + [C] \{\dot{T}\} = \{F\} \quad (7)$$

A representação dos elementos constituintes da matriz de condutibilidade térmica K , da matriz de capacidade calorífica C e do vector F representativo das forças térmicas, no domínio cartesiano são função expressas em função das expressões:

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz + \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_{cr}^e} N_i N_j h_{cr} d\Gamma_{cr}^e \quad (8.a)$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho C_p N_i N_j dx dy dz \quad (8.b)$$

$$F_i = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} dx dy dz - \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_{cr}^e} h_{cr} T_{\infty} N_i d\Gamma_{cr}^e \quad (8.c)$$

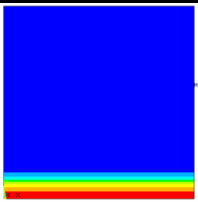
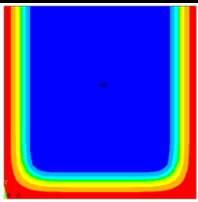
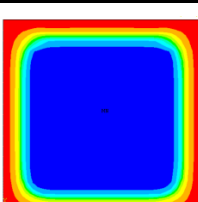
onde E representa o número total de elementos, n o número de elementos com fronteira do tipo convecção e radiação Γ_{cr} e p o número de elementos com fronteira do tipo adiabático Γ_q .

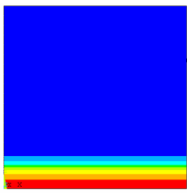
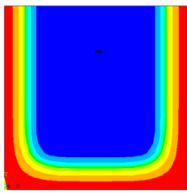
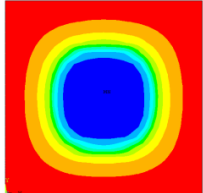
4 Casos em estudo: pinheiro e cedro vermelho

No presente trabalho são estudadas duas espécies de madeira diferentes (pinheiro e cedro vermelho), sob acção de diferentes cenários de incêndio. Para cada uma das situações será calculada a espessura da camada carbonizada com base nos resultados obtidos numericamente através da utilização do programa Ansys, de elementos finitos para análise não linear térmica em regime transiente. Os valores obtidos serão comparados com a equação de projecto do EC5, e modelos empíricos propostos por [2].

Para o estudo das espécies referidas utilizaram-se dois tipos diferentes de geometrias ($400 \times 400[\text{mm}]$ e $200 \times 400[\text{mm}]$). Foram considerados diferentes cenários de incêndio (fogo num lado, três lados e quatro lados da estrutura) em cada uma dessas geometrias. Para o instante de tempo apresentado nas diferentes tabelas comparativas (tabela 6 e 8), é apresentado os valores de temperatura máxima no exterior $T_{ext} [\text{°C}]$ e o mínimo no interior do perfil $T_{int} [\text{°C}]$. Com base nos resultados numéricos obtidos, foi obtida por regressão linear uma equação para o cálculo da espessura da camada carbonizada de cada espécie. Nessa equação, d_{Ansys} , é o valor em $[\text{mm}]$ da espessura carbonizada e t o tempo em $[\text{min}]$ necessário para essa carbonização. O coeficiente em cada uma das equações representa a velocidade de carbonização obtida em cada situação de estudo, $[\text{mm}/\text{min}]$.

Tabela 6. Camada carbonizada no perfil quadrangular $400 \times 400[\text{mm}^2]$, $t=60[\text{min}]$.

$t=60[\text{min}]$	Fogo num lado	Fogo em três lados	Fogo em quatro lados
Pinheiro			
	$d_{Ansys} = 0.67 t [\text{mm}]$	$d_{Ansys} = 0.67 t [\text{mm}]$	

	$T_{\text{int}}=20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=928[^\circ\text{C}]$	$T_{\text{int}}=20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=938[^\circ\text{C}]$	$d_{\text{Ansys}} = 0.67 t [\text{mm}]$ $T_{\text{int}}=20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=938[^\circ\text{C}]$
Cedro vermelho			
	$d_{\text{Ansys}}=0.89 t [\text{mm}]$ $T_{\text{int}}=20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=930[^\circ\text{C}]$	$d_{\text{Ansys}}=0.89 t [\text{mm}]$ $T_{\text{int}}=20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=939[^\circ\text{C}]$	$d_{\text{Ansys}}=0.89 t [\text{mm}]$ $T_{\text{int}}=23[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=1043[^\circ\text{C}]$

Como se verifica, no caso do incêndio se verificar numa das faces do elemento estrutural, a condução de calor dá-se numa só direcção considerando-se por isso uma variação linear. Quando a exposição ao fogo actua em mais que uma face da secção, a variação da camada carbonizada não é linear, variando de forma diferente em função da condução de calor se efectuar na direcção horizontal (x) ou na vertical (y). Para este tipo de cenário verifica-se o arredondamento previsto nos cantos das diferentes secções estudadas. Segundo estudos efectuados, durante a exposição ao fogo, a queima da secção de um elemento estrutural é mais rápida nos cantos da secção, pelo que resulta um arredondamento da mesma, [9].

A tabela 7 resume os valores determinados para a velocidade de carbonização nas espécies em estudo, para a exposição ao fogo, numa secção quadrangular. No caso do pinheiro, há uma concordância no valor obtido de 0.67[mm/min] com o proposto pelo EC5 de 0.65[mm/min]. O cedro vermelho apresenta uma velocidade de carbonização ligeiramente superior à proposta pelo EC5 de 0.8[mm/min] bem como no modelo linear proposto por White et al. O gráfico da figura 6 representa a evolução linear da camada carbonizada no tempo para as duas espécies em estudo. O cedro vermelho apresenta para o mesmo tempo de exposição ao fogo uma maior profundidade de camada carbonizada. As diferentes propriedades físicas da madeira, permitem concluir a sua influência no cálculo da velocidade de carbonização.

Tabela 7. Comparação da velocidade de carbonização β no perfil quadrangular.

Espécie	Ansys [mm/min]	EC5 [mm/min]	White et al [mm/min]
Pinheiro	0.67	0.65 - 0.8	0.81
Cedro vermelho	0.89	0.65 - 0.8	0.82

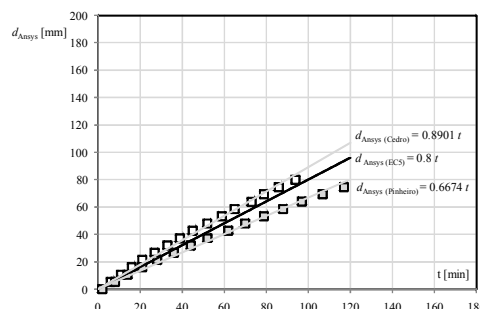

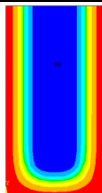
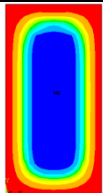


Fig.6. Espessura carbonizada na secção quadrangular.

A tabela 8 apresenta o perfil de temperaturas das duas espécies em estudo, para a geometria rectangular, submetida aos três cenários diferentes de exposição ao fogo.

Tabela 8. Camada carbonizada no perfil rectangular 200x400[mm²], t=60[min].

t=60[min]	Fogo num lado	Fogo três lados	Fogo quatro lados
Pinheiro			
	$d_{\text{Ansys}}=0.66 t [\text{mm}]$ $T_{\text{int}}=20[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=928[^\circ\text{C}]$	$d(y)_{\text{Ansys}}=0.79 t [\text{mm}]$ $d(x)_{\text{Ansys}}=0.65 t [\text{mm}]$ $T_{\text{int}}=22[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=938[^\circ\text{C}]$	$d(y)_{\text{Ansys}}=0.79 t [\text{mm}]$ $d(x)_{\text{Ansys}}=0.65 t [\text{mm}]$ $T_{\text{int}}=22[^\circ\text{C}]$ $T_{\text{ext}}=938[^\circ\text{C}]$

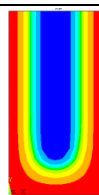
Cedro vermelho



$$d_{\text{Ansys}} = 0.89 t \text{ [mm]}$$

$$T_{\text{int}} = 20[^\circ\text{C}]$$

$$T_{\text{ext}} = 930[^\circ\text{C}]$$

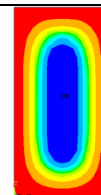


$$d(y)_{\text{Ansys}} = 1.28 t \text{ [mm]}$$

$$d(x)_{\text{Ansys}} = 0.89 t \text{ [mm]}$$

$$T_{\text{int}} = 44[^\circ\text{C}]$$

$$T_{\text{ext}} = 939[^\circ\text{C}]$$



$$d(y)_{\text{Ansys}} = 1.20 t \text{ [mm]}$$

$$d(x)_{\text{Ansys}} = 0.92 t \text{ [mm]}$$

$$T_{\text{int}} = 44[^\circ\text{C}]$$

$$T_{\text{ext}} = 938[^\circ\text{C}]$$

A tabela 9 resume os valores determinados da velocidade de carbonização das espécies em estudo, considerando a secção rectangular. No caso do pinheiro, a concordância com o EC5 continua a ser verificada, independentemente do lado da exposição ao fogo. No caso do cedro vermelho, existe uma diferença significativa no cálculo da velocidade de carbonização atendendo à face de exposição do fogo, o lado maior do perfil (direcção x) regista valores com tendência linear próximo de 0.9[mm/min], enquanto que o lado menor (direcção y) e na situação de fogo em três ou quatro lados, o crescimento da camada carbonizada é não linear.

Os gráficos das figuras 7 e 8 representam as diferentes evoluções no tempo da camada carbonizada para as duas espécies em estudo. Verifica-se sempre uma tendência linear do crescimento da camada carbonizada no lado maior dos perfis em estudo. Essa tendência é não linear nas faces menores do perfil, para a exposição do fogo em três ou quatro lados. Neste caso, o efeito do arredondamento dos cantos da secção contribui fortemente no avanço da camada carbonizada. Tal como nas conclusões obtidas na secção quadrangular, neste caso, o cedro vermelho continua a apresentar no mesmo tempo de exposição ao fogo uma maior profundidade de camada carbonizada em relação ao pinheiro. A velocidade de carbonização é por isso, fortemente dependente das características dos materiais de madeira.

Tabela 9. Comparação da velocidade de carbonização β no perfil rectangular.

Espécie		Ansys [mm/min]			EC5 [mm/min]	White et al [mm ^{1.23} /min]
		1lado	3lados	4lados		
Pinheiro	Vertical (y)	0.66	0.79	0.79	0.65 - 0.8	1.79
	Horizontal (x)	0.65	0.65			
Cedro vermelho	Vertical (y)	0.89	1.28	1.20	0.65 - 0.8	1.79
	Horizontal (x)	0.89	0.92			

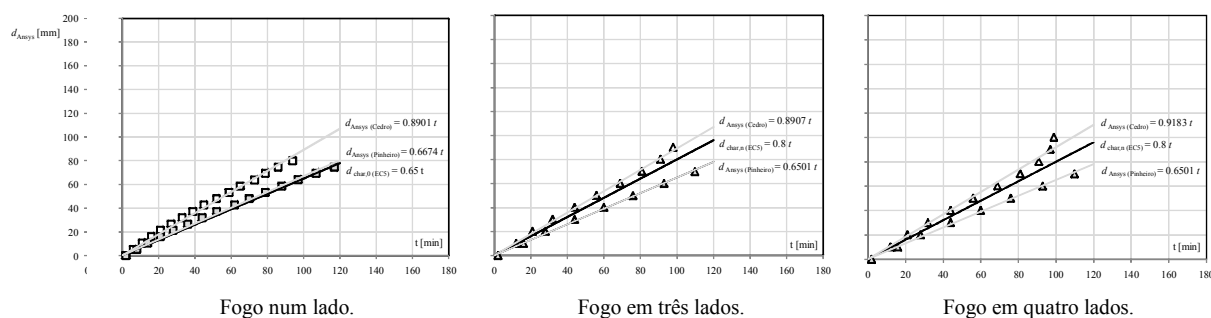


Fig.7. Espessura carbonizada no tempo, para uma secção rectangular na direcção horizontal (x).

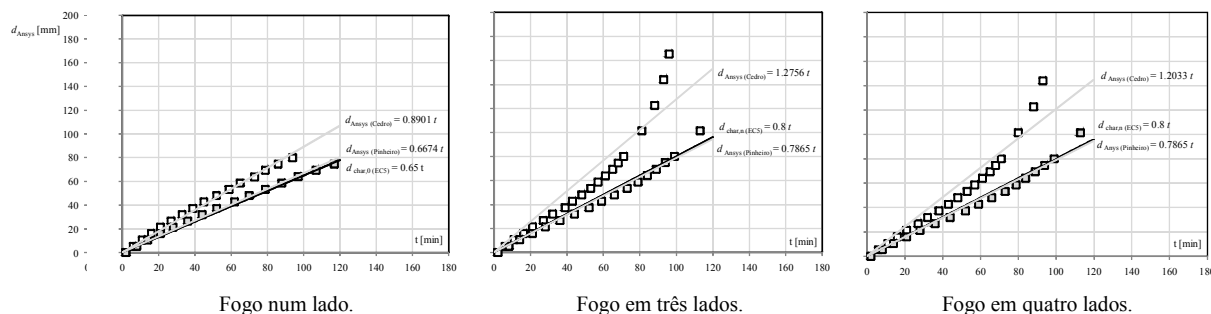


Fig.8. Espessura carbonizada no tempo, para uma secção rectangular na direcção vertical (y).

5 Conclusões

O modelo numérico revelou-se de grande importância na determinação da camada carbonizada, não só na situação de diferentes cenários de fogo, como na utilização de diferentes materiais. Para além do cálculo do perfil de temperaturas em regime transiente, foi possível registar e calcular a velocidade de crescimento da camada de carbonização que ocorre na situação de exposição ao fogo em materiais de madeira. Verificou-se que o comportamento da madeira durante a combustão é afectado pela massa específica do material, ou seja, a baixa massa específica facilita a ignição. Para as espécies em estudo, o pinheiro apresenta uma maior resistência no desenvolvimento da camada carbonizada quando em comparação com o cedro vermelho. Por isso, a resistência térmica do pinheiro é mais elevada quando comparada com a do cedro. Por outro lado, em relação ao tamanho das secções, as maiores dimensões promovem uma superfície carbonizada considerada isolante no elemento estrutural em estudo.

Referências

1. [EN 1995-1-2] prEN 1995-1-2. Eurocode 5: *Design of timber structures*, Part 1-2: General-Structural fire design, CEN, Brussels, 2003.
2. 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.
3. [EN 1995-2-2] CEN ENV 1991-2-2. Eurocode 1: *Basis of Design and Actions on Structures* - Part 2-2: Actions on Structures – Actions on Structures Exposed to Fire, CEN, Brussels, 1995.
4. T.T. Lie, *Fire Temperature-Time Relations*, Chapter 4-8. SFPE Handbok of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Society of Fire Protection Engineers, USA, 1995.
5. Huang H. C., Usmani A. S.; *Finite Element Analysis for Heat Transfer*, Springer-Verlag, London, 1994.
6. Comini G., Giudice S., Nonino C., *Finite Element Analysis in Heat Transfer*, Taylor & Francis, 1994.
7. Vila Real P. M. M., *Modelação por Elementos Finitos da Solidificação e Comportamento Termo-Mecânico de Peças Vazadas em Moldações Metálicas*, dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Doutoramento em Engenharia Mecânica, 1993.
8. Fonseca, E.M.M., *Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Tubagens sob a Acção de Fortes Gradientes Térmicos*, dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Doutoramento em Engenharia Mecânica, Dezembro, 2003.
9. Edna Moura, *Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para o Eucalyptus citriodora E E. grandis*, Tese de Doutoramento, Universidade de S. Paulo, 2005.