

Dedico este trabalho à minha mãe, à Sofia e ao Daniel.

Agradecimentos

Este trabalho só foi possível graças à conjugação de esforços e boa vontade de diversas pessoas. Assim, gostaria de manifestar os meus agradecimentos a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização.

Deixo uma palavra de especial reconhecimento à minha orientadora Professora Elza Maria Morais Fonseca, pelos conselhos, encorajamento e dedicação com que orientou este trabalho.

Aos Professores Paulo Piloto e Luis Mesquita por todos os ensinamentos e pelo apoio prestado sempre que solicitado.

Aos colegas Eng.^a Maria José Alves, Eng.^o Simão Geraldes e Eng.^o Tiago Pinto pela disponibilidade, e auxílio sempre que encontrei dificuldades.

À minha família, pelo tempo que não lhe pude dispensar e pelo apoio, motivação e carinho demonstrados ao longo de todo o trabalho.

Estudo Numérico do Comportamento Térmico e Mecânico de Estruturas em Madeira

por:

LUÍSA MARIA DA SILVA BARREIRA

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial
Ramo **Engenharia Mecânica**

Realizada sob a supervisão de:

Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Resumo

Os materiais em madeira apresentam uma utilização recente em aplicações estruturais. Para o cumprimento das normas de segurança, este tipo de elementos devem possuir resistência mecânica suficiente para garantir as condições de projecto. A madeira é um material natural e é sujeito a constantes alterações. A grande vulnerabilidade da madeira, em situação de acidente, requer uma avaliação térmica e mecânica rigorosa, bem como a sua determinação. A combustão e os fenómenos químicos que ocorrem na madeira durante uma situação de incêndio, conduzem a um estudo de um caso complexo. Quando estruturas em madeira são expostas a altas temperaturas é formada uma camada superficial de carvão que perde as suas características, mas actua como um isolante, impedindo a propagação do calor para o interior da secção.

Neste trabalho é apresentado um modelo numérico térmico não linear para o cálculo da espessura da camada carbonizada e velocidade de carbonização das espécies de pinheiro e cedro vermelho, utilizando o método dos elementos finitos. Os resultados obtidos são comparados com os valores simplificados do Eurocódigo 5 (EC5) e com valores obtidos analiticamente por outros autores.

É apresentado um método experimental para determinação da camada carbonizada na madeira sendo os resultados comparados com o modelo numérico.

Apresenta-se ainda uma metodologia de cálculo simplificado para a determinação do campo de tensões em elementos estruturais de madeira submetidos a altas temperaturas, baseado na determinação da secção resistente do elemento. Este modelo analítico é comparado com os resultados numéricos obtidos através de uma análise por elementos finitos com base num modelo térmico e mecânico, utilizando as propriedades ortotrópicas do material.

Palavras-chave: Madeira, altas temperaturas, método dos elementos finitos, camada carbonizada.

Numerical Study of Thermal and Mechanical Behaviour of Timber Structures

by:
LUÍSA MARIA DA SILVA BARREIRA

Thesis for attainment of Ms.C degree in:
Industrial Engineering
Branch **Mechanical Engineering**

Supervised by:
Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Abstract

Timber materials present a new use for structural applications. In compliance with the safety rules, this type of elements should have sufficient mechanical resistance to guarantee the design functions. Timber is a natural material and is subject to constantly changing influences. The high timber vulnerability, due accidental situation, requires the rigour of the thermal and mechanical assessment and their determination. During an accidental situation, the combustion and the chemical phenomena developed in this type of material are a complex study issue. When timber structures are exposed to high temperatures, the burned wood is transformed in a char layer, which loses all strength, and insulates the core of the element.

This work presents a thermal non-linear numerical model, for calculating the char layer thickness and charring rate of the pine and white cedar, using the finite element method. The results are compared with the simplified values according to the Eurocode 5 (EC5), and analytical values from others authors.

Is presented an experimental method for the charring rate determination and the results are compared with the numerical method.

Is also presented a simplified method, for determining the stresses field in structural timber components, when submitted to high temperatures, based on effective cross-section determination. This analytical model is compared with the numerical results from the finite elements, based in the thermal and mechanical analysis, using orthotropic material properties.

Keywords: *Timber, high temperatures, finite element method, char layer.*

Índice

1	Introdução.....	12
1.1	Objectivos.....	12
1.2	Apresentação sumária dos capítulos.....	13
2	Análise Térmica.....	16
2.1	Processos de transferência de calor.....	16
2.1.1	Transferência de calor por condução.....	16
2.1.2	Transferência de calor por convecção.....	17
2.1.3	Transferência de calor por radiação.....	18
2.1.4	Transferência de calor por convecção e radiação combinada.....	20
2.2	Curvas normalizadas de incêndio.....	20
2.3	Curva de incêndio natural.....	22
2.4	Método dos elementos finitos aplicado à equação de calor.....	23
3	Madeira de pinheiro e cedro vermelho.....	27
3.1	A madeira como material de construção.....	27
3.1.1	Classificação das madeiras.....	28
3.1.2	Estrutura molecular da madeira.....	28
3.1.3	Estrutura e crescimento das madeiras.....	29
4	Comportamento térmico da madeira.....	31
4.1	Pirólise.....	31
4.2	Ignição.....	32
4.3	Carbonização da madeira.....	32
4.4	Propriedades térmicas da madeira.....	34
4.4.1	Condutividade térmica.....	34
4.4.2	Calor específico.....	35
4.4.3	Massa específica.....	36
4.4.4	Humidade.....	37
5	Análise térmica não-linear em regime transiente.....	39
5.1	Espessura de carbonização num elemento com fogo num lado.....	40
5.2	Espessura de carbonização num elemento com fogo em três lados.....	41
5.3	Espessura de carbonização num elemento com fogo em quatro lados.....	44
5.4	Velocidade de carbonização no perfil rectangular.....	46
5.5	Velocidade de carbonização no perfil quadrangular.....	46
5.6	Equações obtidas para o cálculo da espessura carbonizada.....	47
6	Método experimental alternativo.....	49
6.1	Metodologia experimental.....	49
6.2	Modelo numérico.....	51
6.3	Resultados obtidos.....	51

7	Comportamento mecânico da madeira.....	57
7.1	Natureza ortotrópica da madeira.....	57
7.2	Propriedades mecânicas.....	58
7.2.1	Módulo de Elasticidade e Módulo de Rigidez.....	59
7.2.2	Coefficiente de <i>Poisson</i>	60
7.2.3	Tensão de rotura.....	60
7.2.4	Coefficiente de expansão térmica.....	61
8	Análise térmica e mecânica não-linear	63
8.1	Simulação numérica.....	63
8.2	Tensões equivalentes: fogo num lado.....	64
8.3	Tensões equivalentes: fogo em três lados.....	65
8.4	Tensões equivalentes: fogo em quatro lados.....	66
8.5	Modelo simplificado no cálculo das tensões.....	67
8.5.1	Cálculo das tensões em colunas de madeira.....	67
8.6	Comparação de resultados.....	70
8.6.1	Fogo num lado.....	70
8.6.2	Fogo em três lados.....	72
8.6.3	Fogo em quatro lados.....	73
9	Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros.....	76
9.1	Perspectivas de trabalhos futuros.....	77
10	Bibliografia	78
	Anexos – Código Ansys.....	82
	A1 - Propriedades térmicas do cedro vermelho	
	A2 - Propriedades térmicas do pinheiro	
	A3 - Propriedades mecânicas do cedro vermelho	
	A4 - Propriedades mecânicas do pinheiro	
	A5 - Modelo térmico (perfil rectangular com fogo numa direcção)	
	A6 - Modelo termo-mecânico (coluna rectangular com fogo numa direcção)	

Nomenclatura

Os símbolos apresentados no texto são definidos, dentro do possível, à medida que se apresentam. No entanto para facilitar uma consulta posterior, apresenta-se a definição de símbolos que são utilizados de uma forma geral.

Letras do alfabeto latino

A	Área
C_p	Calor específico
d_{char}	Espessura da camada de carbonização
$d_{i,t}$	Espessura da camada de carbonização, i direcção horizontal x ou vertical y em função do tempo t
\bar{E}	Radiação de um corpo negro
E	Módulo de elasticidade
e	Espessura
G	Módulo de rigidez
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação
P	Carga
Q	Fluxo de calor
Q_c	Quantidade de calor
q	Fluxo de calor por unidade de área
q_c	Fluxo de calor por convecção
q_r	Fluxo de calor por radiação
q_{inc}	Fluxo de radiação que incide no corpo negro
q_{abs}	Energia absorvida pelo corpo negro
T	Temperatura
T_0	Temperatura ambiente no instante inicial
T_f	Temperatura do fluido
T_w	Temperatura da superfície
t	Tempo
w	Teor de humidade

Letras do alfabeto grego

α	Coefficiente de expansão térmico
$\bar{\alpha}$	Poder de absorção
$\beta_{i,k}$	Taxa de carbonização, i vertical ou horizontal e k igual a 1, 3 ou 4 lados
$\bar{\epsilon}$	Emissividade
ϵ	Deformação
λ	Condutividade térmica
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
ρ	Massa específica
$\bar{\sigma}$	Constante de proporcionalidade de <i>Stefan-Boltzmann</i>
σ	Tensão

Índice de figuras

<i>Figura 1: Condução através de um sólido ou fluido estacionário.</i>	16
<i>Figura 2: Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.</i>	17
<i>Figura 3: Trocas de calor por radiação entre duas superfícies A_1 e A_2.</i>	19
<i>Figura 4: Curvas nominais de incêndio padrão.</i>	21
<i>Figura 5: Fases de um incêndio natural.</i>	22
<i>Figura 6: Condições de fronteira em problemas térmicos.</i>	24
<i>Figura 7: Aspecto das espécies em estudo.</i>	27
<i>Figura 8: Estrutura da célula de madeira.</i>	28
<i>Figura 9: Anéis de crescimento de um elemento de madeira.</i>	29
<i>Figura 10: Zonas de degradação numa secção de madeira.</i>	31
<i>Figura 11: Arredondamento dos cantos numa secção exposta ao fogo em 3 direcções.</i>	33
<i>Figura 12: Condutividade térmica da madeira em função da temperatura.</i>	35
<i>Figura 13: Evolução do calor específico da madeira em função da temperatura.</i>	36
<i>Figura 14: Gráfico da densidade da madeira função da temperatura.</i>	37
<i>Figura 15: Modelo rectangular e malha de elementos finitos.</i>	39
<i>Figura 16: Modelo quadrangular e malha de elementos finitos.</i>	39
<i>Figura 17: Espessura carbonizada da secção rectangular, exposta ao fogo numa face.</i>	40
<i>Figura 18: Espessura carbonizada da secção quadrangular, exposta ao fogo numa face.</i>	41
<i>Figura 19: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção horizontal, exposta ao fogo em três faces.</i>	42
<i>Figura 20: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção horizontal, exposta ao fogo em três faces.</i>	42
<i>Figura 21: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção vertical, exposta ao fogo em três faces.</i>	43
<i>Figura 22: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção vertical, exposta ao fogo em três faces.</i>	43
<i>Figura 23: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção horizontal, exposta ao fogo nas quatro faces.</i>	44
<i>Figura 24: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção horizontal, exposta ao fogo nas quatro faces.</i>	45
<i>Figura 25: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção vertical, exposta ao fogo nas quatro faces.</i>	45
<i>Figura 26: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção vertical, exposta ao fogo nas quatro faces.</i>	45
<i>Figura 27: Curva de aquecimento e arrefecimento imposta na unidade térmica.</i>	49
<i>Figura 28: Geometria das amostras.</i>	49
<i>Figura 29: Posição dos termopares na amostra.</i>	50

<i>Figura 30: Isolamento e aquecimento das amostras.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 31: Amostra experimental e malha de elementos finitos.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 32: Amostras no instante final de ensaio.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 33: Zonas de degradação nas amostras ensaiadas no final de 3600 [s] (Barreira, et al., 2008).</i>	<i>52</i>
<i>Figura 34: Resultados obtidos a 10 [mm] da frente de calor.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 35: Resultados obtidos a 20 [mm] da frente de calor.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 36: Resultados obtidos a 30 [mm] da frente de calor.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 37: Resultados obtidos a 50 [mm] da frente de calor.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 38: Resultados obtidos a 250 [mm] da frente de calor.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 39: Representação dos três eixos respeitantes à direcção do grão e aos anéis de crescimento.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 40: Representação gráfica do Módulo de Elasticidade nas diferentes direcções.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 41: Representação gráfica da tensão de rotura para diferentes valores de temperatura.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 42: Modelo numérico tridimensional.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 43: Coluna com geometria quadrangular e rectangular utilizado no modelo numérico.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 44: Geometria da coluna rectangular e quadrangular.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 45: Carbonização da coluna rectangular e quadrangular com fogo numa direcção.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 46: Carbonização da coluna rectangular e quadrangular com fogo em três direcções.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 47: Carbonização da coluna rectangular e quadrangular com fogo em quatro direcções.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 48: Evolução das tensões em colunas rectangulares com fogo num lado.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 49: Evolução das tensões em colunas quadrangulares com fogo num lado.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 50: Evolução das tensões em colunas rectangulares com fogo em três lados.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 51: Evolução das tensões em colunas quadrangulares com fogo em três lados.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 52: Evolução das tensões em colunas rectangulares com fogo em quatro lados.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 53: Evolução das tensões em colunas quadrangulares com fogo em quatro lados.</i>	<i>74</i>

Índice de tabelas

Tabela 1: Valores de θ_0 e θ_n para o cálculo da taxa de carbonização da madeira.....	33
Tabela 2: Características físicas do pinheiro e do cedro vermelho.	34
Tabela 3: Condutividade térmica da madeira, EC5.....	34
Tabela 4: Calor específico da madeira, EC5.....	35
Tabela 5: Taxa da massa específica em função da temperatura, EC5.....	36
Tabela 6: Campos de temperatura da madeira exposta ao fogo num lado.	40
Tabela 7: Campos de temperatura da madeira exposta ao fogo em três lados.	41
Tabela 8: Campos de temperatura da madeira exposta ao fogo em quatro lados.	44
Tabela 9: Comparação da velocidade de carbonização $\theta_{i,n}$ no perfil rectangular.	46
Tabela 10: Comparação da velocidade de carbonização $\theta_{i,n}$ no perfil quadrangular.	47
Tabela 11: Equações obtidas para cálculo da espessura carbonizada em função do tempo no perfil rectangular.....	47
Tabela 12: Equações obtidas para cálculo da espessura carbonizada em função do tempo no perfil quadrangular.	47
Tabela 13: Propriedades mecânicas das espécies em estudo.....	58
Tabela 14: Razões elásticas das espécies para humidade de 12%.	59
Tabela 15: Valores dos Módulos de Elasticidade e Rigidez para estruturas submetidas a compressão.....	59
Tabela 16: Coeficiente de Poisson das espécies em estudo para humidade de 12%.	60
Tabela 17: Valores da tensão de rotura das espécies em estudo.	61
Tabela 18: Tensões equivalentes nas espécies em estudo com fogo num lado, [Pa].	64
Tabela 19: Tensões equivalentes nas espécies em estudo com fogo em três lados, [Pa].	65
Tabela 20: Tensões equivalentes das espécies em estudo com fogo em quatro lados, [Pa].	66
Tabela 21: Tensões normais na secção rectangular, função do modelo simplificado, [MPa].	70
Tabela 22: Tensões normais na secção quadrangular, função do modelo simplificado, [MPa].	70
Tabela 23: Tensões obtidas em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo numa direcção.	71
Tabela 24: Tensões obtidas em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo em três direcções.	72
Tabela 25: Tensões obtidas em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo em quatro direcções.	73

Capítulo 1

Introdução

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 dos outros materiais de construção. A origem dessas diferenças reside sobretudo na sua estrutura fibrosa heterogénea e anisotrópica. Comparada com outros materiais de construção convencionais utilizados actualmente, a madeira apresenta uma excelente relação entre a resistência e o peso. A madeira possui ainda outras características favoráveis à sua utilização na construção, tais como a facilidade de fabricação de diversos produtos industrializados, bom isolamento térmico e bom comportamento quando sujeita a incêndio.

A partir de 1950, os diferentes materiais (tais como aço, betão, madeira, entre outros) passaram a ser alvo de investigação científica na verificação do melhor desempenho quando sujeitos à exposição ao fogo. O resultado de diversos estudos, colocou a madeira em vantagem em relação aos outros materiais de construção, o que ficou comprovado devido às propriedades físicas e mecânicas que apresenta (Pinto, et al., 2004).

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, por sua vez, aquecem a madeira ainda não atingida e promovem a libertação de mais gases inflamáveis, alimentando a combustão e formando assim um ciclo vicioso. 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, pois mesmo após ter sido exposta a elevadas temperaturas, a madeira mantém o interior da sua secção a baixas temperaturas (Pinto, et al., 2004).

Conforme proposto no EC5 (EN1995-1-2, 2004), a temperatura na camada da madeira carbonizada que está em contacto com o núcleo da secção é de aproximadamente 300 [°C]. 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 de um edifício antes do colapso da estrutura.

1.1 Objectivos

Os principais objectivos a obter com a realização deste trabalho são:

- Avaliar o comportamento térmico e mecânico de estruturas em madeira quando sujeitas a altas temperaturas, como é o caso de situações de incêndio;
- Apresentar modelos computacionais para análise do comportamento e simulação da degradação das propriedades físicas deste material nas condições de acidente;

- Determinar a camada de carvão na madeira em função da velocidade de carbonização;
- Determinar a resistência mecânica nesses elementos em situação de acidente, calculando as tensões resultantes da redução da secção resistente.

1.2 Apresentação sumária dos capítulos

No **Capítulo 2** deste trabalho, são explicados os processos de transferência de calor por condução, convecção, e radiação. São apresentadas curvas paramétricas definidas pelo EC5 (Eurocódigo 5) e pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), bem como a curva de incêndio natural que caracterizam a evolução da temperatura ambiente de um incêndio em função do tempo de ocorrência. No final do capítulo, é feita uma abordagem ao método dos elementos finitos aplicado à equação de calor e representam-se as condições fronteira em problemas térmicos.

No **Capítulo 3** descrevem-se as espécies de madeira, pinheiro e cedro vermelho, utilizadas neste trabalho. É analisada a madeira como material de construção apresentando como pontos principais, a classificação das madeiras, a sua estrutura molecular e a sua estrutura de crescimento.

O **Capítulo 4** trata do comportamento térmico da madeira, onde se explicam os processos de pirólise, ignição e formação da camada carbonizada. São apresentados os valores propostos pelo EC5 para a taxa de carbonização em função da massa específica, bem como o modelo proposto por *White* (White, et al., 1999) para cálculo da camada carbonizada. Por fim, são abordadas as propriedades descritas no anexo B do EC5 que enuncia os valores da condutividade térmica, do calor específico e massa específica da madeira, para uma humidade inicial de 12%, função da exposição ao fogo normalizado.

No **Capítulo 5** apresenta-se um estudo numérico realizado no programa de elementos finitos ANSYS, cujo objectivo é determinar a espessura da camada carbonizada em função do tempo, em dois elementos estruturais submetidos a diferentes cenários de exposição ao fogo segundo a curva ISO834. Realizaram-se simulações numéricas em geometrias rectangulares e quadrangulares para diferentes cenários de incêndio (fogo num lado, três lados e quatro lados da estrutura) utilizando um elemento sólido finito de 8 nós. As propriedades térmicas utilizadas apresentam um comportamento não-linear conforme o EC5. O cálculo da espessura carbonizada é efectuado pela determinação da temperatura a 300 [°C] que limita o interior da secção. É calculada também neste capítulo, a velocidade de carbonização a partir da razão entre a espessura da camada carbonizada e o tempo de carbonização, para cada uma das espécies de madeira consideradas. Os valores obtidos na simulação numérica são comparados com a equação de projecto do EC5.

O **Capítulo 6** apresenta uma metodologia experimental como alternativa à obtenção do campo de temperaturas e da camada carbonizada em perfis de madeira de pinheiro. É descrita a metodologia experimental que simula o aquecimento numa face do perfil, para a qual foram utilizadas seis amostras de madeira de secção

rectangular. Os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos obtidos através da utilização de um programa de elementos finitos.

No **Capítulo 7** apresenta-se o comportamento mecânico da madeira quando submetida a uma situação de incêndio. Com o aumento da temperatura, verifica-se uma redução da resistência mecânica. Também a secção resistente da madeira reduz contribuindo para que o elemento estrutural perca a sua capacidade de carregamento em situação de incêndio. Neste capítulo, aborda-se a natureza ortotrópica da madeira, atendendo às propriedades mecânicas de cada uma das espécies de madeira utilizadas neste trabalho.

No **Capítulo 8** estudam-se os campos de tensões, utilizando o método dos elementos finitos. Para a determinação das tensões de origem térmica admite-se que o problema se pode decompor em dois tipos distintos que se resolvem consecutivamente. Com base no cálculo do campo de temperaturas iniciais, determinam-se os campos de tensões provocados por essas variações térmicas. Apresentam-se os resultados numéricos para os campos de tensões obtidos nas espécies de madeira de pinheiro e cedro vermelho, com base no modelo térmico de cálculo de temperaturas em regime transiente, em simultâneo com a aplicação de cargas mecânicas. Estes resultados são comparados com os valores resultantes do cálculo analítico efectuado para diferentes situações de incêndio.

No **Capítulo 9** apresentam-se as conclusões finais sobre todo o trabalho desenvolvido bem como algumas sugestões para uma futura investigação nesta área de desenvolvimento.

Capítulo 2

Análise Térmica

2 Análise Térmica

O objectivo da análise térmica na resolução de problemas é a determinação de campos de temperatura que possibilitam a determinação de tensões térmicas. Em vários domínios da Engenharia é necessária a análise do comportamento térmico dos materiais, de forma a garantir a segurança mesmo em aspectos de estabilidade estrutural. Para melhor compreensão destes fenómenos torna-se necessário conhecer os vários modos ou processos de transferência de calor.

2.1 Processos de transferência de calor

A transferência de calor pode ser definida como a transmissão de energia térmica de uma região para outra de um meio sólido, líquido ou gasoso, como resultado de uma diferença de temperaturas entre elas (Incropera, et al., 1998).

Não é possível medir directamente a energia transferida pelo fluxo de calor, mas o conceito tem significado físico porque está relacionado com a grandeza mensurável temperatura, T . O fluxo de calor, q , corresponde ao calor transmitido por unidade de área e por unidade de tempo.

A transferência de calor num sistema pode processar-se de três maneiras diferentes: *condução*, *convecção* e *radiação*. Na realidade, a distribuição de temperatura num sistema, é controlada pelos efeitos combinados dos três modos de transmissão de calor.

2.1.1 Transferência de calor por condução

A energia térmica passa de um local para outro através das partículas do meio que os separa, designando-se como um processo de transferência de calor. Temperaturas mais altas estão associadas a energias moleculares mais altas, quando moléculas vizinhas colidem entre si, há transferência de energia das moléculas de maior energia para as de menor energia. Na presença de um gradiente de temperatura, a transferência de energia por condução ocorre, no sentido da diminuição de temperatura (Özisik, 1990), isto é, o calor flui sempre da região de alta temperatura para a região de baixa temperatura. Na Figura 1 está representado o esquema de transferência de calor por condução através de um fluido estacionário ou sólido de espessura, e .

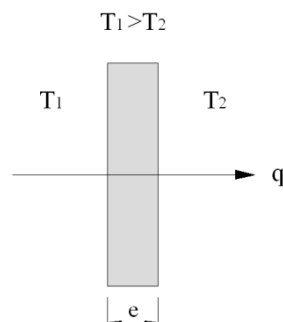


Figura 1: Condução através de um sólido ou fluido estacionário.

A lei empírica da condução de calor baseada em observações experimentais do matemático e físico *Joseph Fourier*, foi utilizada no desenvolvimento da teoria analítica sobre o calor. Diz-se que, a energia é transferida por condução e que o fluxo de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura (Holman, 1997):

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad 1$$

Quando é inserida a constante de proporcionalidade,

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W/m}^2] \quad 2$$

onde q representa o fluxo de calor através da área e $\frac{\partial T}{\partial x}$ é o gradiente de temperatura na direcção desse fluxo. A constante positiva λ representa a condutividade térmica do material [$\text{W/m}^\circ\text{C}$] e o sinal negativo na equação é colocado de forma a garantir que o fluxo de calor seja positivo na direcção positiva de x .

A condutividade térmica λ varia com a temperatura. Esta variação, em alguns materiais, como os metais, dentro de certos intervalos de temperatura, é bastante pequena podendo ser desprezada, mas no caso de gases ou materiais isolantes, essa variação é muito significativa. O valor de λ para a madeira, se medido ao longo das suas fibras, é quase duas vezes maior que o valor medido transversalmente uma vez que se trata de um material anisotrópico (Washington, 2004).

Reconhecendo que o fluxo de calor é uma grandeza vectorial, pode escrever-se uma equação geral para a lei de *Fourier* da seguinte forma:

$$q = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad 3$$

onde ∇ é o operador vectorial gradiente e $T(x,y,z)$ representa, em coordenadas cartesianas, o campo de temperatura. Portanto, a forma alternativa à lei de *Fourier* pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad 4$$

2.1.2 Transferência de calor por convecção

Se um fluido (ou gás) escoar sobre um corpo sólido ou dentro de um canal, e se as temperaturas do fluido (T_f) e da superfície sólida (T_w) forem diferentes, haverá transferência de calor por convecção entre o fluido e a superfície sólida em consequência do movimento do fluido em relação à superfície, como esquematizado na Figura 2.

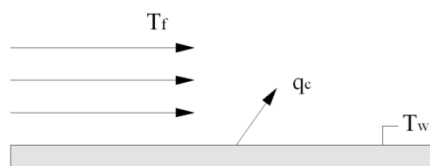


Figura 2: Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.

Se o movimento do fluido for induzido artificialmente, por exemplo por uma bomba ou ventilador, forçando o fluxo do fluido sobre a superfície, diz-se que a transferência de calor se processa por *convecção forçada*.

Se o movimento do fluido resultar dos efeitos da ascensão provocada pela diferença de massa causada pela diferença de temperatura no fluido, a transferência de calor dá-se por *convecção livre* (ou *natural*). Por exemplo, uma placa quente suspensa verticalmente no ar frio parado, estimula o movimento da camada de ar adjacente à superfície da placa, pois o gradiente de temperatura no ar provoca um gradiente de densidade que, por sua vez, ocasiona o movimento do ar.

O efeito global da convecção pode ser expresso pela lei de arrefecimento de Newton (Holman, 1997) com base na seguinte equação:

$$Q_c = h_c A (T_w - T_f) \quad 5$$

$$q_c = h_c (T_w - T_f) \quad \text{quando } T_w > T_f \quad 6$$

$$q_c = h_c (T_f - T_w) \quad \text{quando } T_f > T_w \quad 7$$

onde Q_c representa a quantidade de calor na convecção, h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$, A é a área superficial em $[\text{m}^2]$, q_c é o fluxo de calor por convecção, T_w é a temperatura da superfície e T_f é a temperatura do fluido (ou do ambiente) ambas em $[\text{°C}]$.

2.1.3 Transferência de calor por radiação

Todos os corpos emitem continuamente energia através de ondas electromagnéticas dada a sua temperatura (ondas de calor). Esta energia designa-se por *radiação térmica*. A emissão ou absorção da energia radiante através de um corpo é um processo de massa, isto é, a radiação existente no interior do corpo é emitida através da superfície; inversamente, a radiação incidente na superfície de um corpo penetra até às profundezas do meio, onde é atenuada. Quando uma grande proporção da radiação incidente é atenuada a uma distância muito pequena da superfície, pode-se definir a radiação como absorvida ou emitida pela superfície. Apenas em vácuo, a radiação propaga-se absolutamente sem qualquer tipo de atenuação.

i. Emissão de radiação

O fluxo máximo de radiação emitido por um corpo à temperatura T é dado pela lei de *Stefan-Boltzmann* (Özisik, 1990) expressa na equação seguinte, válida apenas para *corpos negros* (corpos ideais que absorvem integralmente toda a energia que neles incida):

$$\bar{E} = \bar{\sigma} T^4 \quad 8$$

onde T é a temperatura absoluta em $[\text{K}]$, $\bar{\sigma}$ é a constante de proporcionalidade de *Stefan-Boltzmann* igual a $5,6697 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$ e \bar{E} é a radiação do corpo negro em $[\text{W}/\text{m}^2]$.

O fluxo de radiação emitido por *corpos reais* a uma temperatura absoluta T é sempre menor do que a do corpo negro à mesma temperatura, dado pela seguinte equação:

$$q_r = \bar{\epsilon} \bar{E}_b = \bar{\epsilon} \bar{\sigma} T^4 \quad 9$$

onde o valor da emissividade $\bar{\epsilon}$ é sempre menor que a unidade e maior que zero.

ii. Absorção da radiação

O fluxo de radiação que incide num corpo negro, q_{inc} , é completamente absorvido por este. Se esse fluxo incide sobre um corpo real, a energia absorvida pelo corpo q_{abs} , é dada por:

$$q_{abs} = \bar{\alpha} q_{inc} \quad 10$$

onde o poder de absorção $\bar{\alpha}$, em todos os corpos reais, é sempre maior que zero e menor que a unidade.

O poder de absorção de um corpo é geralmente diferente da sua emissividade $\bar{\epsilon}$, mas em muitas aplicações práticas, para simplificar a análise, admite-se $\bar{\alpha}$ igual a $\bar{\epsilon}$ (Özsisik, 1990).

iii. Trocas de radiação

Na Figura 3 estão representadas as trocas de calor por radiação entre duas superfícies finitas A_1 e A_2 , com temperaturas absolutas diferentes T_1 e T_2 , emissividade $\bar{\epsilon}_1$ e $\bar{\epsilon}_2$, onde a energia emitida por um corpo (energia radiante) se propaga até ao outro através do espaço que os separa. Se o meio intermediário estiver preenchido por uma substância transparente à radiação, como por exemplo o ar, a radiação emitida por um dos corpos atravessa o meio sem nenhuma atenuação atingindo o outro corpo e vice-versa. Assim, o corpo mais quente usufrui de uma perda líquida de calor e o corpo mais frio, um ganho líquido de calor, dada a permuta de radiação térmica.

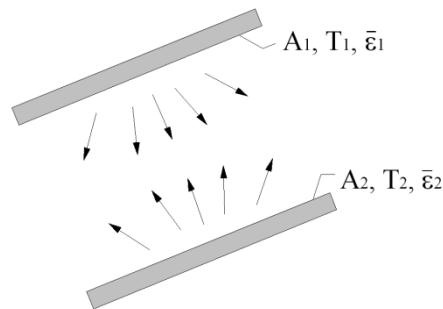


Figura 3: Trocas de calor por radiação entre duas superfícies A_1 e A_2 .

No sistema representado na Figura 3, admite-se que o fluxo de radiação no meio envolvente é desprezável comparado com os fluxos das duas superfícies.

Por uma questão de simplificação, é possível, definir um coeficiente de transferência de calor por radiação h_r , análogo ao coeficiente de calor por convecção:

$$Q_r = h_r A (T_1 - T_2) \quad 11$$

$$q_r = h_r (T_1 - T_2) \quad 12$$

Comparando a equação 12 com a equação 9, pode deduzir-se o coeficiente de transferência de calor por radiação h_r , em função da emissividade ε da seguinte forma:

$$h_r(T_1 - T_2) = \varepsilon \bar{\sigma}(T_1^4 - T_2^4) \quad 13$$

$$h_r(T_1 - T_2) = \varepsilon \bar{\sigma}(T_1^2 - T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) \quad 14$$

$$h_r = \varepsilon \bar{\sigma}(T_1^2 - T_2^2)(T_1 + T_2) \quad 15$$

2.1.4 Transferência de calor por convecção e radiação combinada

Em muitas situações práticas, a transferência de calor de uma superfície ocorre simultaneamente por convecção para o ambiente, e por radiação para a vizinhança. O fluxo total de calor transferido por convecção e radiação q_{cr} é representado pela expressão:

$$q_{cr} = q_c + q_r = h_c(T_w - T_f) + h_r(T_1 - T_2) \quad 16$$

No caso particular em que $T_w=T_1=T$ e $T_f=T_2=T_\infty$ (temperatura ambiente) a equação 16 passa a ser definida por:

$$q_{cr} = h_c(T - T_\infty) + h_r(T - T_\infty) = h_{cr}(T - T_\infty) \quad 17$$

De uma forma geral, o coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação pode ser traduzido por:

$$h_{cr} = h_c + h_r = h_c + \varepsilon \bar{\sigma}(T^2 - T_\infty^2)(T + T_\infty) \quad 18$$

2.2 Curvas normalizadas de incêndio

Um dos factores mais importantes a ter em conta na avaliação do comportamento ao fogo, de qualquer elemento estrutural, é a descrição e a caracterização do próprio fogo.

A evolução da temperatura ambiente de um incêndio em função do tempo, pode ser representada graficamente por curvas paramétricas definidas pelo EC 1 (EN1991-1-2, 2002), assim como pela norma ASTM E119 (*American Society for Testing and Materials*):

I - Curva de incêndio padrão ISO834:

$$T = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad 19$$

onde T [°C] representa a temperatura dos gases do compartimento de incêndio no instante t [min] e T_0 é a temperatura inicial do compartimento, geralmente igual a 20 [°C] .

2 - Curva de incêndio para elementos exteriores:

$$T = 660[1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}] + T_0 \quad 20$$

A curva para elementos exteriores deve ser utilizada apenas para elementos estruturais externos e permanece a 680 [°C] após 30 [min] de exposição ao fogo. Nesta curva T [°C] representa a temperatura ambiente, T_0 [°C] a temperatura inicial do compartimento e t [min] o tempo decorrido desde o início do incêndio.

3 - Curva de incêndio de hidrocarbonetos

$$T = 1080[1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}] + T_0 \quad 21$$

A curva de hidrocarbonetos fornece uma temperatura constante de 1100 [°C] a partir de 30 [min] de exposição ao fogo, sendo caracterizada como sendo a mais energética, onde T [°C] representa a temperatura ambiente, T_0 [°C] a temperatura inicial do compartimento e t [min] o tempo decorrido.

4 - Curva de incêndio ASTM

$$T = 750[1 - e^{-3.79553\sqrt{t}}] + 170.41\sqrt{t} + T_0 \quad 22$$

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM), através da norma ASTM E119, propõe uma curva de incêndio, utilizada na avaliação de elementos estruturais sujeitos ao fogo. Esta curva pode ser aproximada em função da equação 22, em que t representa o tempo decorrido desde o início, em [h], e T_0 [°C] a temperatura inicial do compartimento.

A Figura 4 representa a evolução da temperatura em função do tempo, para as quatro curvas enunciadas.

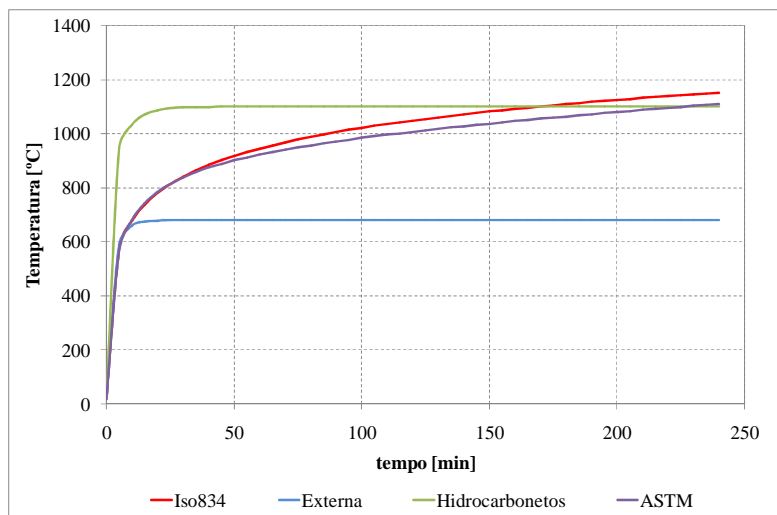


Figura 4: Curvas nominais de incêndio padrão

A curva de incêndio padrão ISO834 é utilizada em ensaios experimentais para determinação da resistência ao fogo em elementos estruturais. Embora com pouca realidade física, ela permite unificar ou

padronizar os ensaios experimentais possibilitando a comparação dos resultados da resistência ao fogo obtidos em laboratórios diferentes, no mesmo país ou em países diferentes.

O incêndio padrão é considerado como base de referência para estabelecer o conceito de “referência ao fogo regulamentar” dos elementos estruturais. A maior parte dos regulamentos de segurança contra incêndios, adota este conceito e estabelece os valores da resistência ao fogo dos elementos estruturais como sendo o tempo, durante o qual, estes elementos desempenham as funções de suporte de carga para que foram projectados, quando sujeitos ao incêndio padrão (Vila Real, 2003).

2.3 Curva de incêndio natural

O incêndio identifica-se como sendo uma combustão incontrolada, que para se desenvolver e completar as suas fases necessita, entre outros elementos, da presença de materiais combustíveis. De uma forma sucinta, um incêndio é uma combustão sem controlo no espaço e no tempo (Guerra, et al., 2003). Considera-se que um incêndio é composto essencialmente por três fases denominadas fase inicial ou eclosão (fase que ocorre após a ignição), fase de aquecimento ou plena combustão e fase de arrefecimento (Kaefer, et al., 2006). A Figura 5 representa as diferentes fases de um incêndio natural, conforme referido por (Moura, 2005).

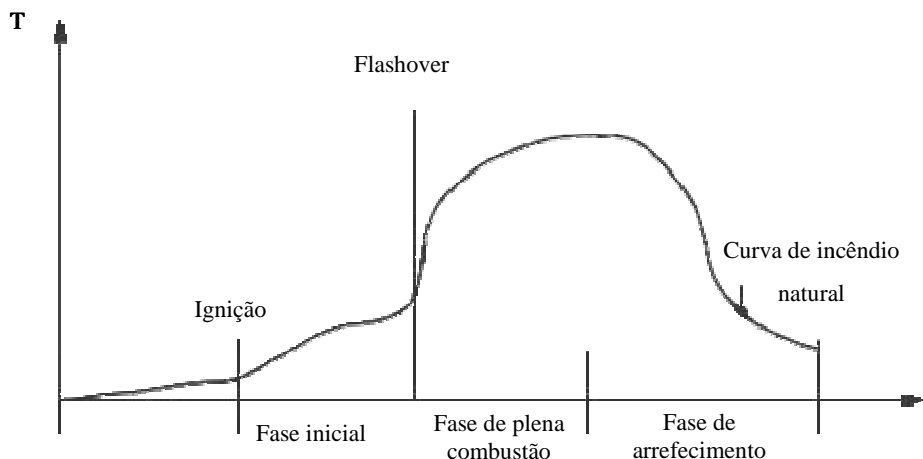


Figura 5: Fases de um incêndio natural.

O início de um incêndio é marcado sempre pela ignição do material contido no ambiente. A ventilação do ambiente, a natureza, a fonte da ignição, os factores relacionados com as propriedades dos materiais envolvidos e o desempenho quando expostos a altas temperaturas (inflamabilidade, libertação de calor, propagação das chamas, entre outros) interagem na fase inicial da incêndio. Após atingirem um nível suficiente de radiação, todos os materiais combustíveis do compartimento entram em ignição rapidamente envolvendo todo o compartimento, configurando desta forma, o ponto mais crítico do incêndio, a inflamação generalizada ou *Flashover*, transição entre a fase de aquecimento e a fase de queima.

Durante a segunda fase, a temperatura eleva-se de forma brusca e o incêndio propaga-se rapidamente. A combustão pode ser controlada pela ventilação através da ausência de ar ou pode ser controlada pelas propriedades dos materiais combustíveis existentes no local. Nesta fase existe uma elevada produção de chamas

atingindo-se a temperatura máxima devido, não só à quantidade de oxigénio existente no ar e que alimenta a combustão, como também aos vapores quentes que se produzem e se elevam (Guerra, et al., 2003). A queima dos materiais é determinada pela quantidade, porosidade e forma. O combate de um incêndio nesta fase torna-se mais difícil porque a energia térmica libertada é elevada, o que torna geralmente os recursos e esforços de combate insuficientes, recorrendo à resistência do edifício ou elemento estrutural para prevenir o alastramento do fogo e o colapso estrutural no período posterior a esta fase.

A terceira fase de um incêndio depende do ambiente onde ele ocorre, isto é, se ocorre ao ar livre ou em espaço confinado.

Se o incêndio decorrer ao ar livre, segue-se a fase de declínio das chamas até se verificar a extinção por ausência de combustível (Guerra, et al., 2003). Com a queima do combustível existente, não há fornecimento continuado de energia térmica para o ambiente. Desta forma, a temperatura desce e quebra-se a cadeia de elementos necessários à ocorrência do fogo (calor, combustível, comburente) conhecidos como triângulo do fogo.

Num espaço fechado o fenómeno é mais complexo pois pode haver evolução de três formas distintas:

- Declínio das chamas (como num incêndio ao ar livre), quando o espaço for ventilado e o calor se puder libertar para o exterior;

- Combustão generalizada, que ocorre se o calor não se puder libertar para o exterior, mas existir renovação de ar razoável no local de incêndio;

- Asfixia, se não existir renovação de ar no local de incêndio, sendo notória a diminuição das chamas apesar da temperatura se manter com valores muito elevados. A quantidade de oxigénio existente é baixa, dando origem ao fenómeno de incandescência, contudo, a quantidade de gases libertados na combustão é máxima (Guerra, et al., 2003).

Na fase final, a resistência dos materiais ao fogo é crucial visto que os elementos e componentes devem desempenhar a função para a qual foram projectados (Moura, 2005).

2.4 Método dos elementos finitos aplicado à equação de calor

A equação básica que governa a transferência de calor através de um sólido (Fonseca, 2003), num material isotrópico é obtida através da equação:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 23$$

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 23 tem que satisfazer as condições iniciais e de fronteira do problema, indicadas na Figura 6.

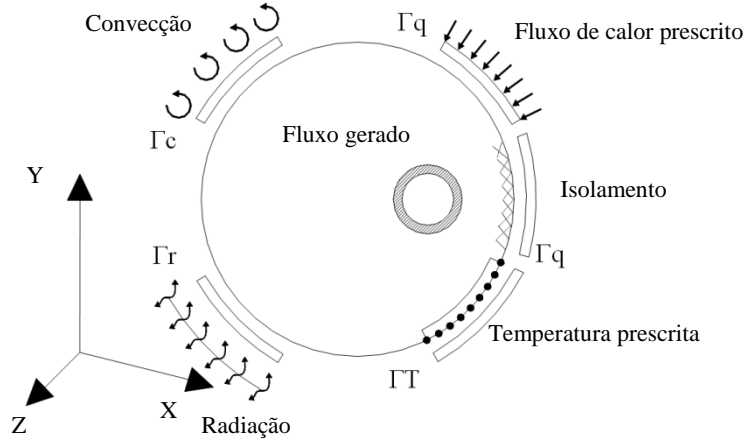


Figura 6: Condições de fronteira em problemas térmicos.

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. 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 [W/m²°C], sendo 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 19, tendo sido considerada uma temperatura inicial de 20 [°C].

A equação diferencial da condução do calor 23 é substituída por um sistema de equações diferenciais através de uma discretização no espaço. É aplicado o método dos resíduos pesados à equação de calor em regime transiente no domínio Ω [(Zienkiewicz, et al., 1989), (Vila Real, 1988), (Fonseca, 1998)], na forma:

$$\int_{\Omega} W_i R_{\Omega} d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{W}_i R_q d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} \bar{W}_i R_h d\Gamma_h = 0 \quad i = 1, 2 \dots \quad 24$$

Em que os resíduos são expressos pelas equações seguintes:

$$R_{\Omega} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad , \text{resíduo em } \Omega \quad 25$$

$$R_q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \bar{q} \quad , \text{resíduo em } \Gamma_q \quad 26$$

$$R_h = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h_{cr} T - h_{cr} T_{\infty} \quad , \text{resíduo em } \Gamma_h \quad 27$$

A substituição destes resíduos na equação 24 permite obter a seguinte expressão:

$$\int_{\Omega} W_i \left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{Q} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{W}_i \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \bar{q} \right) d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} \bar{W}_i \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h_{cr} T - h_{cr} T_{\infty} \right) d\Gamma_h = 0 \quad 28$$

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

$$[K] \{T\} + [C] \{\dot{T}\} = \{F\} \quad 29$$

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 expressas em função das expressões:

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_{cr}^e} N_i N_j h_{cr} d\Gamma_h^e, 1 \leq i, j \leq m \quad 30$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho C_p N_i N_j d\Omega^e, 1 \leq i, j \leq m \quad 31$$

$$F_i = \sum_{e=1}^{E'} \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^p \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_{cr}^e} h_{cr} T_\infty N_i d\Gamma_h^e, 1 \leq i, j \leq m \quad 32$$

onde E' representa o número total de elementos, n o número de elementos com fronteira do tipo convecção e radiação Γ_h e p o número de elementos com fronteira do tipo adiabático Γ_q , $d\Gamma_h^e$ e $d\Gamma_q^e$ representam elementos de área e $d\Omega^e$ um elemento de volume, (Fonseca, 2003).

A função desconhecida, campo de temperaturas, é aproximada no interior de cada elemento em função das equações:

$$T = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) T_j(t) = [K] \{T^e\} \quad 33$$

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) \dot{T}_j(t) = [K] \{\dot{T}^e\} \quad 34$$

Capítulo 3

Madeira de pinheiro e cedro vermelho

3 Madeira de pinheiro e cedro vermelho

Como consequência da sua origem biológica, a madeira apresenta em geral grande variabilidade, sobretudo entre material proveniente de diferentes espécies, mas também dentro da mesma espécie. Além disso, é um material que exibe uma heterogeneidade significativa e uma anisotropia acentuada. Por essas razões, assume especial importância a identificação e o conhecimento das características anatómicas das espécies de madeira, assim como a avaliação da qualidade das peças usadas em aplicações estruturais (Garrido, 2004).

Atendendo à utilização na indústria nacional, decidiu-se estudar a madeira do pinheiro e do cedro vermelho (Figura 7). Nas plantações para produção de madeira, o pinheiro bravo (*Pinus Pinaster*) é a espécie mais utilizada. A área de pinheiros permite o aproveitamento de 4.5 milhões de [m³] de madeira, mais uma grande quantidade de resíduos para a indústria de aglomerados. O pinheiro representa assim 33% das espécies florestais em Portugal. O pinheiro bravo é uma árvore de longevidade e porte medianos (Alía, et al., 1996) e de enraizamento profundo (Fernandes, 2002).

Em relação ao cedro, é uma árvore muito antiga, sendo considerada “a árvore da vida” em algumas culturas nativas. A sua queima reúne os quatro elementos: terra, fogo, água e ar. Os tipos mais utilizados são o cedro vermelho (*Red Ceder*) e o cedro branco (*White Ceder*). É uma madeira moderadamente pesada, macia ao corte e durável em ambiente seco. É muito utilizada em contraplacados, móveis em geral, na construção civil, naval, aeronáutica, entre outras aplicações.



Figura 7: Aspecto das espécies em estudo.

Ao longo das simulações numéricas utilizaram-se as características físicas definidas por outros autores, obtidas através da realização de ensaios (White, et al., 1999).

3.1 A madeira como material de construção

A madeira é um dos materiais estruturais mais antigos utilizado pelo homem na construção de edifícios. No entanto, verificou-se nas últimas décadas em Portugal, uma quase total substituição da sua utilização como material estrutural pelo betão armado e pelo aço, tendo passado a madeira a ser utilizada apenas em elementos secundários e de revestimento. Neste momento, e à medida que vai aumentando a tomada de consciência para as questões da preservação do planeta, o impacto ambiental dos materiais utilizados na construção torna-se cada vez mais um critério de escolha, tomando níveis de importância quase tão elevados como o preço e a qualidade.

A madeira é actualmente, o único material de construção estrutural oriundo de uma fonte de regeneração contínua, a floresta. A madeira como material de construção, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável, permitindo satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras, não constitui resíduo no final da sua vida útil uma vez que poderá ainda ser reutilizada (Henriques, 2002).

3.1.1 Classificação das madeiras

As espécies florestais são classificadas em dois grandes grupos: resinosas (ou gimnospérmicas) e folhosas (ou angiospérmicas) (Lewin, et al., 1991). Esta divisão baseia-se nas diferenças da estrutura anatómica existentes entre as espécies pertencentes aos dois grupos (Xavier, 2003).

A utilização de madeira como material de construção pode distinguir-se em duas categorias principais:

- *Hardwood*, provenientes de árvores com ramagem espessa (com folhas achatadas e largas) e de crescimento lento. As madeiras duras de melhor qualidade são também designadas por madeiras de lei.

- *Softwood*, provenientes em geral das árvores *coníferas* (com folhas em forma de agulhas ou escamas e semente, agrupadas em forma de cones), sendo de crescimento rápido.

Estas categorias distinguem-se essencialmente pela estrutura celular dos troncos e não propriamente pela sua resistência.

3.1.2 Estrutura molecular da madeira

A madeira é constituída na sua maioria por substâncias orgânicas. Os principais elementos constituintes apresentam-se nas seguintes percentagens aproximadas, independentemente da espécie considerada (Pfeil, et al., 2003): 50% de Carbono, 44% de Oxigénio e 6% de Hidrogénio.

O composto orgânico predominante é a celulose, que constitui cerca de 50% da madeira, formando os filamentos que reforçam as paredes das fibras longitudinais. Outros dois componentes importantes são a hemicelulose (20 a 25% da madeira) e a lenhina (20 a 30%) que envolvem e ligam entre si as moléculas de celulose. A lenhina confere às paredes das fibras, rigidez e resistência à compressão. A madeira apresenta ainda pequenas quantidades de sais minerais (0,2 a 1%), que constituem os alimentos dos tecidos vivos. Estes minerais produzem as cinzas quando a madeira é queimada.

A Figura 8 representa esquematicamente a constituição da estrutura celular da madeira (Xavier, 2003).

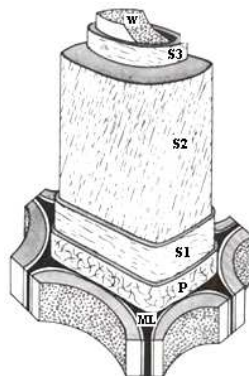


Figura 8: Estrutura da célula de madeira.

A parede celular da madeira é constituída essencialmente por uma parede primária (P), uma parede secundária dividida em três camadas (S_1 , S_2 e S_3) segundo a orientação das microfibrilas da celulose, e uma camada interna denominada de camada verrugosa (W). O espaço entre as fibras ou traqueídeos é a lamela média (ML) que, embora inicialmente seja constituída por substâncias pecticas, no final é quase exclusivamente lenhina. Na parede primária predomina a lenhina, enquanto a camada S_1 da parede secundária a proporção é de cerca de 29% de lenhina, 36% de celulose e 36% de hemiceluloses. Nas camadas S_2 e S_3 predomina a celulose, representando quase 60% (Esteves, 2001).

3.1.3 Estrutura e crescimento das madeiras

A cada ano de vida de uma árvore corresponde a formação de dois anéis relativamente concêntricos, um mais claro (anel de Primavera) e outro mais escuro (anel de Outono ou anel tardio) cerca de 10 vezes mais resistente a esforços mecânicos do que o primeiro (IST, 1991). A formação anual deste duplo anel faz com que numa secção transversal de um tronco, se observe uma alternância de anéis claros e escuros que confere à madeira um carácter de heterogeneidade (Figura 9). Pode verificar-se que em altura e ao longo do tronco, se encontram zonas sucessivamente mais novas, pelo que as secções superiores terão menor número de anéis, tornando-se essas zonas menos resistente, (Winandy, 1994).



Figura 9: Anéis de crescimento de um elemento de madeira.

Capítulo 4

Comportamento térmico da madeira

4 Comportamento térmico da madeira

A madeira possui uma baixa condutibilidade térmica. Esta propriedade dificulta a elevação da temperatura em zonas contíguas às que se encontram em combustão e evita a dilatação excessiva da estrutura.

A combustão do material superficial, produz uma camada carbonizada isolante que dificulta a transmissão de calor e a progressão do fogo para o interior. A condutibilidade térmica do carvão de madeira é cerca de 1/6 da madeira maciça o que explica as propriedades isolantes da camada carbonizada (Duarte, 2005).

Sob a camada carbonizada existe outra camada, de menor espessura, na qual as propriedades da madeira estão alteradas, não estando completamente decompostas designando-se por zona ou camada de pirólise. A parte restante da secção encontra-se a uma temperatura baixa e mantém as capacidades mecânicas originais, contribuindo para a resistência da estrutura.

As camadas ou zonas que se podem distinguir numa secção de madeira submetida a temperaturas elevadas são apresentadas esquematicamente na Figura 10.

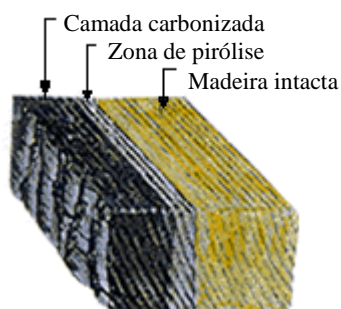


Figura 10: Zonas de degradação numa secção de madeira.

O comportamento térmico da madeira pode ser descrito sucintamente pelos seguintes processos: pirólise, ignição e formação da camada de carbonização.

4.1 Pirólise

Quando a madeira é aquecida em ambiente controlado até aos 100 [°C] ocorrem muito poucas reacções químicas. Aproximadamente aos 100 [°C] ocorre evaporação da maior parte da humidade existente. À medida que a temperatura vai aumentando até 200 [°C], ocorre uma pequena degradação, pelo facto de as fronteiras químicas começarem a falhar por desidratação. Na ausência de oxigénio, este processo de degradação térmica é denominado pirólise (Rowell, 2005). Entre 200 [°C] e 280 [°C] a degradação da camada superficial desloca-se para o interior da madeira. Essa região é sucedida por uma camada na qual a pirólise se processa lentamente. Entre 240 [°C] e 350 [°C] ocorre uma formação lenta de carvão. No intervalo entre 280 [°C] a 500 [°C], ocorrem reacções exotérmicas com a libertação de gases combustíveis e alcatrão, sob a forma de fumo, originando o carvão. Acima dos 500 [°C] e se a temperatura se mantiver em elevação, completa-se a carbonização (Moura, 2005).

4.2 Ignição

A ignição da madeira dá-se quando esta é sujeita a uma temperatura suficientemente alta juntamente com atmosferas ricas em oxigénio. A ignição pode ser de dois tipos distintos: provocada ou espontânea. A ignição provocada ocorre na presença de uma fonte de ignição (como por exemplo uma faísca ou uma chama). A ignição espontânea é aquela que ocorre na ausência de qualquer fonte de ignição. A superfície da madeira entra em ignição através do fluxo de energia ou de calor de um incêndio ou de qualquer objecto quente. Este fluxo de energia ou calor pode ter ambas as componentes, radiação e convecção.

A ignição espontânea pode ocorrer quando a fonte de calor, onde o elemento de madeira está situado, é de tal forma elevada, que não ocorre a dissipação correctamente. Este tipo de ignição envolve combustão sem chamas e normalmente ocorre após um largo período de tempo. A combustão sem chamas é uma degradação térmica que ocorre sem chamas ou incandescência. A ignição espontânea, que envolve madeira submetida a fontes de calor externas, relativamente baixas durante um longo período de tempo, envolve uma carbonização considerável. Alguns autores afirmam que esta camada carbonizada, produzida por uma longa exposição a um fluxo de calor reduzido, podem ter uma composição química diferente que resulta numa temperatura de ignição mais baixa do que a normalmente adquirida. Temperaturas entre os 80 [°C] e os 100 [°C] são recomendadas como temperaturas de segurança na superfície da madeira (White, et al., 1999).

4.3 Carbonização da madeira

A taxa, ou velocidade na qual a madeira se converte em carvão é um valor dimensional determinante para a avaliação da resistência ao fogo. A determinação desta taxa ou velocidade pode ser baseada em modelos empíricos formulados a partir de dados experimentais ou por modelos teóricos baseados em princípios físicos e químicos. Pode ser expressa pela perda de massa [g/s] ou pelo avanço da carbonização [mm/s]. O avanço da carbonização é mais divulgado por conduzir directamente à análise da secção residual, atendendo aos interesses do estudo de elementos estruturais em situação de incêndio.

A madeira quando sujeita a elevadas temperaturas decompõe-se de forma a criar uma camada isolante de carvão que retarda a sua posterior degradação. Assim, a quantidade de carbonização da secção é o factor principal na resistência ao fogo em elementos estruturais de madeira.

O EC5 (EN1995-1-2, 2004) propõe uma equação de projecto para determinação da evolução da camada carbonizada, $d_{char,0}$ [mm], em superfícies não protegidas expostas ao fogo normalizado, conforme a expressão 35.

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad 35$$

onde t representa o tempo de exposição em [min] e β_0 a taxa de carbonização [mm/min].

O EC5 (EN1995-1-2, 2004) propõe valores para a taxa de carbonização, função da massa específica da madeira, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Valores de β_0 e β_n para o cálculo da taxa de carbonização da madeira.

Especificação	Material	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
<i>Softwood</i>	MLC, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,7
	Madeira maciça, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,8
<i>Hardwood</i>	Madeira maciça ou MLC, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,7
	Madeira maciça ou MLC, $\rho \geq 450$ [kg/m ³]	0,5	0,55

β_0 – taxa de carbonização para exposição ao fogo numa direcção;

β_n – taxa de carbonização nominal, incluindo efeito de arredondamento dos cantos e aparecimento de fissuras.

MLC – madeira laminada colada

Uma secção de madeira exposta ao fogo em mais que uma direcção, apresenta os cantos arredondados devido ao efeito de carbonização. A Figura 11 ilustra o arredondamento dos cantos num elemento de madeira de dimensão inicial $a \times b$, exposto ao fogo em três direcções e isolado numa face. De acordo com o EC5, o raio de arredondamento dos cantos, r , deve ser considerado igual à espessura da camada carbonizada.

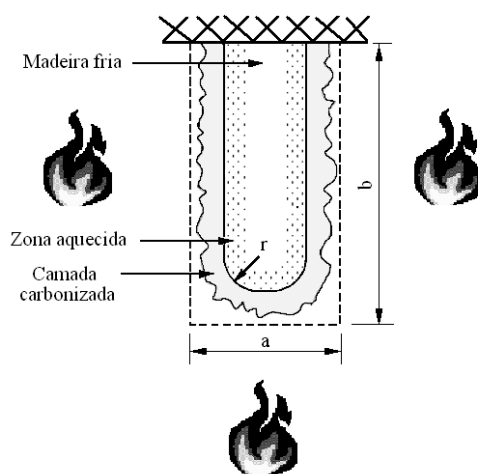


Figura 11: Arredondamento dos cantos numa secção exposta ao fogo em 3 direcções.

O modelo empírico linear proposto por Schaffer (White, et al., 1999) representa uma equação para o cálculo do tempo de evolução da camada carbonizada.

$$t = C x_c \quad 36$$

onde t corresponde ao tempo [min], C é a taxa de carbonização [min/mm] e x_c a profundidade de carbonização:

A temperatura na camada base de carbonização é geralmente igual a 300 [°C]. Com base neste critério de temperatura, foram desenvolvidas equações para o cálculo da taxa de carbonização, com base na exposição ao fogo segundo a ASTM E119, para diferentes espécies de madeira. Estas equações representam a taxa de carbonização C , segundo a direcção transversal do grão:

$$C = (0.002269 + 0.00457\mu)\rho + 0.331 \quad \text{Abeto} \quad 37$$

$$C = (0.000461 + 0.00095\mu)\rho + 1.016 \quad \text{Pinheiro do sul} \quad 38$$

$$C = (0.001583 + 0.00318\mu)\rho + 0.594 \quad \text{Carvalho branco} \quad 39$$

onde μ representa a humidade e ρ a massa específica [kg/m³] da espécie de madeira considerada.

O mesmo autor (White, et al., 1999) propõe um modelo não linear como método alternativo ao anterior, escrito na seguinte forma:

$$t = mx_c^{1.23} \quad 40$$

onde m é um coeficiente que representa a taxa de carbonização [$\text{min}/\text{mm}^{1.23}$] em forma de potência.

A equação para o cálculo da taxa de carbonização em função das propriedades da madeira, é representada através de:

$$m = -0.147 + 0.000564\rho + 1.21\mu + 0.532f_c \quad 41$$

onde f_c representa um factor de contracção na carbonização.

A Tabela 2 apresenta algumas características físicas das duas espécies de madeira, tendo em conta ensaios ao fogo expostos à curva ASTM E119, com uma humidade percentual entre 8% e 9%, enunciadas por (White, et al., 1999).

Tabela 2: Características físicas do pinheiro e do cedro vermelho.

Espécies de madeira	ρ [kg/m^3]	f_c	C [min/mm]	m [$\text{min}/\text{mm}^{1.23}$]
Pinheiro	509	0.60	1.24	0.56
Cedro vermelho	310	0.83	1.22	0.56

4.4 Propriedades térmicas da madeira

O anexo B do EC 5 (EN1995-1-2, 2004) enuncia os valores da condutividade térmica, do calor específico e massa específica da madeira, para uma humidade inicial de 12%, em exposição ao fogo normalizado independentemente da espécie da madeira. Pode considerar-se que os valores abaixo de 350 [°C] representam as propriedades da madeira e os valores acima de 350 [°C] representam as propriedades da camada carbonizada.

4.4.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é a medida da taxa de fluxo de calor através de materiais submetidos a um gradiente de temperatura. A condutividade térmica em peças estruturais de madeira é apenas uma pequena parte da condutividade térmica dos materiais metálicos, o que as coloca numa posição de destaque para esta finalidade. Na Tabela 3 são apresentados os valores que o EC5 sugere para a condutividade térmica da madeira num intervalo de temperaturas definido.

Tabela 3: Condutividade térmica da madeira, EC5.

Temperatura [°C]	λ - Condutividade térmica [W/mK]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

O gráfico da Figura 12 representa a evolução da condutividade térmica da madeira com a temperatura, em função dos valores da Tabela 3.

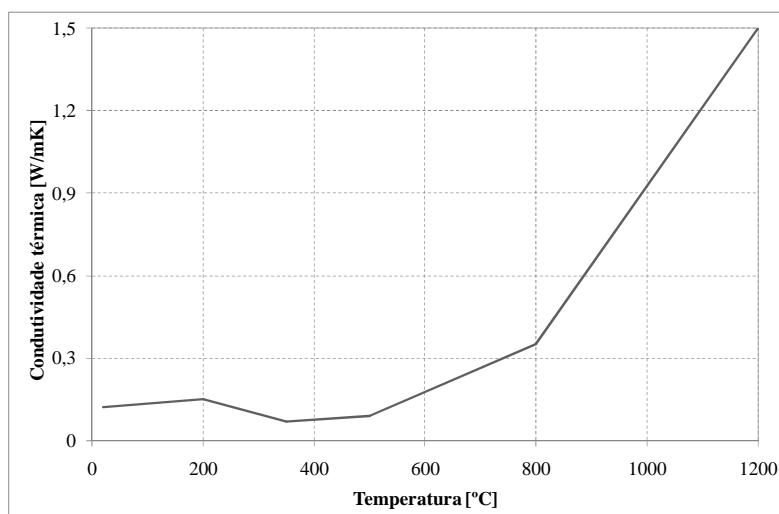


Figura 12: Condutividade térmica da madeira em função da temperatura.

4.4.2 Calor específico

O calor específico de um material é dado pela relação entre a capacidade de aquecimento deste material e a capacidade de aquecimento da água. A capacidade de aquecimento de um material representa a quantidade de energia térmica necessária para causar a troca de uma unidade de temperatura numa unidade de massa desse material. O calor específico da madeira depende da temperatura e do teor de humidade da mesma. Contudo, esta propriedade é independente da massa específica ou da espécie florestal (Moreschi, 1978).

Os valores que o EC5 propõe para a evolução do calor específico em função da temperatura são definidos na Tabela 4.

Tabela 4: Calor específico da madeira, EC5.

Temperatura [°C]	Cp - Calor Específico [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

A Figura 13 apresenta o gráfico da evolução do calor específico. O pico verificado para uma gama de valores entre os 99 [°C] e os 120 [°C] deve-se ao aquecimento necessário para a evaporação da humidade da madeira.

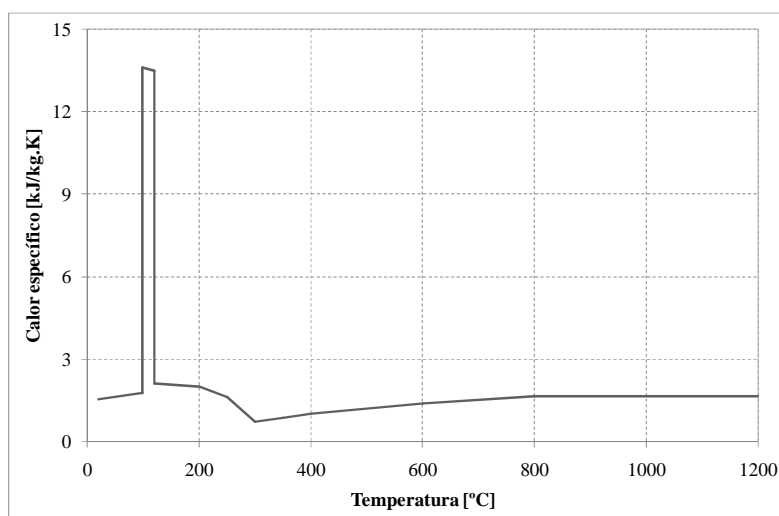


Figura 13: Evolução do calor específico da madeira em função da temperatura.

4.4.3 Massa específica

A presença de água na madeira faz variar tanto a massa como o volume da madeira, afectando a sua massa específica. Assim, os valores da massa específica são função de um 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.

Tabela 5: Taxa da massa específica em função da temperatura, EC5.

Temperatura [°C]	Taxa da massa específica
20	1+w
99	1+w
120	1
200	1
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0

O gráfico da Figura 14 representa a evolução da massa específica com o aumento de temperatura, nas espécies de madeira de pinheiro e de cedro vermelho.

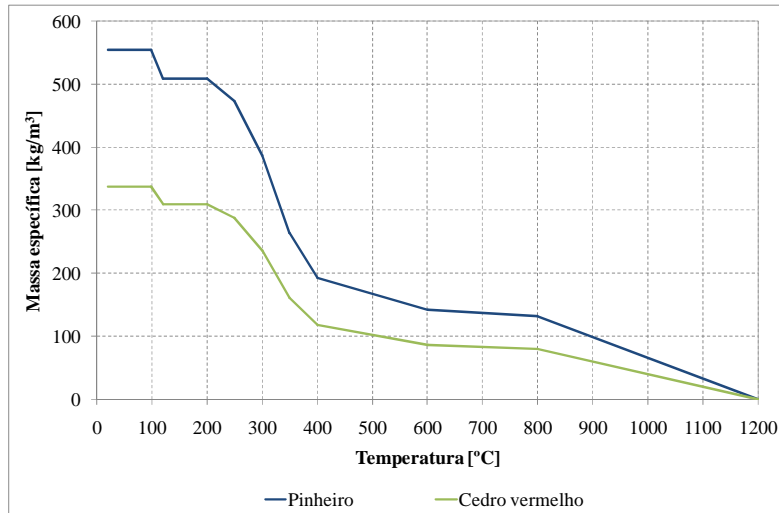


Figura 14: Gráfico da densidade da madeira função da temperatura.

4.4.4 Humidade

O teor de humidade da madeira, tem uma enorme importância sobre as suas propriedades. O grau de humidade w é o peso de água contido na madeira expresso como uma percentagem do peso da madeira seca em estufa P_s (até estabilização do peso) em relação ao seu peso inicial P_i :

$$w[\%] = \frac{P_i - P_s}{P_s} \times 100 \quad 42$$

Capítulo 5

Análise térmica não-linear em regime transiente

5 Análise térmica não-linear em regime transiente

Um método muito utilizado para aproximação de soluções numéricas de equações diferenciais é o método dos elementos finitos. Diferente do método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos utiliza fórmulas integrais para criar um sistema de equações algébricas que poderão ser solucionadas numa matriz algébrica (Twomey, 2007), como analisado no capítulo 2. Por este motivo, a formulação de elementos finitos deve ser realizada com recurso a sistemas computacionais de elevado desempenho.

O programa comercial utilizado neste trabalho é o programa de elementos finitos ANSYS. Pretende-se determinar a espessura da camada carbonizada, em função do tempo, em dois elementos estruturais, para diferentes cenários de exposição ao fogo segundo a curva ISO834. As duas espécies de madeira seleccionadas para o estudo são o pinheiro e o cedro vermelho. Para ambas as espécies realizaram-se simulações numéricas em geometrias de secção rectangular (200x400 [mm]) e quadrangular (400x400 [mm]), para diferentes cenários de incêndio (fogo num lado, três lados e quatro lados da estrutura) utilizando um elemento finito plano de 8 nós (Figura 15 e Figura 16).

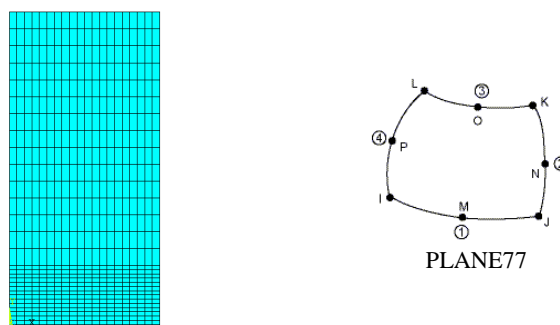


Figura 15: Modelo rectangular e malha de elementos finitos.

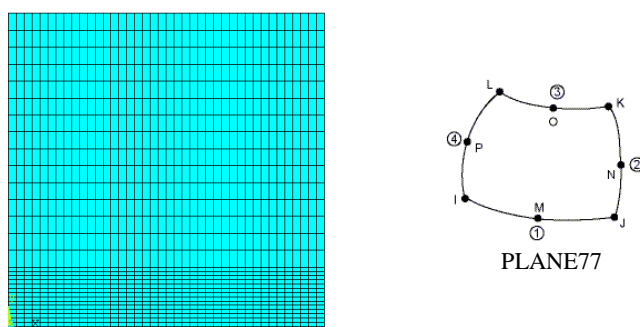


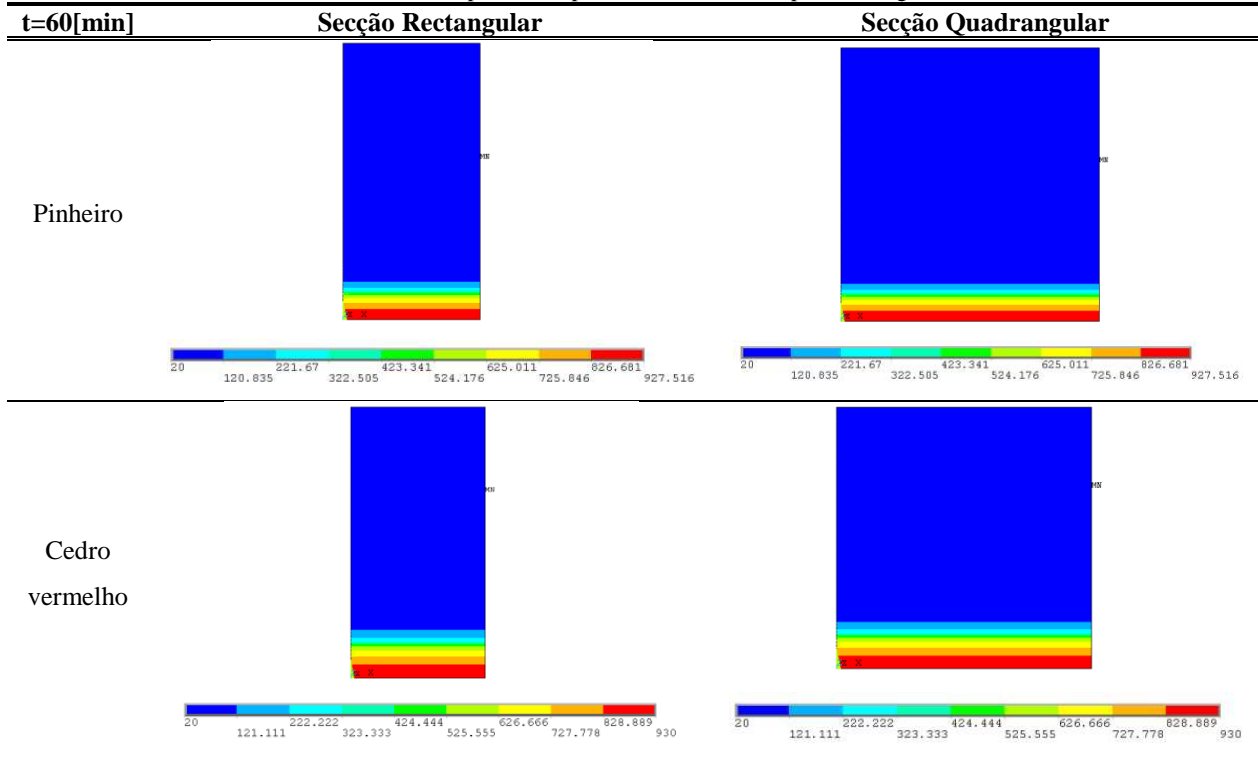
Figura 16: Modelo quadrangular e malha de elementos finitos.

As propriedades térmicas utilizadas apresentam um comportamento não-linear conforme o EC5. O cálculo da espessura carbonizada é efectuado pela determinação da temperatura a 300 [°C] que limita o interior da secção. Os valores obtidos na simulação numérica foram comparados com a equação de projecto do EC5.

5.1 Espessura de carbonização num elemento com fogo num lado

No caso do incêndio se verificar numa das faces do elemento estrutural, a condução de calor dá-se numa só direcção considerando-se uma variação linear. Na Tabela 6 encontram-se imagens do perfil de temperaturas obtidas, para o instante de tempo igual a 60 [min], nas duas secções em estudo.

Tabela 6: Campos de temperatura da madeira exposta ao fogo num lado.



Na Figura 17 e na Figura 18 estão representadas graficamente, a evolução da espessura de carbonização numa secção rectangular e numa secção quadrangular, quando expostas ao fogo numa direcção. Os resultados numéricos obtidos no Ansys, para o caso do cedro vermelho e do pinheiro, foram comparados com a evolução proposta pelo EC5 (EN1995-1-2, 2004).

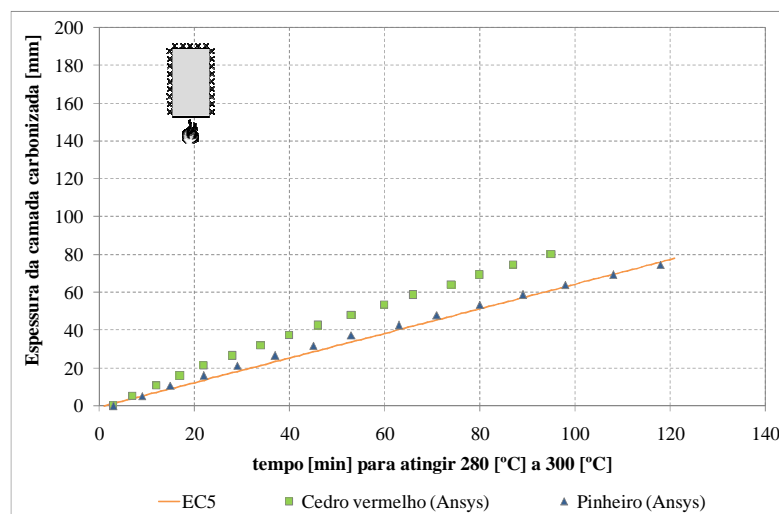


Figura 17: Espessura carbonizada da secção rectangular, exposta ao fogo numa face.

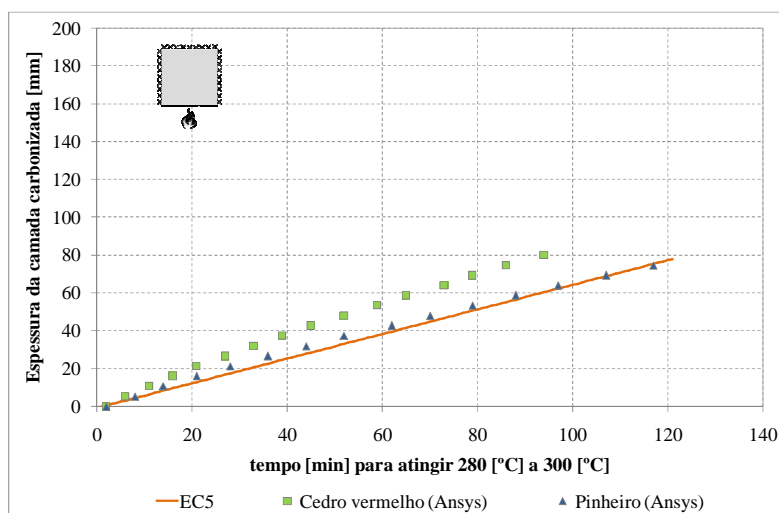


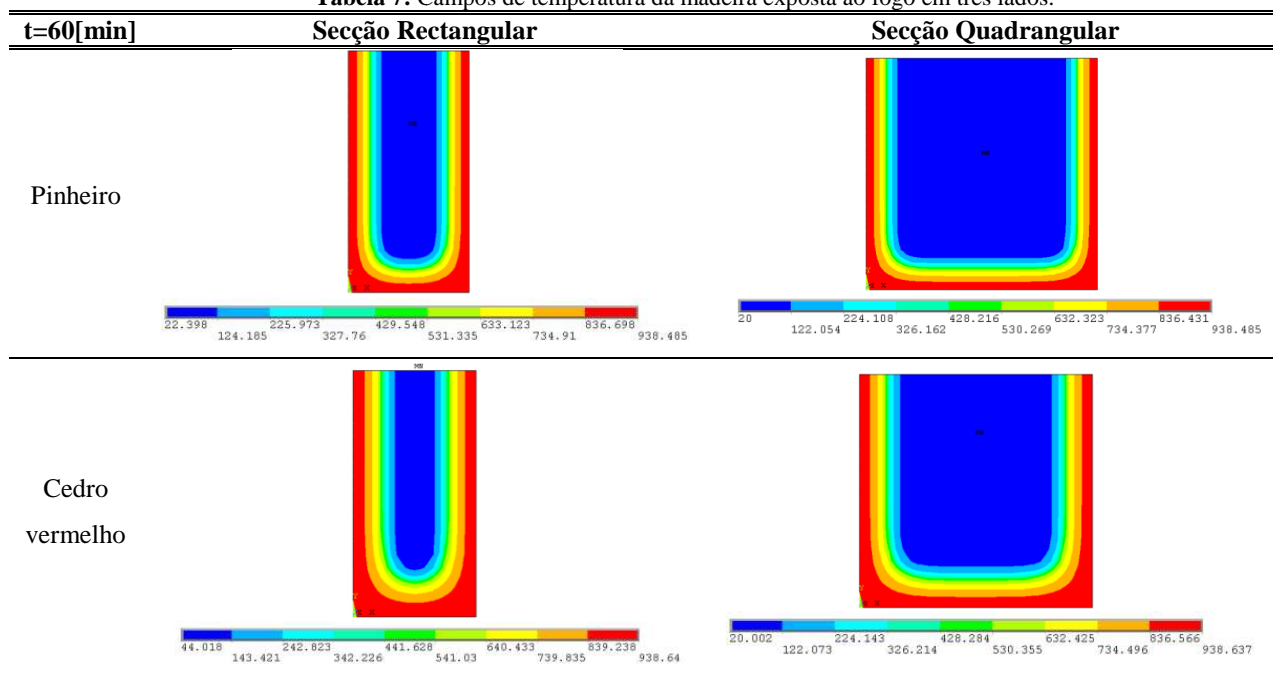
Figura 18: Espessura carbonizada da secção quadrangular, exposta ao fogo numa face.

Pode verificar-se, através da comparação das três curvas, que os resultados obtidos na análise do pinheiro se aproximam à curva proposta pelo EC5. A curva relativa ao cedro evolui mais rapidamente que as referidas anteriormente, possivelmente por possuir uma massa específica 40% inferior à do pinheiro. Comparando os gráficos da Figura 17 e Figura 18, pode concluir-se que, a diferença de tamanho na largura da secção do modelo estrutural, quando exposto ao fogo numa direcção, não influencia a evolução da camada de carbonização. O tempo registado na evolução da camada carbonizada é idêntico em ambas as situações.

5.2 Espessura de carbonização num elemento com fogo em três lados

Na Tabela 7 representa-se o perfil de temperaturas em diferentes secções de madeira para um instante de tempo igual a 60 [min], para a situação em que o fogo actua em três das suas faces.

Tabela 7: Campos de temperatura da madeira exposta ao fogo em três lados.



Quando a exposição ao fogo actua nas três faces 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 ou na vertical.

As curvas de evolução da espessura carbonizada da madeira na secção rectangular e quadrangular, expostas ao fogo em três faces, estão representadas na Figura 19 e na Figura 20, respectivamente. Em ambos os casos, a comparação de resultados numéricos é feita entre o cedro vermelho e o pinheiro na direcção horizontal e a curva proposta pelo EC5.

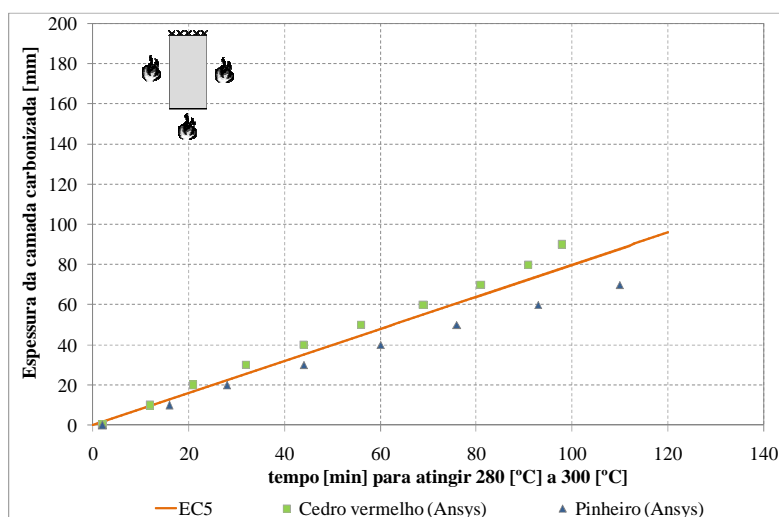


Figura 19: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção horizontal, exposta ao fogo em três faces.

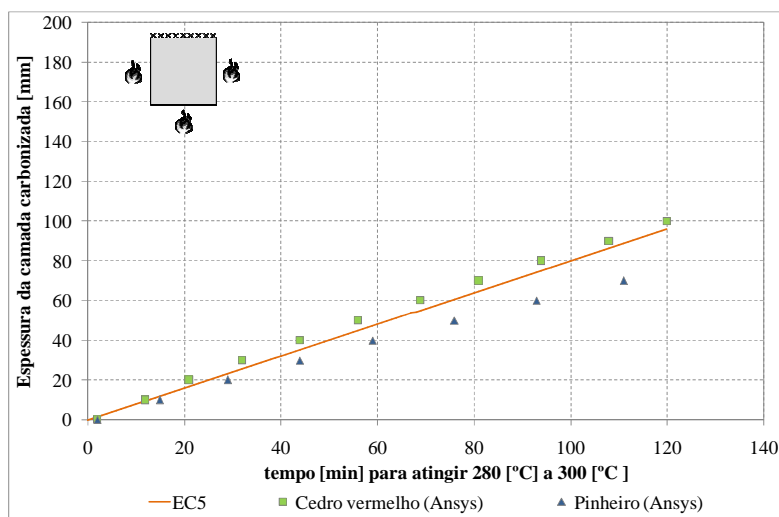


Figura 20: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção horizontal, exposta ao fogo em três faces.

Na Figura 21 e na Figura 22 comparam-se os resultados numéricos entre o cedro vermelho e o pinheiro na direcção vertical e a curva proposta pelo EC5, para as geometrias em estudo.

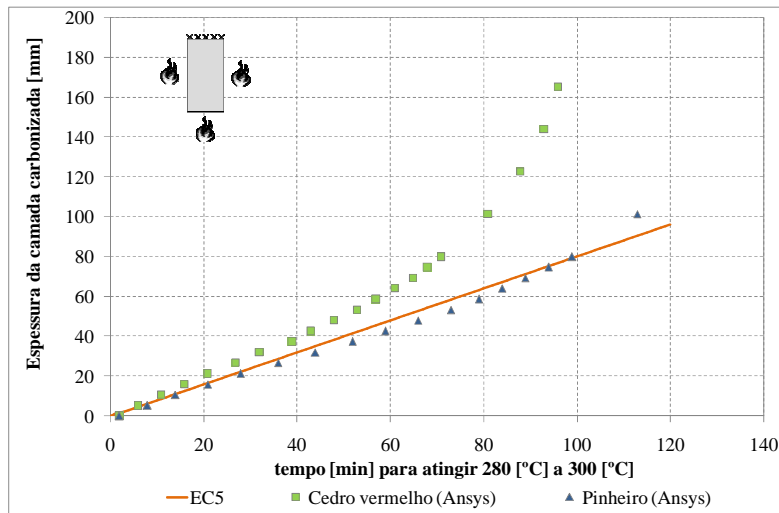


Figura 21: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção vertical, exposta ao fogo em três faces.

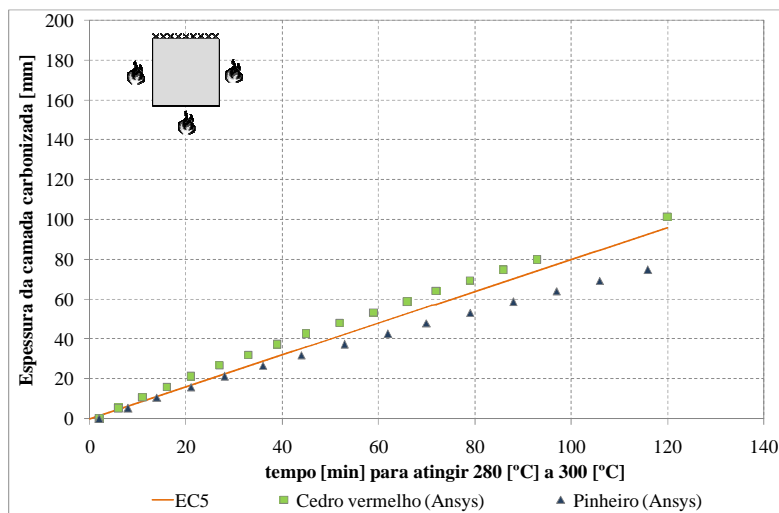


Figura 22: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção vertical, exposta ao fogo em três faces.

Pode verificar-se que o comportamento na direcção horizontal de ambas as espécies em estudo, tem uma evolução linear não se registando o mesmo na direcção vertical. É possível verificar que para o mesmo tempo de exposição ao fogo, o cedro vermelho apresenta uma espessura da camada de carbonização maior que o pinheiro.

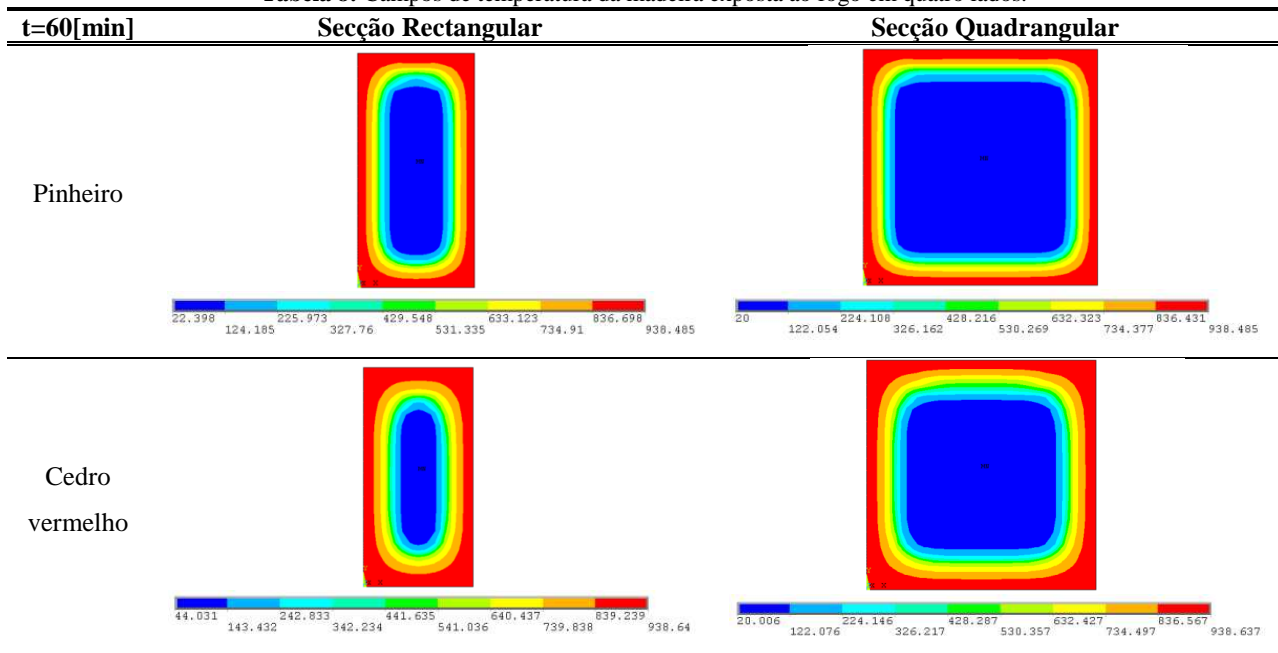
Para a secção rectangular, verifica-se sempre uma tendência linear do crescimento da camada carbonizada no lado maior dos perfis em estudo. Essa tendência não é linear nas faces menores do perfil, para a exposição do fogo em três lados. Neste caso, o efeito do arredondamento dos cantos da secção contribui fortemente no avanço da camada carbonizada. Tal como nas conclusões obtidas anteriormente, para ambas as geometrias em estudo, o cedro vermelho continua a apresentar, para o mesmo tempo de exposição ao fogo, uma maior profundidade de camada carbonizada em relação ao pinheiro.

5.3 Espessura de carbonização num elemento com fogo em quatro lados

Quando a exposição ao fogo actua nas quatro faces do elemento estrutural rectangular, a variação da camada carbonizada não é linear, variando de forma diferente em função da condução de calor se efectuar na direcção horizontal ou na vertical. No caso da secção do elemento ser quadrangular com exposição ao fogo nas quatro faces, pode considerar-se apenas uma das faces para o registo gráfico da espessura carbonizada.

A Tabela 8 apresenta o campo de temperaturas para um instante de tempo de exposição ao fogo de 60 [min], nas quatro faces da secção recta da madeira.

Tabela 8: Campos de temperatura da madeira exposta ao fogo em quatro lados.



Na Figura 23 e Figura 24 são apresentadas as curvas de evolução da carbonização na secção rectangular e quadrangular na direcção horizontal, quando expostas ao fogo nas suas quatro faces.

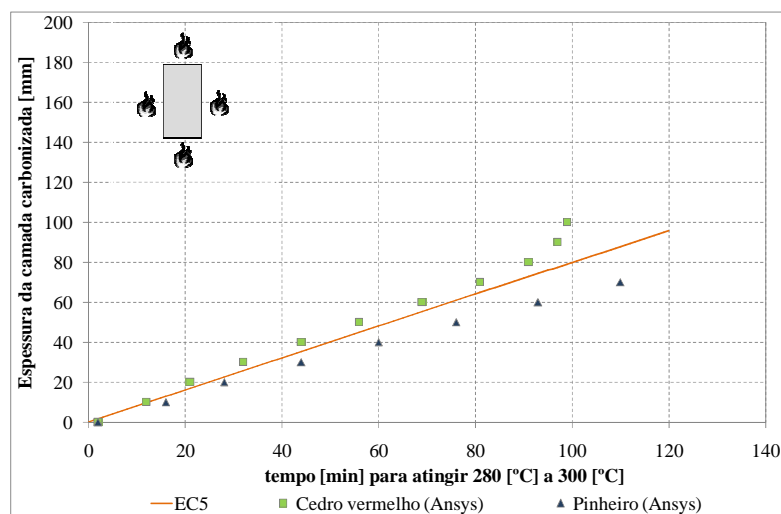


Figura 23: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção horizontal, exposta ao fogo nas quatro faces.

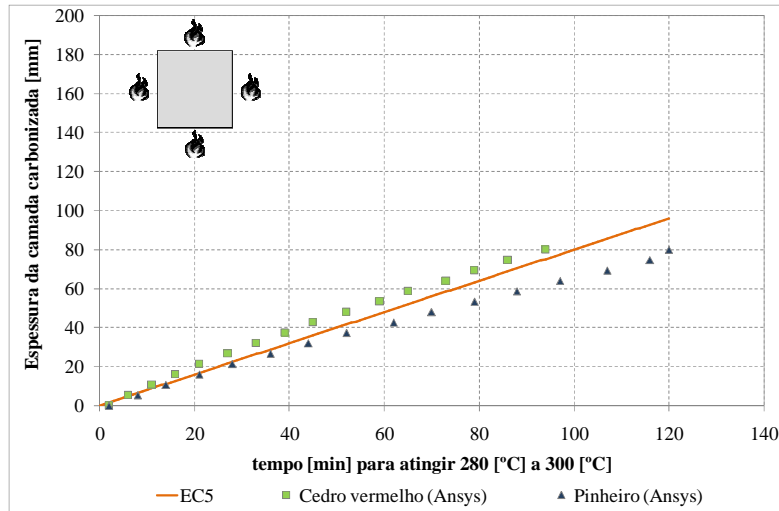


Figura 24: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção horizontal, exposta ao fogo nas quatro faces.

As curvas apresentadas na Figura 25 e Figura 26 correspondem aos resultados obtidos no cedro vermelho e no pinheiro na direcção vertical e a respectiva comparação com a curva proposta no EC5.

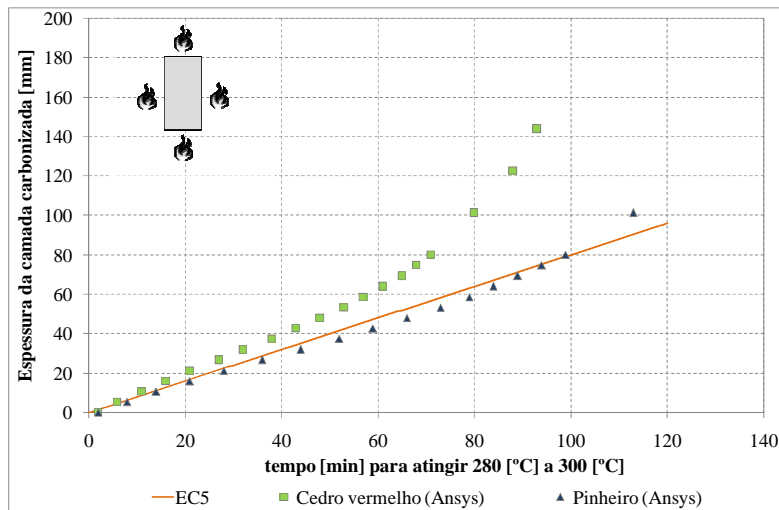


Figura 25: Espessura carbonizada da secção rectangular na direcção vertical, exposta ao fogo nas quatro faces.

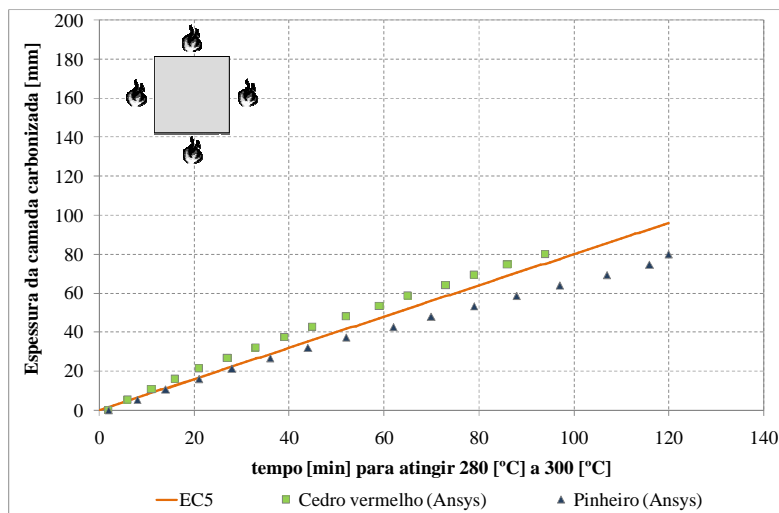


Figura 26: Espessura carbonizada da secção quadrangular na direcção vertical, exposta ao fogo nas quatro faces.

Pode verificar-se que a evolução na direcção horizontal de ambas as espécies em estudo, tem um crescimento linear em relação à direcção vertical. Neste caso, o efeito do arredondamento dos cantos da secção contribui fortemente no avanço da camada carbonizada. Tal como nos cenários de incêndio anteriores, a espessura da camada carbonizada no caso do cedro vermelho evolui mais rapidamente do que a do pinheiro para o mesmo tempo de exposição ao fogo. Para a secção quadrangular, tal como era previsível devido à sua geometria simétrica, o gráfico de evolução da camada de carbonização é igual quer a propagação do fogo se faça na direcção horizontal ou vertical da secção.

5.4 Velocidade de carbonização no perfil rectangular

A velocidade de combustão ou carbonização define-se como sendo a razão entre a espessura da camada carbonizada e o tempo de carbonização. Admite-se que a velocidade de carbonização é constante durante o decorrer do incêndio.

A Tabela 9 resume os valores determinados numericamente da velocidade de carbonização das espécies em estudo, considerando a secção rectangular bem como os valores propostos pelo EC5 (EN1995-1-2, 2004) e por *White* (White, et al., 1999).

Tabela 9: Comparação da velocidade de carbonização $\beta_{i,n}$ no perfil rectangular.

Espécie	Direcção da propagação	Ansys [mm/min]			EC5 [mm/min]	White et al [mm/min]
		1 lado	3 lados	4 lados		
Pinheiro	Vertical	0.67	0.79	0.79	0.65 - 0.8	0.81
	Horizontal	---	0.65	0.65		
Cedro vermelho	Vertical	0.89	1.001	1.004	0.65 - 0.8	0.82
	Horizontal	---	0.89	0.91		

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 horizontal) regista valores com tendência linear próximos de 0.9 [mm/min], enquanto o lado menor (direcção vertical) e na situação de fogo em três ou quatro lados, o crescimento da camada carbonizada é não linear.

5.5 Velocidade de carbonização no perfil quadrangular

Os valores determinados para a velocidade de carbonização nas espécies de pinheiro e cedro vermelho, numa secção quadrangular submetida a diferentes cenários de exposição ao fogo, são apresentados na Tabela 10 em comparação com os valores propostos pelo EC5 e por *White* (White, et al., 1999).

Tabela 10: Comparação da velocidade de carbonização $\beta_{i,n}$ no perfil quadrangular.

Espécie	Direcção da propagação	Ansys [mm/min]			EC5 [mm/min]	White et al [mm/min]
		1 lado	3 lados	4 lados		
Pinheiro	Vertical	0.67	0.67	0.67	0.65 - 0.8	0.81
	Horizontal	---	0.65	0.67		
Cedro vermelho	Vertical	0.89	0.88	0.89	0.65 - 0.8	0.82
	Horizontal	---	0.85	0.89		

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 superior à proposta pelo EC5 de 0.8 [mm/min] e ligeiramente superior ao modelo linear proposto por *White* (White, et al., 1999). Em todos os casos estudados 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.

5.6 Equações obtidas para o cálculo da espessura carbonizada

Na Tabela 11, representam-se as equações obtidas a partir das simulações numéricas, que permitem determinar a espessura da camada carbonizada em função do tempo, das duas espécies de madeira submetidas a diferentes cenários de exposição ao fogo no perfil rectangular. Nos casos em que o cenário de incêndio ocorre num lado da secção, não existe propagação do fogo na direcção horizontal, ou lado oposto.

Tabela 11: Equações obtidas para cálculo da espessura carbonizada em função do tempo no perfil rectangular.

Espécie	Direcção da propagação	Perfil rectangular		
		1 lado	3 lados	4 lados
Pinheiro	Vertical	$d_{char}=0.67 t$	$d_{char}=0.79 t$	$d_{char}=0.79 t$
	Horizontal	---	$d_{char,t}=0.65 t$	$d_{char}=0.65 t$
Cedro vermelho	Vertical	$d_{char}=0.89 t$	$d_{char}=1.001 t$	$d_{char}=1.004 t$
	Horizontal	---	$d_{char}=0.89 t$	$d_{char}=0.91 t$

Na Tabela 12 apresentam-se as equações obtidas nas simulações numéricas para cálculo da espessura carbonizada na madeira de pinheiro e de cedro vermelho em função do tempo no perfil quadrangular.

Tabela 12: Equações obtidas para cálculo da espessura carbonizada em função do tempo no perfil quadrangular.

Espécie	Direcção da propagação	Perfil quadrangular		
		1 lado	3 lados	4 lados
Pinheiro	Vertical	$d_{char}=0.67 t$	$d_{char}=0.67 t$	$d_{char}=0.67 t$
	Horizontal	---	$d_{char}=0.65 t$	$d_{char}=0.67 t$
Cedro vermelho	Vertical	$d_{char}=0.89 t$	$d_{char}=0.88 t$	$d_{char}=0.89 t$
	Horizontal	---	$d_{char}=0.85 t$	$d_{char}=0.89 t$

Estas equações, tornam-se úteis para o cálculo analítico em projecto de elementos estruturais, com as características em estudo.

Capítulo 6

Método experimental alternativo

6 Método experimental alternativo

Neste capítulo descreve-se um método experimental, como alternativa, na obtenção do perfil de temperaturas e do cálculo da camada carbonizada em perfis de madeira de pinheiro. Será utilizado um sistema de aquecimento através de uma unidade térmica, cujo sistema de potência irá aquecer um conjunto de resistências cerâmicas. A temperatura de aquecimento é assegurada através de um controlador programável. Este controlador gera uma curva de aquecimento e arrefecimento com a tipologia apresentada na Figura 27.

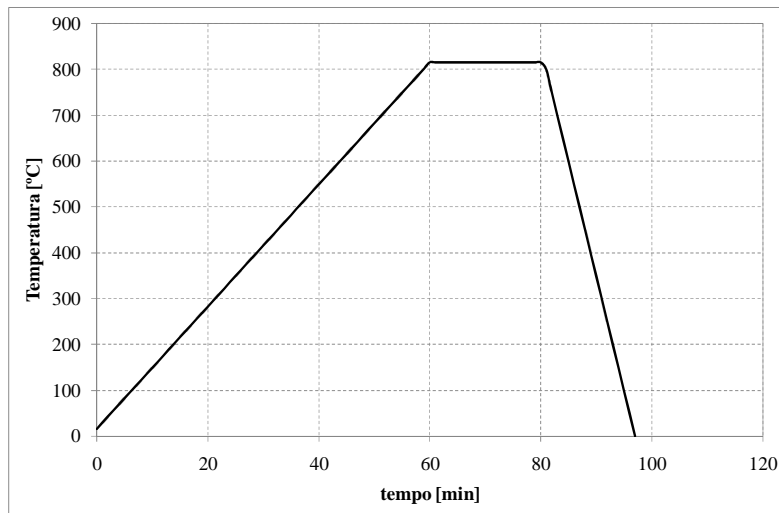


Figura 27: Curva de aquecimento e arrefecimento imposta na unidade térmica.

A colocação das resistências cerâmicas sobre as amostras em teste, obedece a alguns cuidados, no sentido de garantir o maior rendimento possível em todo o processo.

6.1 Metodologia experimental

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais em seis amostras de pinheiro com dimensões iguais a 180x80x500 [mm], conforme a Figura 28.

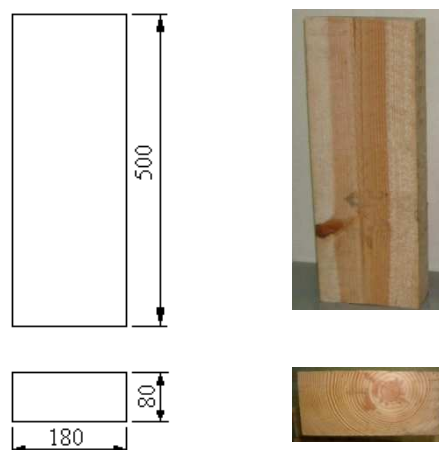


Figura 28: Geometria das amostras.

Em cada uma das amostras a temperatura foi registrada a 10 [mm], 20 [mm], 30 [mm], 50 [mm] e 250 [mm] da frente de calor com uma profundidade de 40 [mm], conforme a Figura 29. A medição de temperaturas

foi realizada através de fios condutores termopar tipo K colocados nos pontos referidos, ligados a um sistema de aquisição de dados, MGCPlus.

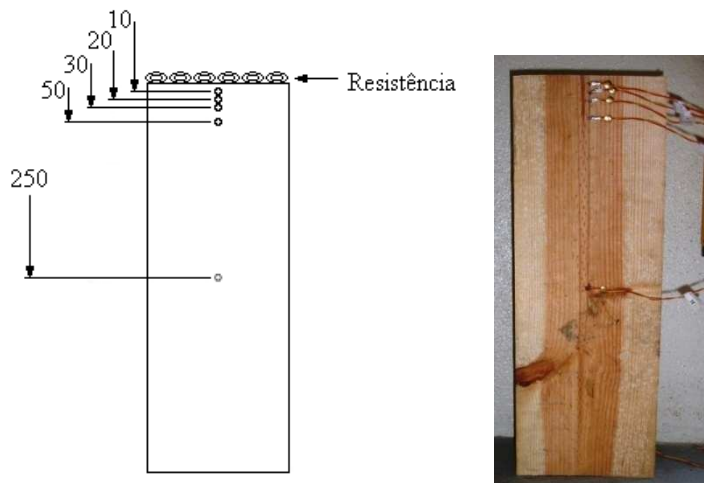


Figura 29: Posição dos termopares na amostra.

O aquecimento na estrutura foi realizado através da colocação de resistências cerâmicas no topo da estrutura, ligadas a um equipamento de aquecimento. Após a colocação das resistências, isolou-se todo o sistema envolvendo-o com uma manta de isolamento em fibra de vidro, com malha de aço inoxidável, Figura 30. Este processo irá garantir o maior rendimento térmico ao longo do ensaio.



Figura 30: Isolamento e aquecimento das amostras.

Também durante a execução dos ensaios, a temperatura na frente de calor dos elementos de madeira foi controlada através de termopares garantindo a taxa de aquecimento pretendida. Este controle permitiu que a distribuição de temperatura no topo das amostras fosse uniforme.

A evolução da temperatura ambiente segue uma variação linear no tempo, função da taxa de aquecimento do sistema de aquecimento utilizado. A taxa imposta foi de 800 [°C/h] conforme equação 43, onde T_{∞} corresponde à temperatura de ensaio em [°C], T_i é a temperatura inicial da estrutura e é igual a 16 [°C] e t corresponde ao tempo decorrido em [s] (Barreira, et al., 2008).

$$T_{\infty} = T_i + \left(\frac{800}{3600} \right) t \quad 43$$

6.2 Modelo numérico

Para comparação dos resultados obtidos experimentalmente efectuou-se uma análise por elementos finitos, utilizando o programa Ansys. Foi efectuada uma análise térmica em regime transiente. O modelo numérico obedeceu às mesmas condições impostas nos ensaios. Utilizou-se um elemento finito plano de 8 nós, sendo efectuada uma maior discretização da malha na zona de leitura de temperaturas (Figura 31). As propriedades térmicas utilizadas no modelo numérico, são as descritas nos capítulos anteriores. As condições fronteira utilizadas neste modelo foram temperatura prescrita a evoluir no tempo numa das faces, sendo as restantes isoladas.

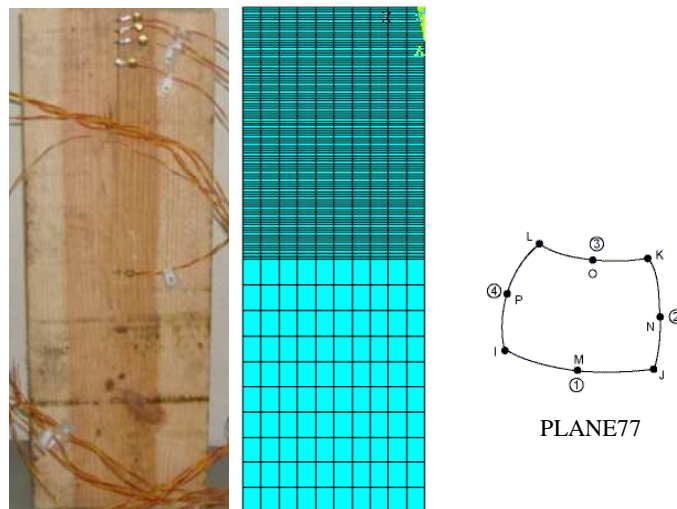


Figura 31: Amostra experimental e malha de elementos finitos.

6.3 Resultados obtidos

Os resultados experimentais obtidos podem ser verificados na Figura 32 para um instante final do ensaio de 3600 [s]. Pode verificar-se a evolução da carbonização na direcção vertical do elemento estrutural.



Figura 32: Amostras no instante final de ensaio.

Na Figura 33 são apresentadas imagens dos seis ensaios efectuados. Pode verificar-se a existência de três zonas distintas em todas as amostras. A zona A corresponde à camada de carvão, a zona B pertence à zona de pirólise ou madeira aquecida e a zona C identificada como a zona onde a madeira fica intacta.



Figura 33: Zonas de degradação nas amostras ensaiadas no final de 3600 [s] (Barreira, et al., 2008).

Os gráficos apresentados nas figuras seguintes, representam a evolução do campo de temperaturas obtido nos seis ensaios experimentais e os resultados obtidos através de simulação numérica. Os resultados foram obtidos para as diferentes posições indicadas até um instante final de 3600 [s] (Fonseca, et al., 2009).

Na Figura 34 estão representados os valores numéricos e experimentais a uma distância de 10 [mm] da frente de calor.

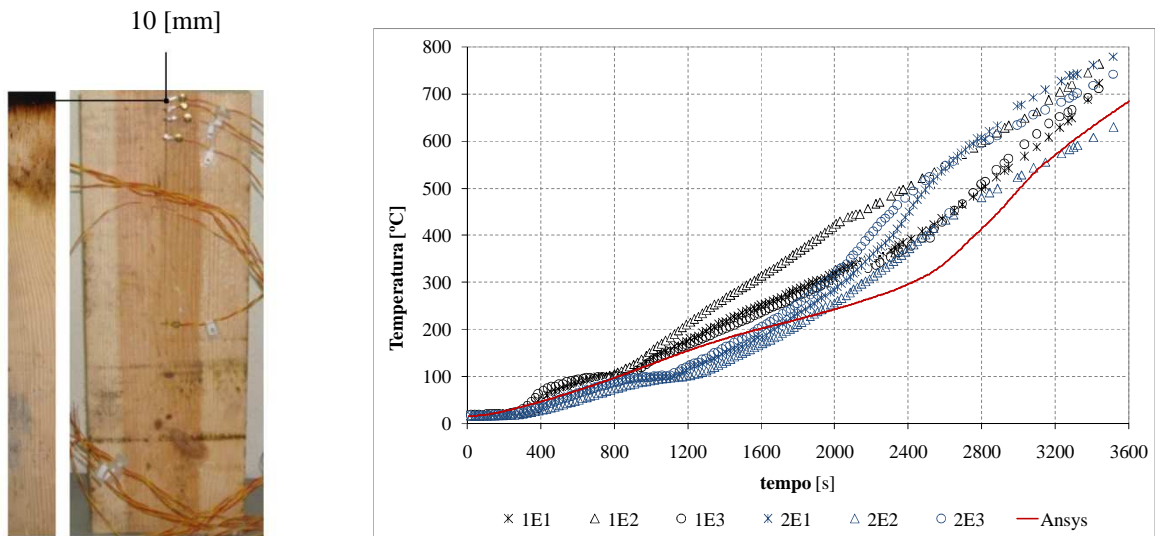


Figura 34: Resultados obtidos a 10 [mm] da frente de calor.

Como se pode verificar, no instante de tempo final, são atingidos valores de temperatura entre os 700-800 [°C], sendo a evolução da temperatura de todos os ensaios aproximada.

Na Figura 35 apresentam-se graficamente os valores obtidos a 20 [mm] da frente de calor, nos seis ensaios em comparação com o resultado obtido numericamente.

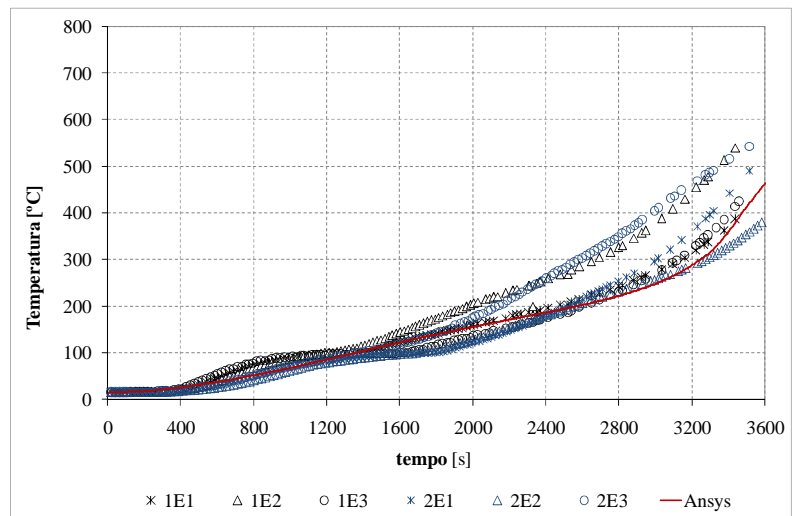
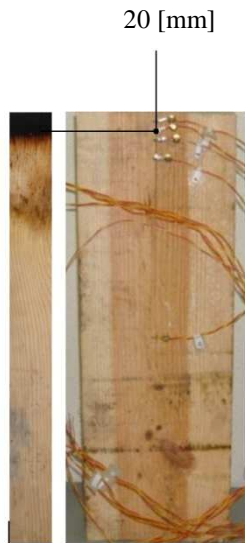


Figura 35: Resultados obtidos a 20 [mm] da frente de calor.

No gráfico da Figura 35 pode verificar-se que a 20 [mm] da frente de calor, no instante final, são atingidos valores de temperatura na ordem dos 400-500 [°C]. Pode verificar-se também uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

Na Figura 36 estão representados graficamente os resultados obtidos a uma distância de 30 [mm] da frente de calor e o valor obtido para as mesmas condições no estudo numérico.

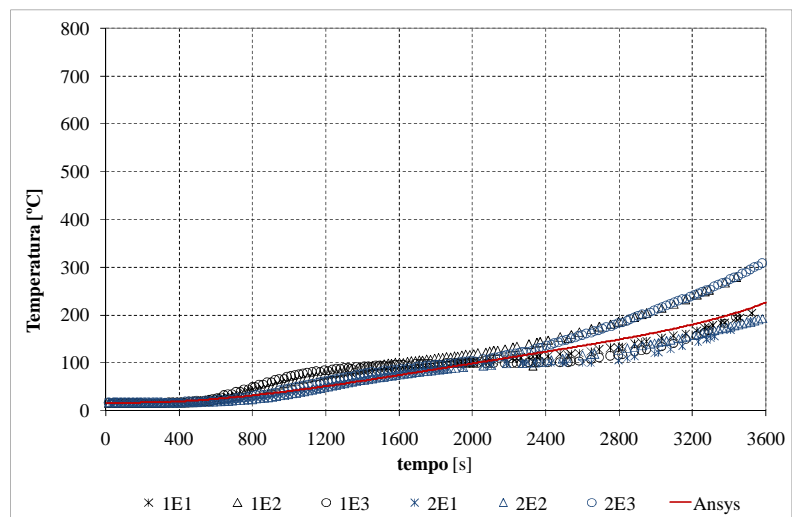
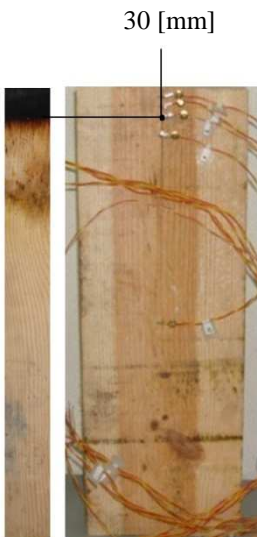


Figura 36: Resultados obtidos a 30 [mm] da frente de calor.

Os valores de temperatura obtidos atingem os 200-300 [°C], para o instante de tempo final. Pode verificar-se uma acentuada diminuição do calor em relação aos resultados anteriores, uma vez que a medição é efectuada mais no interior da estrutura. O valor da temperatura registado no modelo numérico é similar aos obtidos experimentalmente.

Os valores de temperatura obtidos no ponto de leitura localizado a 50 [mm] das resistências térmicas cerâmicas encontram-se representados na Figura 37.

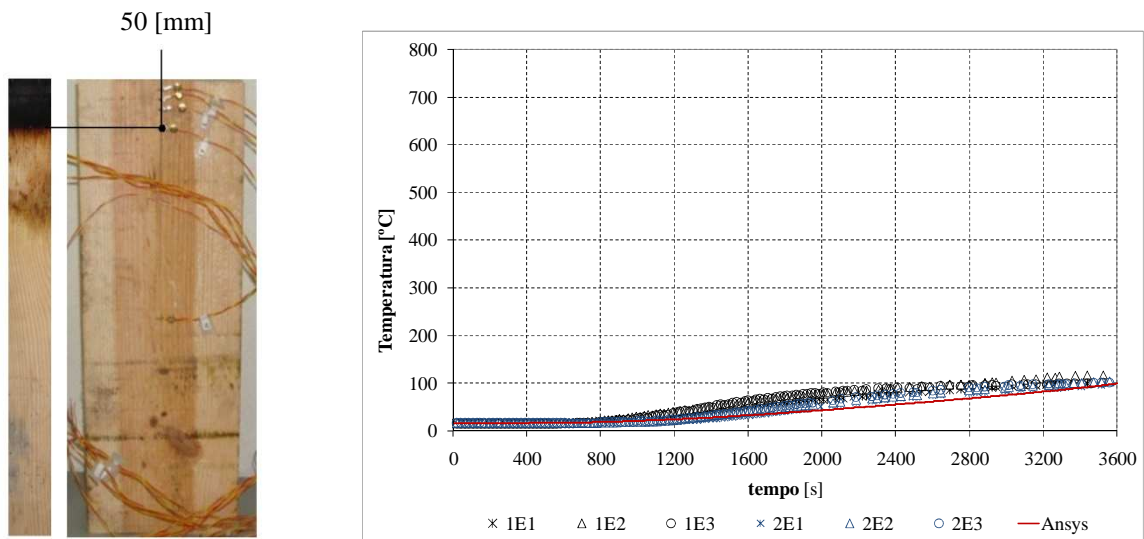


Figura 37: Resultados obtidos a 50 [mm] da frente de calor.

Pode verificar-se que para o tempo final de ensaio, os valores de temperatura obtidos em todos os casos se aproximam dos 100 [°C] verificando-se também neste caso uma acentuada diminuição da temperatura em relação à existente na frente de calor. Conclui-se também, que os resultados experimentais continuam a ter uma boa concordância com os obtidos numericamente.

Na Figura 38 representam-se os resultados obtidos durante 3600 [s] a 250 [mm] da frente de calor, num ponto localizado no núcleo das amostras.

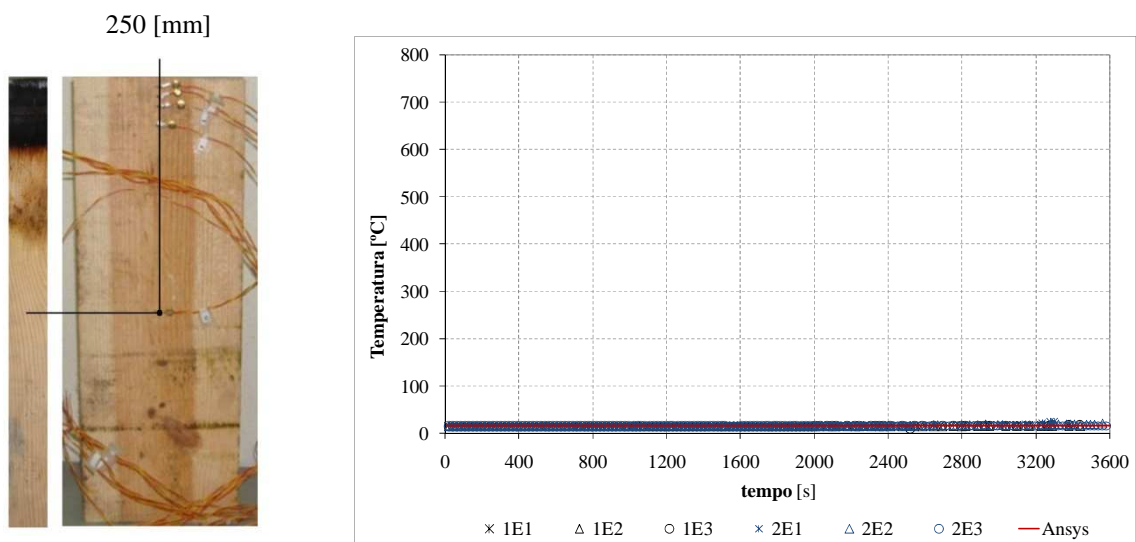


Figura 38: Resultados obtidos a 250 [mm] da frente de calor.

A partir da análise destes resultados, pode verificar-se que a temperatura neste ponto ao longo de todo o tempo de ensaio, se mantém a 16 [°C]. Desta forma verifica-se a existência de um núcleo frio no interior da estrutura.

Nos resultados experimentais anteriores, exceptuando a leitura efectuada a 250 [mm] das resistências térmicas, ocorre uma interrupção na elevação da temperatura por volta dos 100 [°C] e conseqüente diminuição da taxa de carbonização resultando num pequeno patamar térmico. Este efeito termoestático verificado a temperaturas próximas do ponto de ebulição da água, está relacionado com a distância do ponto de leitura de resultados, isto é, quanto mais perto da frente de calor estiver o ponto de leitura, menor será a permanência neste patamar. Durante a permanência do efeito termoestático, ocorre a evaporação da humidade existente no provete. Logo após o aumento da temperatura necessária à evaporação, verifica-se uma diminuição do teor de humidade até níveis próximos de 0% (White, et al., 1999).

A apresentação deste método experimental alternativo, traduz-se na possibilidade de verificar o comportamento térmico que este tipo de materiais apresenta. Foi possível evidenciar a existência de um núcleo frio e concluir sobre a resistência a altas temperaturas que estes materiais apresentam.

A comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores numéricos, permite obter uma garantia de utilização em ambos os processos.

Capítulo 7

Comportamento mecânico da madeira

7 Comportamento mecânico da madeira

O comportamento mecânico da madeira quando submetida a uma situação de acidente como é o caso de um incêndio, varia com a temperatura. O aumento da temperatura influencia a degradação progressiva das propriedades mecânicas dos materiais.

Para além da redução da secção resistente, a redução das propriedades mecânicas contribuem para que o elemento estrutural de madeira perca a sua capacidade resistente em situação de incêndio. O EC5 considera uma redução das propriedades mecânicas na ordem dos 20% em relação à madeira intacta, ou seja, madeira à temperatura ambiente (Moura, 2005).

As propriedades mecânicas apresentadas neste capítulo, foram obtidas de forma empírica a partir de provetes de madeira “limpos” e de grão contínuo, porque não possuem características tais como nós, grãos cruzados, imperfeições e fendas (White, et al., 1999).

7.1 Natureza ortotrópica da madeira

A madeira pode ser descrita como um material ortotrópico, por se considerar que as suas propriedades mecânicas coincidem com as direcções dos três eixos perpendiculares entre si: longitudinal, radial e tangencial.

Na Figura 39 estão representados os três principais eixos no que diz respeito à direcção do grão e aos anéis de crescimento: o eixo longitudinal L, é paralelo às fibras (grão); o eixo radial R, é normal aos anéis de crescimento (perpendicular ao grão na direcção radial) e o eixo tangencial T, perpendicular ao grão e tangente aos anéis de crescimento (Kurian, 2000). A diferença de propriedades entre as direcções radial e tangencial raramente tem importância prática, bastando diferenciar as propriedades na direcção das fibras principais (direcção longitudinal) e na direcção perpendicular às mesmas (Pfeil, et al., 2003).

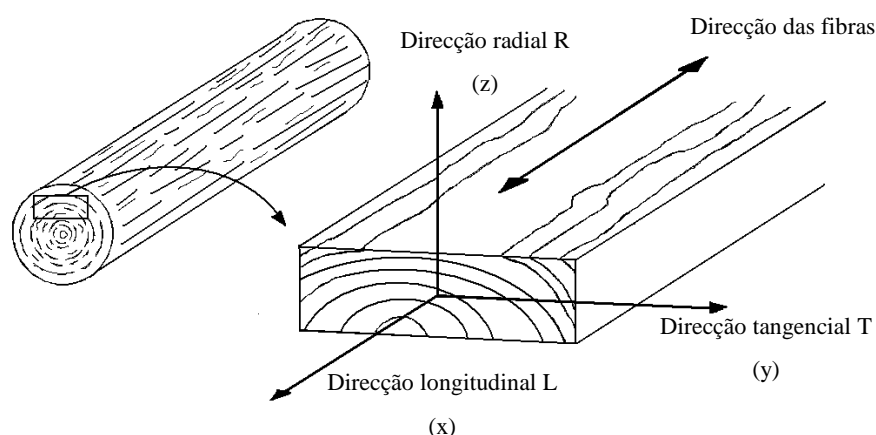


Figura 39: Representação dos três eixos respeitantes à direcção do grão e aos anéis de crescimento.

7.2 Propriedades mecânicas

Os materiais designados ortotrópicos têm as suas propriedades diferentes segundo os três planos de simetria elástica ortogonal.

A lei de *Hooke* generalizada é aplicada a estes materiais seguindo um modelo constitutivo de acordo com a expressão:

$$\{\varepsilon\} = [D^{-1}]\{\sigma\} \quad 44$$

em que $\{\varepsilon\}$ representa o campo de deformações lineares, $[D^{-1}]$ a inversa da matriz dos coeficientes elásticos e $\{\sigma\}$ o tensor das tensões.

Para o caso da madeira, a matriz das constantes elásticas, $[D]$ pode ser apresentada através de doze constantes (nove independentes), sendo que três correspondem ao módulo de elasticidade E , outras três correspondem ao módulo de rigidez G e as restantes seis ao coeficiente de *Poisson* μ .

O módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson* podem ainda ser relacionados através da seguinte expressão:

$$\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j}, \quad i \neq j \quad i, j = L, R, T \quad 45$$

A inversa da matriz das constantes ortotrópicas é enunciada na forma seguinte, (Kurian, 2000):

$$[D^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{LT}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \quad 46$$

onde os três módulos de elasticidade na direcção do eixo longitudinal, radial e tangencial da madeira são E_L , E_R , E_T respectivamente e os três módulos de rigidez G_{LR} , G_{LT} e G_{RT} são as constantes nas direcções dos planos LR , LT e RT respectivamente.

As propriedades mecânicas relacionadas com a tensão de rotura e o módulo de elasticidade, necessárias no estudo de cada uma das espécies são apresentadas na Tabela 13, para uma temperatura ambiente de 20 [°C] e humidade 12%, segundo (White, et al., 1999).

Tabela 13: Propriedades mecânicas das espécies em estudo.

Espécies	Humidade	Tensão de rotura [MPa]	Módulo de Elasticidade, E_L [MPa]
Pinheiro	12%	34.7	10100
Cedro vermelho	12%	31.4	7700

7.2.1 Módulo de Elasticidade e Módulo de Rigidez

A elasticidade implica que a deformação produzida por uma pequena tensão seja completamente recuperável depois de a carga ser removida. Se essa carga for elevada pode originar plasticidade ou mesmo rotura. No caso da madeira, bem como para outros materiais ortotrópicos, a relação tensão-deformação, incluindo as tensões de rotura, não são de fácil determinação.

Enquanto para materiais no âmbito de compósitos sintéticos, o esforço de investigação tem sido acentuado, no caso da madeira, existem poucos trabalhos publicados sobre a caracterização do seu comportamento ortotrópico (Xavier, et al., 2004).

Os valores que relacionam as três constantes do Módulo de Elasticidade e as três constantes correspondentes ao Módulo de Rigidez, propostas por (White, et al., 1999), são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Razões elásticas das espécies para humidade de 12%.

Espécie	E_T/E_L	E_R/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L	G_{RT}/E_L
Pinheiro	0.038	0.078	0.052	0.048	0.005
Cedro vermelho	0.055	0.081	0.087	0.086	0.005

Utilizando o EC5 e de acordo com o Anexo B, os valores do módulo de elasticidade e do módulo de rigidez nas diferentes direcções para as espécies de pinheiro e do cedro vermelho, são função da temperatura, Tabela 15.

Tabela 15: Valores dos Módulos de Elasticidade e Rigidez para estruturas submetidas a compressão.

Espécie	T [°C]	Factor de redução k_0	Módulo de Elasticidade [MPa]			Módulo de Rigidez [MPa]		
			E_L	E_T	E_R	G_{LR}	G_{LT}	G_{LR}
Pinheiro	20	1	10100	383.80	787.80	525.20	484.80	50.50
	100	0.5	5050	191.90	393.90	262.60	242.40	25.25
	300	0.01	101	5.56	8.18	8.79	8.69	0.51
Cedro vermelho	20	1	7700	423.50	623.70	669.90	662.20	38.50
	100	0.5	3850	211.75	311.85	334.95	331.10	19.25
	300	0.01	77	4.24	6.24	6.70	6.62	0.39

Na Figura 40 é apresentada a evolução do módulo de elasticidade na direcção longitudinal E_L , radial E_R e tangencial E_T , para as duas espécies de madeira em estudo.

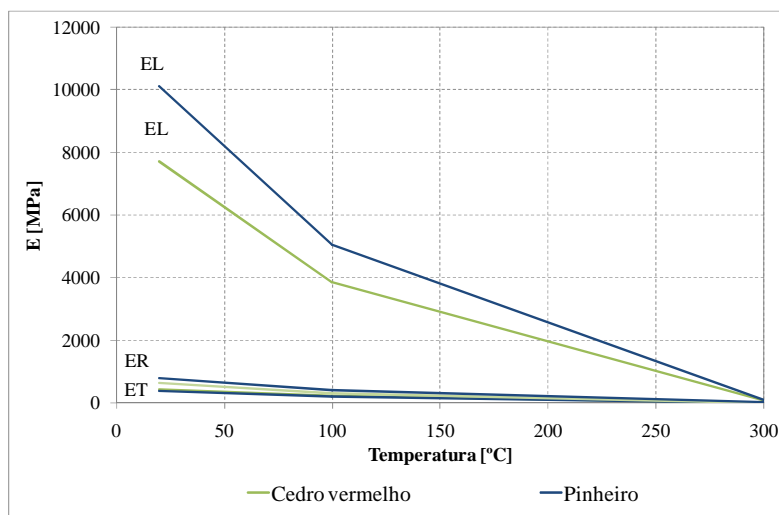


Figura 40: Representação gráfica do Módulo de Elasticidade nas diferentes direcções.

O módulo de elasticidade na direcção principal das fibras, ou seja ER, apresenta até aos 300 [°C] valores superiores ao módulo de elasticidade nas direcções radial e tangencial. Existe uma tendência para a diminuição deste valor até à perda total de resistência, com o aumento da temperatura.

7.2.2 Coeficiente de Poisson

Quando um elemento é carregado axialmente, a deformação perpendicular à direcção da carga é proporcional à deformação paralela a essa direcção. A razão entre o esforço transversal e o axial denomina-se de coeficiente de *Poisson*. No caso da madeira consideram-se os seguintes coeficientes de *Poisson*: ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RT} e ν_{TR} . A primeira letra corresponde à deformação na direcção da força aplicada e a segunda letra corresponde à direcção da deformação lateral. O coeficiente de *Poisson* varia de acordo com a espécie e é também afectado pela percentagem de humidade.

Na Tabela 16 são apresentados os valores propostos por (White, et al., 1999) para o coeficiente de *Poisson* de cada espécie em estudo.

Tabela 16: Coeficiente de *Poisson* das espécies em estudo para humidade de 12%.

Espécie	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}
Pinheiro	0.329	0.344	0.410	0.334
Cedro vermelho	0.378	0.296	0.484	0.403

7.2.3 Tensão de rotura

O valor da tensão de rotura por compressão paralela ao grão, é dada para cada espécie na Tabela 13 (White, et al., 1999), para a temperatura ambiente. Na Tabela 17 são apresentados os valores propostos pelo EC5 para cálculo da tensão de rotura paralela ao grão em função da temperatura.

Tabela 17: Valores da tensão de rotura das espécies em estudo.

Espécie	T[°C]	k ₀	Tensão de rotura, σ [MPa]
Pinheiro	20	1	34.7
	100	0.5	8.675
	300	0.01	0.347
Cedro vermelho	20	1	31.4
	100	0.5	7.85
	300	0.01	0.314

Os valores da tensão de rotura da tabela anterior são representados graficamente na Figura 41.

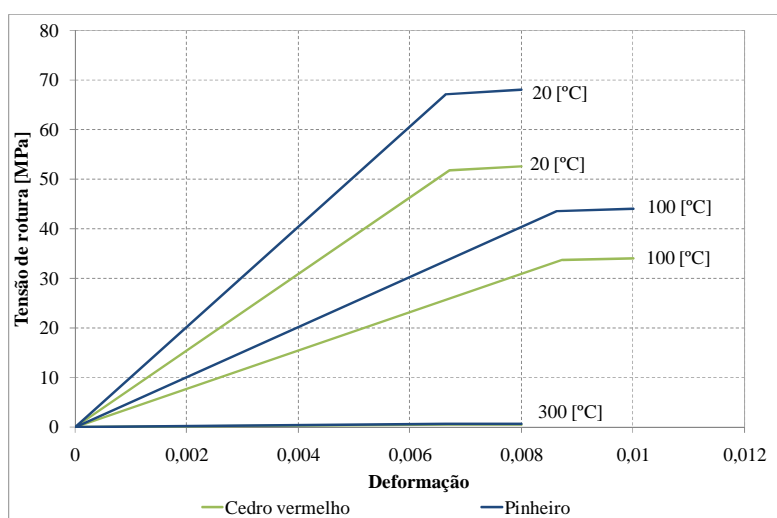


Figura 41: Representação gráfica da tensão de rotura para diferentes valores de temperatura.

7.2.4 Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica é uma medida de mudança de dimensão causada pela alteração da temperatura. A expansão térmica da madeira seca é positiva em todas as direcções. A madeira expande quando aquecida e contrai quando arrefecida. O coeficiente de expansão linear paralelo ao grão, α [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], da madeira seca, não varia com a espécie, conforme publicado por (Winandy, October 1994), sendo igual a 3×10^{-6} [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Capítulo 8

Análise térmica e mecânica não-linear

8 Análise térmica e mecânica não-linear

A maioria dos corpos dilatam quando se eleva a sua temperatura e contraem quando esta diminui, sendo as dilatações e as contracções proporcionais ao incremento térmico num amplo campo de temperaturas. Se num determinado corpo é permitida a contracção ou a expansão sem limitações, ao variar a temperatura, não se originará qualquer tensão. Quando a elevação da temperatura num corpo homogéneo não é uniforme e as diferentes regiões do material não se dilatam de forma igual, ocorrem tensões térmicas. Se a variação térmica num corpo homogéneo é uniforme e existirem limitações externas à dilatação, também são originadas tensões térmicas (Bautista, 2007).

O estudo do comportamento térmico e mecânico de componentes submetidos a altas temperaturas é importante na medida em que, havendo um efeito sobre as propriedades térmicas e mecânicas do material, haverá uma perda progressiva da rigidez devido à diminuição da elasticidade do material.

8.1 Simulação numérica

Ao longo deste capítulo apresentam-se diferentes simulações numéricas com base no estudo do comportamento térmico e mecânico em colunas submetidas a altas temperaturas. Foram consideradas as variações das propriedades térmicas e mecânicas da madeira de acordo com o EC5. Para além do efeito das altas temperaturas, considerou-se a influência de uma carga de compressão constante aplicada na coluna.

O modelo térmico e mecânico pretende determinar as tensões existentes nas espécies de madeira em estudo, para dois elementos estruturais de diferentes geometrias e em diferentes cenários de exposição ao fogo. Os resultados obtidos numericamente serão comparados com os resultados de um modelo analítico proposto.

Para ambas as espécies, pinheiro e cedro vermelho, foram realizadas simulações numéricas em colunas de diferente geometria (200x400x1000 [mm] e 400x400x1000 [mm]) considerando as propriedades ortotrópicas da madeira referidas no capítulo anterior. O estudo foi realizado para diferentes cenários de incêndio (fogo num lado, três lados e quatro lados da estrutura). Utiliza-se como modelo uma coluna, encastrada numa extremidade e com aplicação de um carregamento mecânico de 600 [kN]. Nas análises efectuadas, é utilizado um elemento finito sólido térmico e um elemento finito sólido estrutural, ambos de 8 nós. A malha de elementos finitos utilizada no modelo numérico é apresentada na Figura 42.

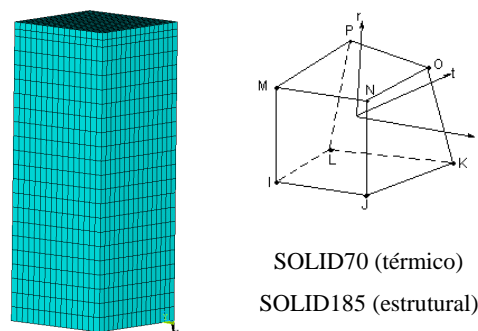
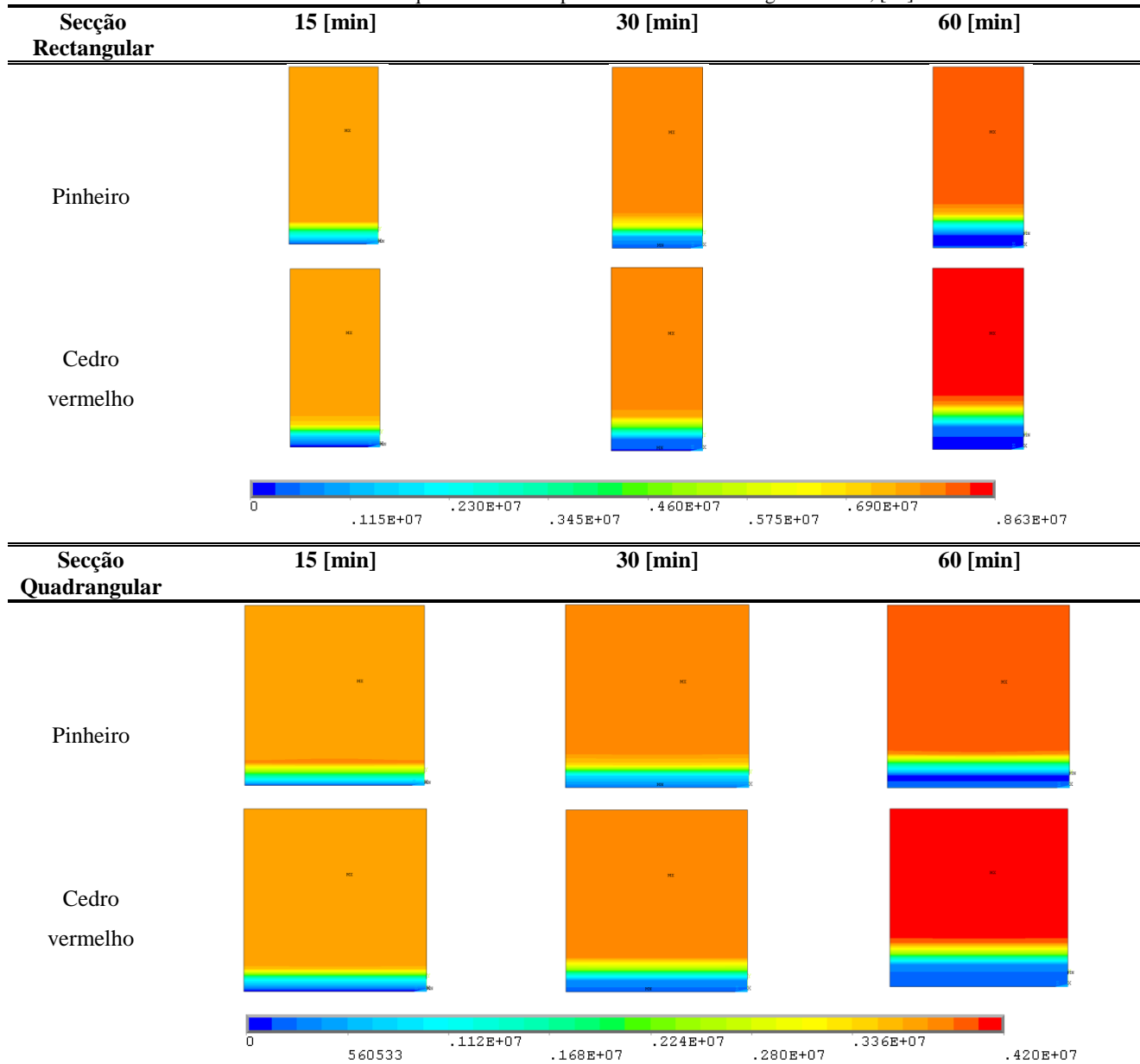


Figura 42: Modelo numérico tridimensional.

8.2 Tensões equivalentes: fogo num lado

Na Tabela 18 apresentam-se os resultados numéricos do campo de tensões equivalentes, obtido em perfis rectangulares e quadrangulares submetidos ao fogo numa direcção, para os instantes de tempo de 15, 30 e 60 [min] para o pinheiro e cedro vermelho.

Tabela 18: Tensões equivalentes nas espécies em estudo com fogo num lado, [Pa].



Verifica-se que com o aumento da temperatura, a zona da camada carbonizada no perfil também aumenta. Como resultado, a secção resistente da madeira vai diminuindo. Este facto traduz-se no aumento das tensões. Por outro lado, na zona carbonizada, as tensões são nulas.

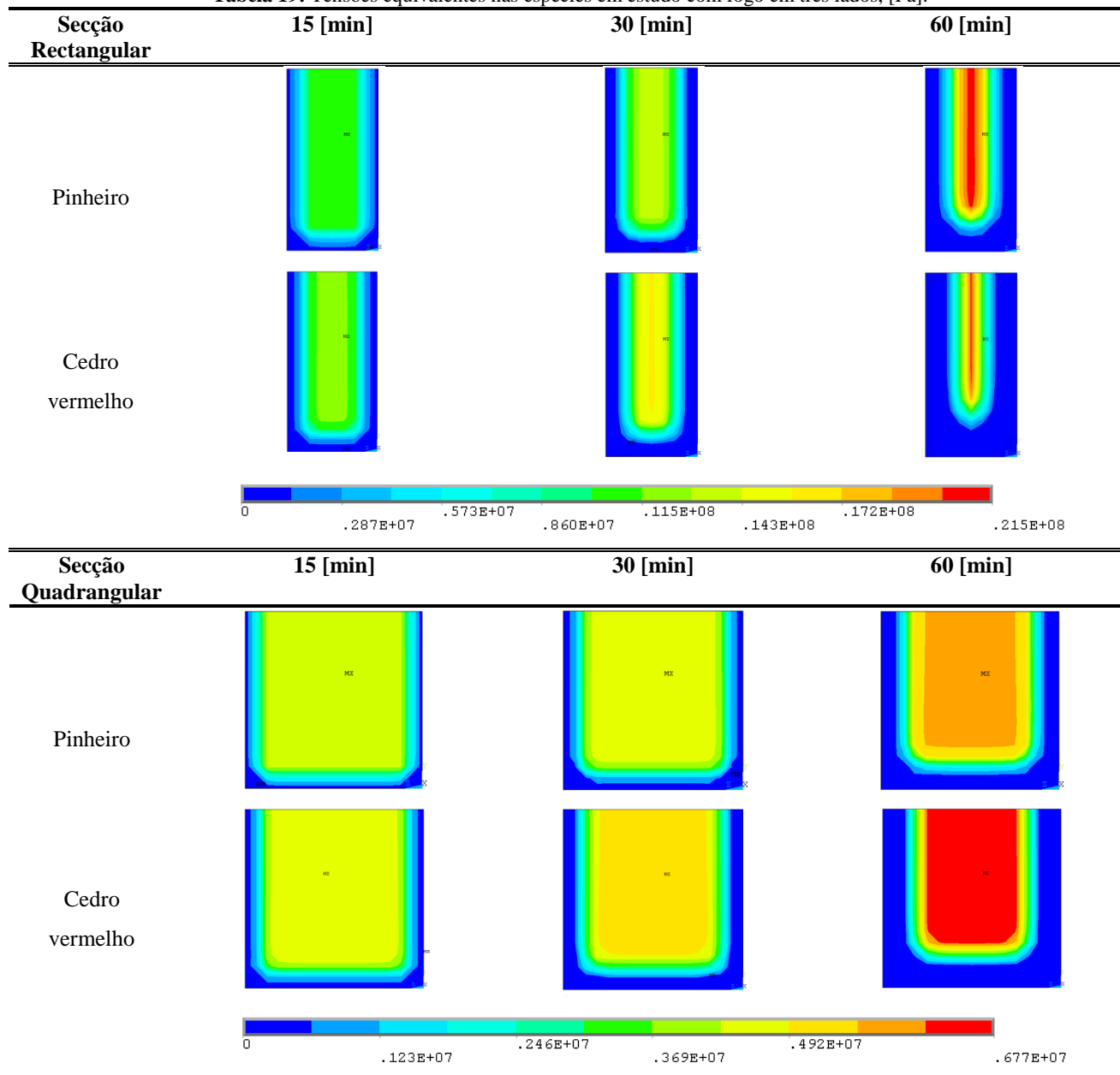
No instante final, a máxima tensão equivalente para uma coluna rectangular, apresenta valores no núcleo, iguais a 8.31 [MPa] para o pinheiro e 8.63 [MPa] para o cedro vermelho. No caso de a coluna apresentar uma

geometria quadrangular, os resultados obtidos no núcleo da estrutura no último instante são iguais a 4.05 [MPa] e 4.20 [MPa] para o pinheiro e para o cedro vermelho, respectivamente.

8.3 Tensões equivalentes: fogo em três lados

Os resultados numéricos da evolução do campo de tensões em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo em três direcções e em três instantes de tempo diferentes, apresentam-se na Tabela 19.

Tabela 19: Tensões equivalentes nas espécies em estudo com fogo em três lados, [Pa].



Nas simulações apresentadas verifica-se o aumento da zona carbonizada com a duração da exposição ao fogo. A secção resistente vai diminuindo pelo que o nível de tensões instaladas aumenta. O cálculo das tensões no interior da secção foi obtido em função de uma média de valores ao longo do núcleo resistente.

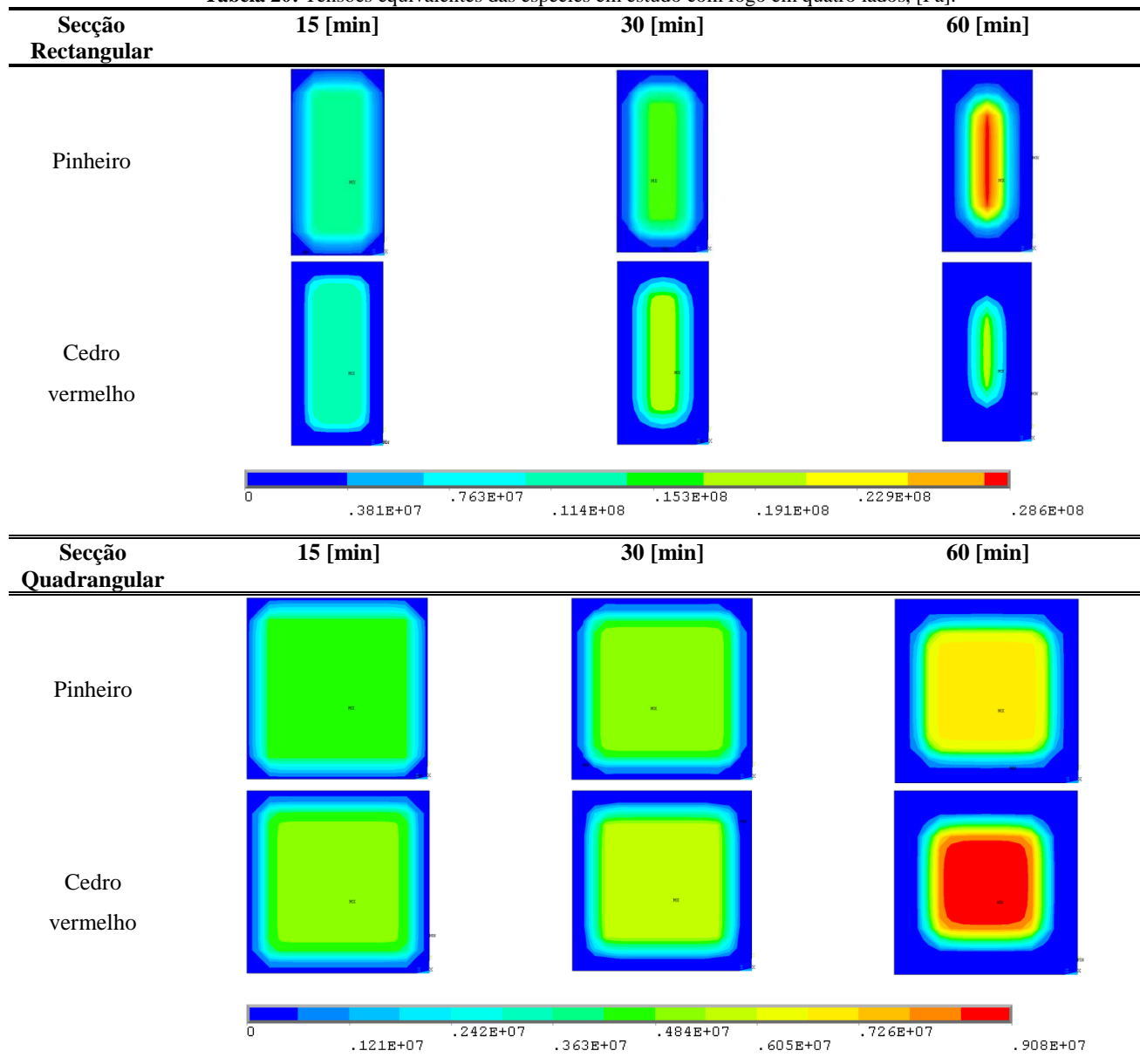
Assim, a média de valores da tensão máxima equivalente que ocorre no núcleo do perfil rectangular ao final de 60 [min] é igual a 13.36 [MPa] para o pinheiro e 17.17 [MPa] para o cedro vermelho. No perfil

quadrangular, o pinheiro tem o valor médio para a tensão equivalente igual a 5.01 [MPa] e o cedro vermelho igual a 5.94 [MPa].

8.4 Tensões equivalentes: fogo em quatro lados

Na Tabela 20 apresentam-se os resultados numéricos do campo de tensões obtidos no final de 15, 30 e 60 [min] em colunas rectangulares e quadrangulares de madeira de pinheiro e de cedro vermelho, para a condição de incêndio nas quatro faces.

Tabela 20: Tensões equivalentes das espécies em estudo com fogo em quatro lados, [Pa].



Quando a exposição ao fogo ocorre nas quatro faces do elemento, a redução da secção resistente é mais rápida, pelo que as tensões internas aumentam em relação às simulações anteriores. Também neste caso, o cálculo das tensões resulta da média dos valores ao longo do núcleo resistente da secção.

Na situação de fogo nas quatro faces da coluna rectangular, o valor médio da tensão máxima equivalente obtida no núcleo no instante final, para o pinheiro é igual a 17.22 [MPa] e para o cedro, igual a 20.50 [MPa]. Numa coluna quadrangular, estes valores médios são iguais a 6.07 [MPa] no caso do pinheiro e 6.92 [MPa] para o cedro vermelho.

8.5 Modelo simplificado no cálculo das tensões

Para avaliar a resistência mecânica do elemento estrutural em madeira quando exposto a uma situação de incêndio, apresenta-se uma metodologia de cálculo simplificado.

Considera-se uma coluna de madeira de cada uma das espécies e para as duas geometrias estudadas (Figura 43), submetida a uma carga $P = 600$ [kN]. Para cada situação, apresenta-se o cálculo das tensões máximas:

- 1 – Em condições normais;
- 2 – Na coluna exposta ao fogo numa direcção durante 15, 30 e 60 [min];
- 3 – Na coluna exposta ao fogo em três direcções durante 15, 30 e 60 [min];
- 4 – Na coluna exposta ao fogo em quatro direcções durante 15, 30 e 60 [min].

A Figura 43 representa a coluna em estudo e as diferentes secções rectas a utilizar. Convém referir que a secção quadrangular representada corresponde ao dobro da secção rectangular utilizada.

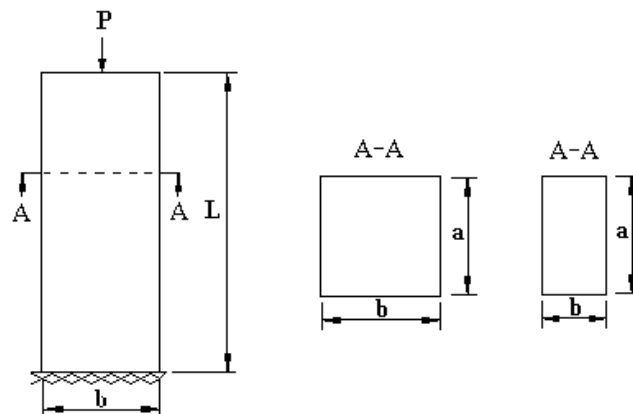


Figura 43: Coluna com geometria quadrangular e rectangular utilizado no modelo numérico.

Nas várias simulações referidas, utiliza-se a taxa de carbonização obtida numericamente para o cálculo da secção resistente da coluna.

8.5.1 Cálculo das tensões em colunas de madeira

- 1 – Tensão normal em condições normais

No caso em que a coluna de madeira é submetida unicamente a uma carga concentrada, o cálculo da tensão normal é obtido em função da equação 47:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad 47$$

onde P representa a carga concentrada e A a área da secção inicial.

De acordo com a geometria representada na Figura 44, a tensão normal calculada para a coluna rectangular é igual a 7.5 [MPa] e para a coluna quadrangular é igual a 3.75 [MPa].

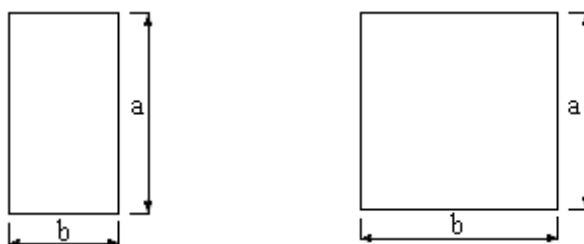


Figura 44: Geometria da coluna rectangular e quadrangular.

2 – Cálculo da tensão actuante na coluna exposta ao fogo numa direcção

Em elementos estruturais em que o fogo actua numa direcção, pode considerar-se o cálculo da secção resistente utilizando o valor da taxa de carbonização obtida. A equação 48 é função desse valor através do cálculo da espessura carbonizada.

$$\sigma_{cal} = \frac{P}{A_{final}} = \frac{P}{b(a - d_{y,t})} \quad 48$$

$$\text{com } d_{y,t} = \beta_{i,k} \times t$$

onde A_{final} é a área de secção final reduzida atendendo ao cálculo da espessura carbonizada $d_{y,t}$.

Na Figura 45 é representada a evolução da carbonização em função do tempo, em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo numa face e isoladas nas restantes.

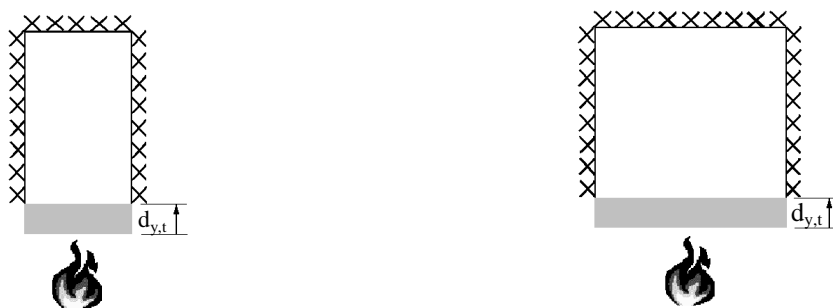


Figura 45: Carbonização da coluna rectangular e quadrangular com fogo numa direcção.

3 – Cálculo da tensão actuante na coluna exposta ao fogo em três direcções

A equação 49 permite efectuar o cálculo da tensão que actua numa coluna exposta ao fogo, em três direcções, em função do cálculo da espessura carbonizada.

$$\sigma_{cal,t} = \frac{P}{A_{final}} = \frac{P}{(b - 2d_{x,t})(a - d_{y,t})} \quad 49$$

$$\text{com } d_{x,t} = \beta_x \times t \quad ; \quad d_{y,t} = \beta_y \times t$$

onde A_{final} representa a área de secção final reduzida atendendo ao cálculo da espessura carbonizada, $d_{x,t}$ e $d_{y,t}$, nas três faces do perfil em contacto com o fogo.

A evolução da camada carbonizada em colunas expostas ao fogo em três faces, em função do tempo de exposição, apresenta-se na Figura 46.



Figura 46: Carbonização da coluna rectangular e quadrangular com fogo em três direcções.

4 – Cálculo da tensão actuante na coluna exposta ao fogo em quatro direcções

A equação 50 permite efectuar o cálculo da secção resistente em elementos estruturais submetidos a uma condição de incêndio nos seus quatro lados.

$$\sigma_{cal,t} = \frac{P}{A_{final}} = \frac{P}{(b - 2d_{x,t})(a - 2d_{y,t})} \quad 50$$

$$\text{com } d_{x,t} = \beta_x \times t \quad ; \quad d_{y,t} = \beta_y \times t$$

onde A_{final} é a área de secção final reduzida atendendo ao cálculo da espessura carbonizada, $d_{x,t}$ e $d_{y,t}$, em todas as faces em contacto com o fogo.

Na Figura 47 representa-se esquematicamente a carbonização em elementos estruturais submetidos ao fogo nas quatro faces.

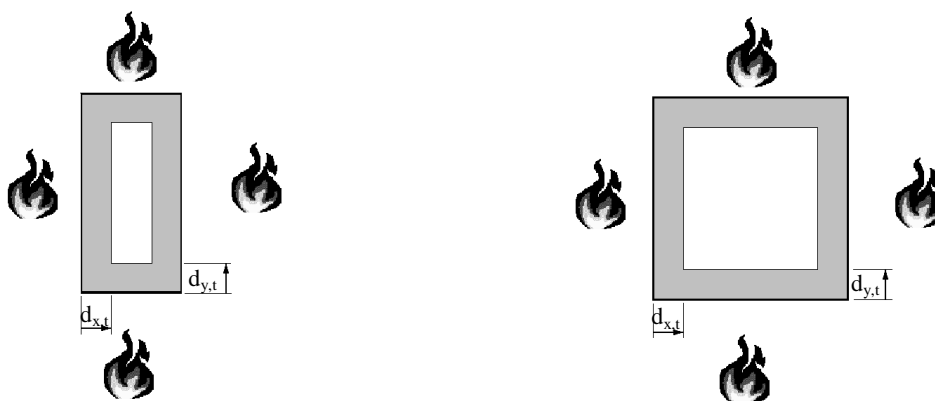


Figura 47: Carbonização da coluna rectangular e quadrangular com fogo em quatro direcções.

A Tabela 21 resume os valores do cálculo das tensões normais em elementos estruturais de madeira de secção rectangular, para a situação de imposição de carregamento em condições normais ou em simultâneo com a presença de incêndio.

Tabela 21: Tensões normais na secção rectangular, função do modelo simplificado, [MPa].

Espécie	Carga (P) em condições normais	Carga (P) e Exposição ao fogo	tempo de exposição ao fogo		
			t=15 [min]	t=30 [min]	t=60 [min]
Pinheiro	7.5	1 lado	7.69	7.90	8.34
		3 lados	8.56	9.90	13.95
		4 lados	8.83	10.57	16.11
Cedro vermelho	7.5	1 lado	7.76	8.04	8.66
		3 lados	8.99	11.06	18.94
		4 lados	9.39	12.15	23.64

Na Tabela 22 são apresentados os resultados das tensões normais obtidas nas condições descritas, em elementos estruturais das espécies de madeira em estudo, com geometria quadrangular.

Tabela 22: Tensões normais na secção quadrangular, função do modelo simplificado, [MPa].

Espécie	Carga (P) em Condições normais	Carga (P) e Exposição ao fogo	tempo de exposição ao fogo		
			t=15 [min]	t=30 [min]	t=60 [min]
Pinheiro	3.75	1 lado	3.85	3.95	4.17
		3 lados	4.04	4.37	5.18
		4 lados	4.16	4.63	5.87
Cedro vermelho	3.75	1 lado	3.88	4.02	4.33
		3 lados	4.14	4.60	5.80
		4 lados	4.31	4.99	6.98

Como se pode observar da análise de ambas as tabelas, as tensões aumentam quando, além do carregamento normal imposto, existe a presença de uma acção de acidente. Verifica-se ainda que o nível de tensões aumenta com a duração da exposição ao fogo, assim como com o número de lados do elemento exposto.

Em relação às duas espécies, o cedro vermelho é o que apresenta um maior nível de tensões, o que seria de esperar, uma vez que a taxa de carbonização é mais elevada conforme identificado em capítulos anteriores.

Na comparação dos elementos em relação à geometria, pode verificar-se que as secções quadrangulares produzem níveis de tensão aproximadamente 50% menores que as rectangulares, quer o estudo seja feito em condições normais ou com exposição ao fogo.

8.6 Comparação de resultados

8.6.1 Fogo num lado

Na Tabela 23 comparam-se os resultados das tensões equivalentes em diferentes instantes de tempo obtidas no programa de elementos finitos Ansys, com os resultados obtidos analiticamente através do modelo de cálculo simplificado apresentado.

Tabela 23: Tensões obtidas em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo numa direcção.

Espécie	Tempo [min]	Secção rectangular		Secção quadrangular	
		σ_{cal} [MPa]	σ_{Ansys} [MPa]	σ_{cal} [MPa]	σ_{Ansys} [MPa]
Pinheiro	15	7.69	7.63	3.85	3.73
	30	7.90	7.85	3.95	3.83
	60	8.34	8.31	4.17	4.05
Cedro vermelho	15	7.76	7.67	3.88	3.76
	30	8.04	7.97	4.02	3.90
	60	8.66	8.63	4.33	4.20

A evolução das tensões calculadas analiticamente e numericamente, no intervalo de tempo de 60 [min], é apresentada graficamente na Figura 48 e na Figura 49 para elementos de secção rectangular e quadrangular respectivamente.

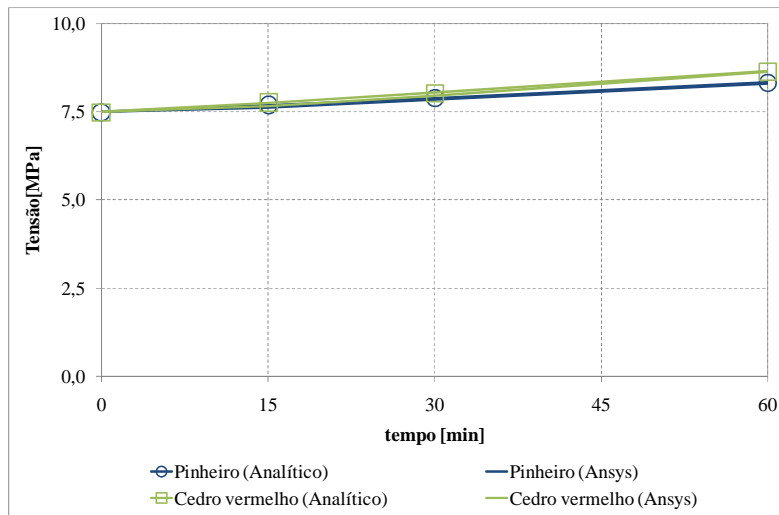


Figura 48: Evolução das tensões em colunas rectangulares com fogo num lado.

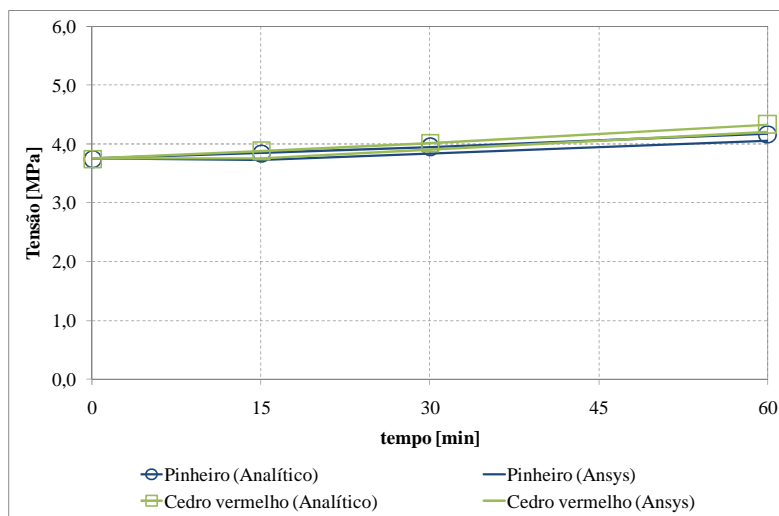


Figura 49: Evolução das tensões em colunas quadrangulares com fogo num lado.

Pode verificar-se em todos os casos, que com o decorrer do tempo e com o incremento de temperatura, os valores da tensão aumentam, sendo que, o valor obtido analiticamente, é ligeiramente superior ao obtido numericamente. O resultado médio da tensão equivalente no núcleo do perfil em cada instante de tempo, é mais elevada no caso do cedro vermelho do que no pinheiro, o que leva a concluir que o pinheiro apresenta maior resistência ao fogo do que o cedro vermelho.

Fazendo a comparação de resultados entre a coluna rectangular e a coluna quadrangular, pode concluir-se que em situação de incêndio numa direcção as tensões nas secções quadrangulares, registam um nível de tensões inferior em aproximadamente 50%.

8.6.2 Fogo em três lados

A comparação dos valores das tensões ao longo do tempo, obtidas em colunas rectangulares e quadrangulares, para a situação de fogo em três direcções, nas duas espécies de madeira em estudo, são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Tensões obtidas em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo em três direcções.

Espécie	Tempo [min]	Secção rectangular		Secção quadrangular	
		σ_{cal} [MPa]	σ_{Ansys} [MPa]	σ_{cal} [MPa]	σ_{Ansys} [MPa]
Pinheiro	15	8.56	8.82	4.04	4.00
	30	9.90	10.23	4.37	4.67
	60	13.95	13.36	5.18	5.01
Cedro vermelho	15	8.99	8.80	4.14	4.01
	30	11.06	10.25	4.60	4.74
	60	18.94	17.17	5.80	5.94

Na Figura 50 e Figura 51 encontram-se representadas graficamente as tensões apresentadas na tabela anterior para colunas de secção rectangular e quadrangular.

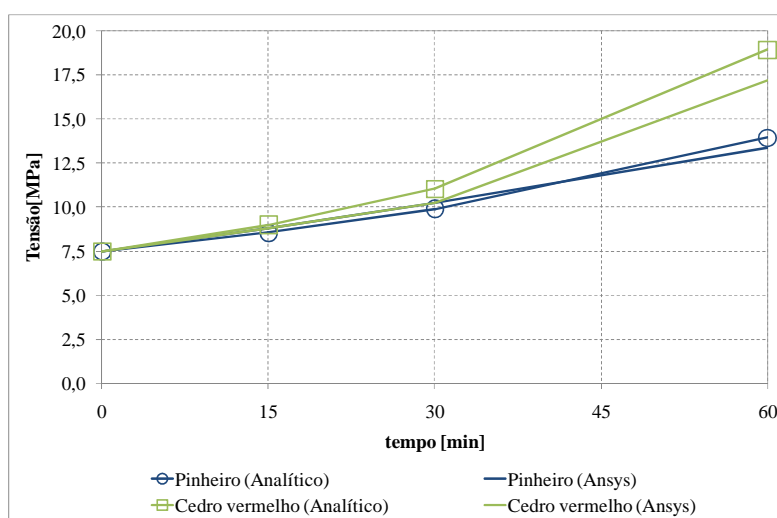


Figura 50: Evolução das tensões em colunas rectangulares com fogo em três lados.

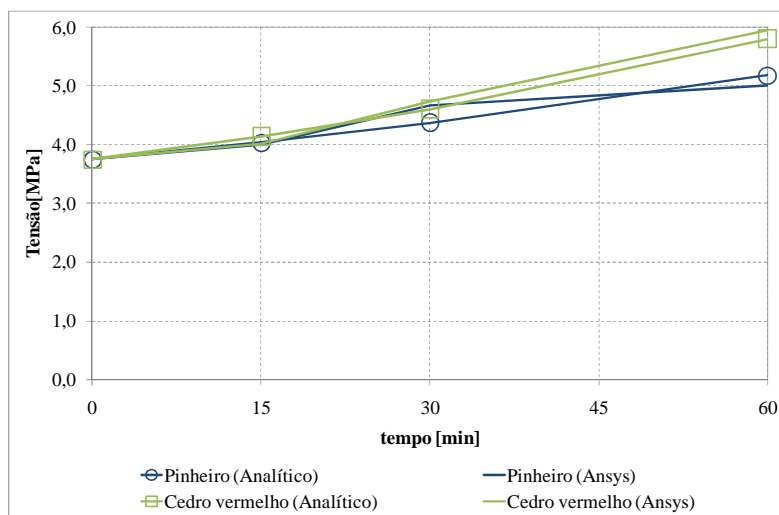


Figura 51: Evolução das tensões em colunas quadrangulares com fogo em três lados.

No capítulo 5 concluiu-se que a espessura da camada carbonizada evolui mais rapidamente no cedro vermelho do que no pinheiro. Uma vez que o nível de tensões aumenta com o aumento progressivo da temperatura, pode verificar-se na Tabela 24 e nos gráficos da Figura 50 e da Figura 51, que os valores médios da máxima tensão equivalente no núcleo, em cada instante de tempo, apresenta um valor maior para o cedro vermelho do que para o pinheiro.

Para o caso de elementos estruturais submetidos ao fogo em três direcções, continua a verificar-se que os elementos quadrangulares apresentam tensões inferiores aos elementos rectangulares.

8.6.3 Fogo em quatro lados

Na Tabela 25 encontram-se os resultados das tensões para o pinheiro e para o cedro vermelho, obtidos a partir de geometrias quadrangulares e rectangulares, submetidas ao fogo em quatro lados.

Tabela 25: Tensões obtidas em colunas rectangulares e quadrangulares submetidas ao fogo em quatro direcções.

Espécie	Tempo [min]	Secção rectangular		Secção quadrangular	
		σ_{cal} [MPa]	σ_{Ansys} [MPa]	σ_{cal} [MPa]	σ_{Ansys} [MPa]
Pinheiro	15	8.83	7.99	4.16	4.46
	30	10.57	10.22	4.63	4.55
	60	16.11	17.22	5.87	6.07
Cedro vermelho	15	9.39	9.80	4.31	4.42
	30	12.15	11.98	4.99	4.84
	60	23.64	20.50	6.98	6.92

Os gráficos da Figura 52 e Figura 53, apresentam graficamente os valores das tensões em elementos de secção rectangular e quadrangular, mostrados na Tabela 25.

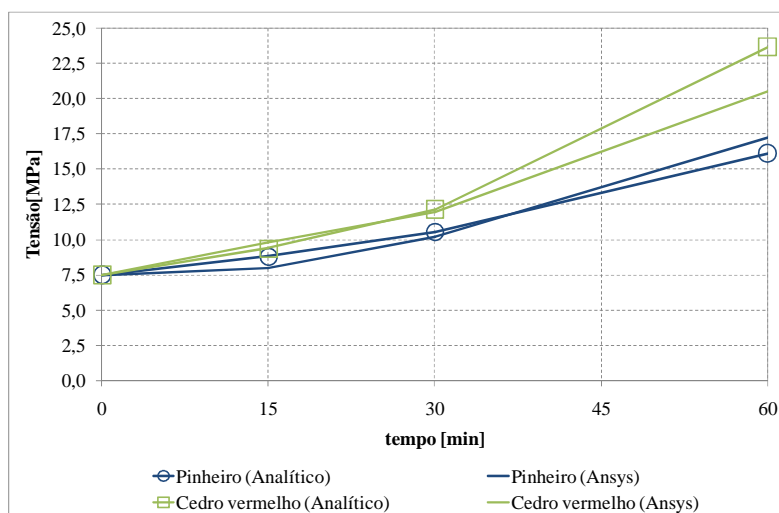


Figura 52: Evolução das tensões em colunas retangulares com fogo em quatro lados.

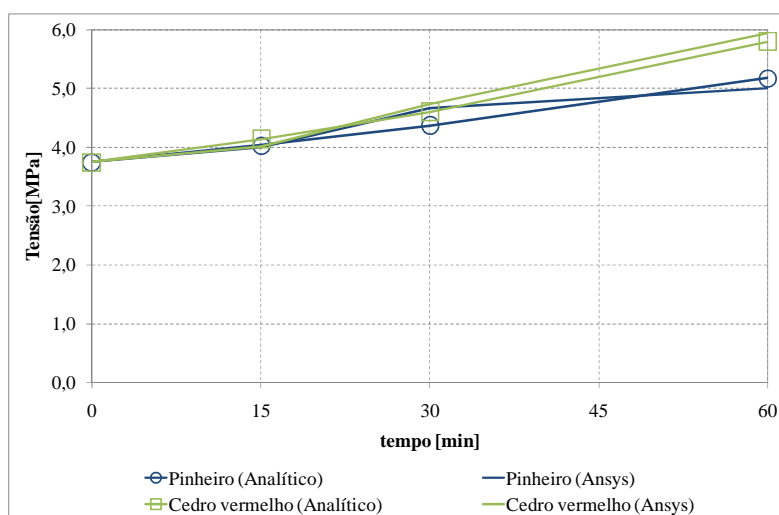


Figura 53: Evolução das tensões em colunas quadrangulares com fogo em quatro lados.

Da análise dos valores obtidos, pode verificar-se que, para o mesmo instante de tempo e para perfis com a mesma secção, o pinheiro apresenta maior resistência ao fogo do que o cedro vermelho uma vez que os valores da tensão no núcleo são inferiores, quando comparados com os do cedro vermelho.

Tal como nos cenários de incêndio descritos anteriormente, as colunas com geometria quadrangular apresentaram, para o mesmo instante de tempo, tensões inferiores às obtidas nas colunas com geometria rectangular.

Capítulo 9

Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

9 Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

Neste trabalho efectuaram-se diferentes simulações numéricas para a análise térmica de elementos de madeira sujeitos a altas temperaturas, nomeadamente as que ocorrem em situação de incêndio, permitindo o cálculo da espessura da camada carbonizada e da velocidade de carbonização.

Apresentaram-se os resultados das simulações térmicas em regime transiente não linear em diferentes situações de incêndio, para dois tipos distintos de madeira (pinheiro e cedro vermelho). Os resultados obtidos numericamente são comparados com ensaios experimentais realizados em laboratório, obtendo-se uma boa concordância nos resultados. A forma e o tamanho de uma secção de madeira são factores condicionantes da velocidade de carbonização. A velocidade de progressão do incêndio aumenta com a diminuição da área e do volume da secção de madeira, devido a uma mais fácil oxigenação da mesma.

O modelo térmico 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 sua massa específica. 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 do que a do cedro vermelho. Por outro lado, em relação ao tamanho das secções, as maiores dimensões promovem uma superfície carbonizada considerada isolante no elemento estrutural em estudo.

O teor de água existente na madeira assume grande importância uma vez que se evapora antes que o material comece a arder, pelo que, um elevado teor de humidade retarda a propagação. A água da madeira transforma-se em vapor e liberta-se quando são atingidos os 100 [°C]. Até se concluir este processo de secagem, a temperatura da madeira não aumenta.

Ao longo dos resultados obtidos, numéricos e experimentais, verificou-se sempre a existência de um núcleo frio no interior das estruturas em madeira.

Foram apresentados resultados obtidos em doze modelos computacionais tridimensionais utilizando análises térmicas e mecânicas não lineares, considerando as propriedades ortotrópicas da madeira. Foi efectuada uma comparação entre estes resultados e um modelo de cálculo simplificado baseado na taxa de carbonização calculada.

Torna-se assim possível simular o desenvolvimento de tensões devidas à ocorrência de um incêndio, de acordo com os Eurocódigos, em que as propriedades da madeira são função da temperatura, facilitando ao projectista a escolha de materiais, dimensões e procedimentos que permitam aumentar a resistência ao fogo dos elementos mecânicos, nomeadamente a utilização de materiais de protecção.

Da comparação dos resultados entre as espécies, pode verificar-se que o pinheiro apresenta valores de tensão no núcleo, inferiores ao cedro vermelho. Este facto acontece, uma vez que o cedro vermelho em condição

de incêndio, apresenta para o mesmo tempo de exposição ao fogo, uma maior profundidade de camada carbonizada em relação ao pinheiro. Sendo assim, o pinheiro apresenta nas mesmas condições de incêndio, uma maior resistência que o cedro vermelho no mesmo instante de tempo.

Pode concluir-se da comparação de todos os resultados, que as colunas quadrangulares, no caso em estudo consideradas as mais robustas, apresentam tensões no núcleo mais baixas que as colunas rectangulares, independentemente da espécie de madeira a que se refere o resultado.

O estudo do comportamento térmico e mecânico de componentes submetidos a altas temperaturas é importante na medida em que, há uma degradação das propriedades do material.

Fazendo uso de todos os conhecimentos anteriores, 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. A utilização desta capacidade, permite por exemplo, aumentar a segurança de equipas de combate a incêndio e em alguns casos, a extinção do incêndio antes da desintegração total da estrutura.

9.1 Perspectivas de trabalhos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido na presente dissertação, apresentam-se resumidamente algumas sugestões tendo como objectivo, futuros desenvolvimentos nesta área de investigação:

- Efectuar simulações numéricas noutras espécies de madeira e geometrias diferentes;
- Estudar o comportamento de madeira em secções tubulares submetidas à acção do fogo (Frangi, et al., 2008);
- Incrementar os ensaios experimentais e variar as faces de exposição a altas temperaturas;
- Realizar ensaios em provetes de madeira, com objectivo de caracterizar as propriedades mecânicas da espécie de madeira a utilizar (Xavier, et al., 2004);
- Realizar ensaios em forno de resistência de altas temperaturas, com objectivo de simular a curva de incêndio padrão em diferentes espécies de madeira;
- Determinação da carga crítica em colunas de madeira, sob influência de carregamento térmico e mecânico, para vários índices de esbelteza;
- Verificar a influência de ligações metálicas em estruturas de madeira, quando submetidas a altas temperaturas.

10 Bibliografia

Alía, R., et al. *Regiones de procedencia Pinus pinaster Aiton.* Madrid : Ministerio de Medio Ambiente, Organismo Autónomo Parques Nacionales, 1996.

Barreira, L. B. e Fonseca, E. F. *Cálculo da espessura carbonizada em estruturas de madeira quando submetidas à acção do fogo.* Aveiro : II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Flúidos e Termodinâmica, 2008.

Barreira, Luisa e Fonseca, Elza. *Wood under fire conditions.* Bragança : Meeting between University of Cantabria and Polytechnic Institute of Bragança, 2008.

Bautista, Leonardo Erik Cháves. *Influência de tensões de origem térmica em problemas de estabilidade de blocos rochosos.* Rio de Janeiro: Dissertação apresentada à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, 2007.

Duarte, António. *Resistência ao fogo da madeira e de derivados de madeira.* Leiria : Instituto Politécnico de Leiria, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, 2005.

EN1991-1-2. *Eurocode 1: Actions in Structures, Part 1-2: General Actions-Actions on structures exposed to fire.* Brussels : CEN, 2002.

EN1995-1-2. *Eurocode 5: Design of timber structures, Part1-2: General-Structural fire desing .* Brussels : CEN, 2004.

Esteves, Bruno M. *Influência do Cerne na Composição Química e na Deslenhificação para a produção de pastas Kraft no pinheiro (Pinus pinaster Ait.).* Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Materiais Lenhocelulósicos no Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa, 2001.

Fernandes, Paulo Alexandre Martins. *Desenvolvimento de relações preditivas para uso no planeamento de fogo controlado em povoamentos de Pinus pinaster ait.* Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Ciências Agrárias, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2002.

Fonseca, E. M. M. *Modelação numérica do comportamento termo-mecânico de perfis metálicos sujeitos à acção do fogo.* Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica à Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto, 1998.

Fonseca, Elza e Barreira, Luísa. *Charring Rate Determination of Wood Pine Profiles Submitted to High Temperatures (accepted).* Italy : Third International Conference on Safety and Security Engineering: C.A. Brebbia et al, 2009.

Fonseca, Elza M. M. *Análise por elementos finitos do comportamento de tubagens sob a acção de fortes gradientes térmicos.* Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica. FEUP, 2003.

Frangi, Andrea, Knobloch, Markus e Fontana, Mario. *Fire design of timber slabs made of hollow core elements.* Zurich, Switzerland : Elsevier Ltd., 2008.

Garrido, Nuno M. 2004. *Identificação do comportamento ao corte da madeira, através do ensaio de tracção fora dos eixos de simetria material.* Vila Real, 2004.

Guerra, António Matos, Coelho, José Augusto e Leitão, Ruben Elvas. *Fenomenologia da combustão e extintores - Manual de Formação Inicial do Bombeiro.* Sintra : Escola Nacional de Bombeiros, 2003. ISBN: 972-8792-01-8.

Henriques, Maria Dulca Franco. *Sistemas estruturais em madeira lamelada colada.* Lisboa : Conferência Científica e Tecnológica em Engenharia, 6 a 10 de Maio , 2002.

Holman, J. P. *Heat Transfer* : McGraw-Hill, 1997. ISBN: 0-07-114320-3.

Incropera, Frank, P. e DeWitt e David, P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa.* 4ª Edição. Rio de Janeiro : LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1998. ISBN: 85-216-1146-3.

IST. *Materiais de Construção I - Documento de apoio nº2 - Madeiras e Cortiças.* Lisboa : Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico, 1991.

Kaefler, Elka Cohen e Silva, Valdir Pignatta. *Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocode 1.* São Paulo, 2006.

Kurian, Anil. *Analytical Modeling of Glued Laminated Girded Bridges Using Ansys.* Ames, Iowa, 2000.

Lewin, M. e Goldstein, I.S. *Wood structure and composition.* Fiber Science and Technology Series, 1991. Vol. 11.

Moreschi, João Carlos. *Propriedades Tecnológicas da Madeira.* Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 1978.

Moura, Edna. *Determinação de um modelo da taxa de carbonização transversal do grão para o Eucalyptus.* São Paulo : Dissertação para obtenção do grau de Doutor., 2005.

Özisik, M. Necati. *Transferência de calor - Um texto básico.* 8ª Edição. Rio de Janeiro : Editora Guanabara Koogan S.A., 1990. ISBN: 85-277-0160-X.

Pfeil, Walter e Pfeil, Michèle. *Estruturas de Madeira.* 6ª Edição. Rio de Janeiro : LTC Editors, 2003. ISBN: 85-216-1385-7.

Pinto, Edna Moura e Calil, C. *Estudo da taxa de carbonização da madeira e sua relação com a resistência de peças estruturais.* Mato Grosso : Universidade Federal de Mato Grosso, Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2004.

Rowell, Roger M. *Handbook of wood chemistry and wood composites.* Taylor & Francis, 2005.

Twomey, Brian. *The performance and behavior of lightweight wood exposed to fire conditions.* Worcester : Thesis for degree of Master in Science, 2007.

Vila Real, P. M. M. *Modelação por elementos finitos da solidificação e comportamento termo-mecânico de peças vazadas em moldações metálicas.* Dissertação apresentada para obtenção de grau de Doutor em Engenharia Mecânica à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1988.

Vila Real, Paulo. *Incêndio em Estruturas Metálicas.* Orion, 2003. ISBN: 972-8620-04-7.

Washington, Braga Filho. *Transmissão de Calor.* São Paulo : Thomson, 2004. 85-221-0374-7.

White, Robert H. e Dietenberger, Mark A. *Wood Handbook - Wood as an engineering material.* USA - USDA Forest Service : Forest Products Laboratory, 1999.

Winandy, Jerrold E. *Wood properties.* Orlando : Charles Junior ed., 1994. Vol. 4. Academic Press: 549-561.

Xavier, J.C., et al. *A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait.* Elsevier Ltd., 2004.

Xavier, José Manuel Cardoso. *Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio Iosipescu.* Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para obtenção do grau de Mestre, 2003.

Zienkiewicz, O.C. e Taylor, R.L. *The finite element method.* 4th Ed. U.K. : McGraw-Hill, 1989.

Anexos

Código Ansys

Anexos – Código Ansys

A1 - Propriedades térmicas do cedro vermelho

MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.120000E+03, 0.200000E+03, 0.250000E+03
MPTEMP, 6, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03, 0.600000E+03, 0.800000E+03
MPTEMP, 11, 0.120000E+04,
MPDATA,DENS, 1, 1, 0.337900E+03, 0.337900E+03, 0.310000E+03, 0.310000E+03, 0.288300E+03
MPDATA,DENS, 1, 6, 0.235600E+03, 0.161200E+03, 0.117800E+03, 0.868000E+02, 0.806000E+02
MPDATA,DENS, 1, 11, 0.100000E+01,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.200000E+03, 0.350000E+03, 0.500000E+03, 0.800000E+03
MPTEMP, 6, 0.120000E+04,
MPDATA,KXX, 1, 1, 0.120000E+00, 0.150000E+00, 0.700000E-01, 0.900000E-01, 0.350000E+00
MPDATA,KXX, 1, 6, 0.150000E+01,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.120000E+03, 0.200000E+03, 0.250000E+03
MPTEMP, 6, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03, 0.600000E+03, 0.800000E+03
MPTEMP, 11, 0.120000E+04,
MPDATA,C, 1, 1, 0.153000E+04, 0.177000E+04, 0.212000E+04, 0.200000E+04, 0.162000E+04
MPDATA,C, 1, 6, 0.710000E+03, 0.850000E+03, 0.100000E+04, 0.140000E+04, 0.165000E+04
MPDATA,C, 1, 11, 0.165000E+04,

A2 - Propriedades térmicas do pinheiro

MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.120000E+03, 0.200000E+03, 0.250000E+03
MPTEMP, 6, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03, 0.600000E+03, 0.800000E+03
MPTEMP, 11, 0.120000E+04,
MPDATA,DENS, 1, 1, 0.554810E+03, 0.554810E+03, 0.509000E+03, 0.509000E+03, 0.473370E+03
MPDATA,DENS, 1, 6, 0.386840E+03, 0.264680E+03, 0.193420E+03, 0.142520E+03, 0.132340E+03
MPDATA,DENS, 1, 11, 0.100000E+01,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.200000E+03, 0.350000E+03, 0.500000E+03, 0.800000E+03
MPTEMP, 6, 0.120000E+04,
MPDATA,KXX, 1, 1, 0.120000E+00, 0.150000E+00, 0.700000E-01, 0.900000E-01, 0.350000E+00
MPDATA,KXX, 1, 6, 0.150000E+01,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.120000E+03, 0.200000E+03, 0.250000E+03
MPTEMP, 6, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03, 0.600000E+03, 0.800000E+03
MPTEMP, 11, 0.120000E+04,
MPDATA,C, 1, 1, 0.153000E+04, 0.177000E+04, 0.212000E+04, 0.200000E+04, 0.162000E+04
MPDATA,C, 1, 6, 0.710000E+03, 0.850000E+03, 0.100000E+04, 0.140000E+04, 0.165000E+04
MPDATA,C, 1, 11, 0.165000E+04,

A3 - Propriedades mecânicas do cedro vermelho

MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.950000E+03,
MPDATA,EX, 1, 1, 0.770000E+10, 0.269500E+10, 0.770000E+08, 0.770000E+08,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.950000E+03,
MPDATA,EY, 1, 1, 0.423500E+09, 0.148230E+09, 0.424000E+07, 0.424000E+07,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.950000E+03,
MPDATA,EZ, 1, 1, 0.623700E+09, 0.218300E+09, 0.624000E+07, 0.624000E+07,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.950000E+03,
MPDATA,NUXY, 1, 1, 0.162800E-01, 0.162805E-01, 0.162992E-01, 0.162992E-01,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.950000E+03,
MPDATA,NUYZ, 1, 1, 0.712800E+00, 0.712792E+00, 0.712301E+00, 0.712301E+00,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.950000E+03,
MPDATA,NUXZ, 1, 1, 0.306180E-01, 0.306187E-01, 0.306327E-01, 0.306327E-01,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.950000E+03,

MPDATA,GXY , 1, 1, 0.6622000E+09, 0.2317700E+09, 0.6620000E+07, 0.6620000E+07,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,GYZ , 1, 1, 0.3850000E+08, 0.1348000E+08, 0.3900000E+06, 0.3900000E+06,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,GXZ , 1, 1, 0.6699000E+09, 0.2434700E+09, 0.6700000E+07, 0.6700000E+07,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,
 MPDATA,ALPX, 1, 1, 0.3000000E-05,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,
 MPDATA,ALPY, 1, 1, 0.3000000E-05,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,
 MPDATA,ALPZ, 1, 1, 0.3000000E-05,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,PRXY, 1, 1, 0.2960000E+00, 0.2960000E+00, 0.2960000E+00, 0.2960000E+00,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,PRYZ, 1, 1, 0.4840000E+00, 0.4840000E+00, 0.4840000E+00, 0.4840000E+00,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,PRXZ, 1, 1, 0.3780000E+00, 0.3780000E+00, 0.3780000E+00, 0.3780000E+00,

A4 - Propriedades mecânicas do pinheiro

MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,EX , 1, 1, 0.1010000E+11, 0.3535000E+10, 0.1010000E+09, 0.1010000E+09,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,EY , 1, 1, 0.3838000E+09, 0.1343300E+09, 0.5560000E+07, 0.5560000E+07,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,EZ , 1, 1, 0.7878000E+09, 0.2757300E+09, 0.8180000E+07, 0.8180000E+07,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,NUXY, 1, 1, 0.1307200E-01, 0.1307200E-01, 0.1893703E-01, 0.1893703E-01,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,NUYZ, 1, 1, 0.8415789E+00, 0.8415789E+00, 0.6032014E+00, 0.6032014E+00,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,NUXZ, 1, 1, 0.2566200E-01, 0.2566200E-01, 0.2664574E-01, 0.2664574E-01,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,GXY , 1, 1, 0.4848000E+09, 0.1696800E+09, 0.8690000E+07, 0.8690000E+07,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,GYZ , 1, 1, 0.5050000E+08, 0.1768000E+08, 0.5100000E+06, 0.5100000E+06,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
 MPDATA,GXZ , 1, 1, 0.5252000E+09, 0.1838200E+09, 0.8790000E+07, 0.8790000E+07,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,
 MPDATA,ALPX, 1, 1, 0.3000000E-05,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,
 MPDATA,ALPY, 1, 1, 0.3000000E-05,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,
 MPDATA,ALPZ, 1, 1, 0.3000000E-05,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.9900000E+02, 0.1200000E+03, 0.2000000E+03, 0.2500000E+03
 MPTEMP, 6, 0.3000000E+03, 0.3500000E+03, 0.4000000E+03, 0.6000000E+03, 0.8000000E+03
 MPTEMP, 11, 0.1200000E+04,
 MPDATA,DENS, 1, 1, 0.5548100E+03, 0.5548100E+03, 0.5090000E+03, 0.5090000E+03, 0.4733700E+03
 MPDATA,DENS, 1, 6, 0.3868400E+03, 0.2646800E+03, 0.1934200E+03, 0.1425200E+03, 0.1323400E+03
 MPDATA,DENS, 1, 11, 0.1000000E+01,
 MPTEMP
 MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.2000000E+03, 0.3500000E+03, 0.5000000E+03, 0.8000000E+03
 MPTEMP, 6, 0.1200000E+04,

```

MPDATA,KXX , 1, 1, 0.1200000E+00, 0.1500000E+00, 0.7000000E-01, 0.9000000E-01, 0.3500000E+00
MPDATA,KXX , 1, 6, 0.1500000E+01,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.9900000E+02, 0.1200000E+03, 0.2000000E+03, 0.2500000E+03
MPTEMP, 6, 0.3000000E+03, 0.3500000E+03, 0.4000000E+03, 0.6000000E+03, 0.8000000E+03
MPTEMP, 11, 0.1200000E+04,
MPDATA,C , 1, 1, 0.1530000E+04, 0.1770000E+04, 0.2120000E+04, 0.2000000E+04, 0.1620000E+04
MPDATA,C , 1, 6, 0.7100000E+03, 0.8500000E+03, 0.1000000E+04, 0.1400000E+04, 0.1650000E+04
MPDATA,C , 1, 11, 0.1650000E+04,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
MPDATA,PRXY, 1, 1, 0.3440000E+00, 0.3440000E+00, 0.3440000E+00, 0.3440000E+00,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
MPDATA,PRYZ, 1, 1, 0.4100000E+00, 0.4100000E+00, 0.4100000E+00, 0.4100000E+00,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.9500000E+03,
MPDATA,PRXZ, 1, 1, 0.3290000E+00, 0.3290000E+00, 0.3290000E+00, 0.3290000E+00,

```

A5 - Modelo térmico (perfil rectangular com fogo numa direcção)

```

/BATCH
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/RELOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/RELOT,RESIZE
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Thermal
!*
/PREP7
!*
ET,1,PLANE77
!*
MPREAD,'propriedades-termicas','mp',''
K,1,,,,
K,2,0.2,,
K,3,0.2,0.4,,
K,4,0.4,,
K,5,0.2,0.08,,
K,6,0,0.08,,
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 5
LSTR, 5, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 6
LSTR, 6, 1
LSTR, 6, 5
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,7
FITEM,2,6

```

```

AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,7
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
AL,P51X
SAVE
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,1
FITEM,5,4
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,20, , , , ,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
FITEM,5,5
FITEM,5,-6
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,15, , , , ,1
!*
MSHKEY,0
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
CM,_Y,AREA
ASEL,, ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
STEF,0.567E-07
TOFFST,273.15
RADOPT,0.10000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.10000000149,0.10000000149
SPCNOD,1,7000
!*
STEF,0.567E-07
TOFFST,273.15
RADOPT,0.10000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.10000000149,0.10000000149
SPCNOD,1,7000
!*
N,7000,0.1,-0.1,,,,
*DIM,iso,TABLE,19,1,1, , ,
!*
*SET,ISO(0,1,1) , 0
*SET,ISO(1,0,1) , 0
*SET,ISO(1,1,1) , 20
*SET,ISO(2,0,1) , 60
*SET,ISO(2,1,1) , 349.21
*SET,ISO(3,0,1) , 180
*SET,ISO(3,1,1) , 502.29
*SET,ISO(4,0,1) , 360
*SET,ISO(4,1,1) , 603.12
*SET,ISO(5,0,1) , 540
*SET,ISO(5,1,1) , 662.85
*SET,ISO(6,0,1) , 780
*SET,ISO(6,1,1) , 717.31
*SET,ISO(7,0,1) , 1260
*SET,ISO(7,1,1) , 788.62
*SET,ISO(8,0,1) , 1740

```

```

*SET,ISO(8,1,1) , 836.74
*SET,ISO(9,0,1) , 2460
*SET,ISO(9,1,1) , 888.43
*SET,ISO(10,0,1) , 4500
*SET,ISO(10,1,1) , 978.71
*SET,ISO(11,0,1) , 5700
*SET,ISO(11,1,1) , 1014.08
*SET,ISO(12,0,1) , 10020
*SET,ISO(12,1,1) , 1098.52
*SET,ISO(13,0,1) , 14700
*SET,ISO(13,1,1) , 1155.9
*SET,ISO(14,0,1) , 17100
*SET,ISO(14,1,1) , 1178.55
*SET,ISO(15,0,1) , 20460
*SET,ISO(15,1,1) , 1205.42
*SET,ISO(16,0,1) , 25200
*SET,ISO(16,1,1) , 1236.63
*SET,ISO(17,0,1) , 31200
*SET,ISO(17,1,1) , 1263.35
*SET,ISO(18,0,1) , 33000
*SET,ISO(18,1,1) , 1277.03
*SET,ISO(19,0,1) , 36000
*SET,ISO(19,1,1) , 1290.06
!*
TUNIF,20,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,7000
!*
!*
/GO
D,P51X, , %ISO% , , ,TEMP, , , ,
GPLOT
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
/GO
!*
!*
SFL,P51X,CONV,25, , %ISO%
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
SFL,P51X,RDSF,0.8, ,1,
FINISH
/SOL
!*
CNVTOL,TEMP, ,0.1,0, ,
!*
ANTYPE,4
NLGEOM,1
DELTIM,60,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,0
NCNV,2,0,0,0,0
RESCONTRL,DEFINE,ALL,ALL,1
TIME,3600
/STATUS,SOLU
SOLVE

```

A6 - Modelo termo-mecânico (coluna rectangular com fogo numa direcção)

```

RESUME
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
/COM, Thermal
!*
/PREP7
ETCHG,TTS
!*
ETDEL,1
!*
MPREAD,'propriedades-mecanicas',' ','..'
!*

```

```

TB,MISO,1,4,2,0
TBTEMP,20
TBPT,,0.003435644,34.7e6
TBPT,,0.005,36e6
TBTEMP,100
TBPT,,0.002454031,8.675e6
TBPT,,0.004,9.5e6
TBTEMP,300
TBPT,,0.003435644,0.347e6
TBPT,,0.005,0.36e6
TBTEMP,950
TBPT,,0.003435644,0.347e6
TBPT,,0.005,0.36e6
K,1,,,
K,2,,,0.2,
K,3,,0.4,0.2,
K,4,,0.4,0,
/VIEW,1,1,2,3
/ANG,1
/REP,FAST
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 1
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
AL,P51X
!*
VOFFST,1,1, ,
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,9
FITEM,5,-12
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,20, , , , ,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,3
FITEM,5,5
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,8, , , , ,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,4
FITEM,5,6
FITEM,5,8
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,16, , , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

```

```

!*
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
/UL,MESH,OFF
N,7000,-0.50,-0.4,0.1,,,
!*
ANTYPE,4
!*
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
!*
STEF,0.567E-07
TOFFST,273.15
RADOPT,0.1000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.1000000149,0.1000000149
SPCNOD,1,7000
!*
/VIEW,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
FLST,2,153,1,ORDE,2
FITEM,2,7001
FITEM,2,-7153
!*
/GO
D,P51X, , , , ,ALL, , , ,
FLST,2,3214,1,ORDE,2
FITEM,2,7000
FITEM,2,-10213
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,7000
DDELE,P51X,ALL
/REP,FAST
FLST,2,15,1,ORDE,6
FITEM,2,7237
FITEM,2,-7241
FITEM,2,7252
FITEM,2,-7256
FITEM,2,7267
FITEM,2,-7271
!*
/GO
F,P51X,FX,40000
LDREAD,TEMP,,720, , , 'file','rth', ' '
FINISH
/SOL
!*
CNVTOL,,-1,6
CNVTOL,F, ,0.8,2, ,
!*
ANTYPE,4
NLGEOM,0
DELTIM,5,0,0
TIME,20
/STATUS,SOLU
SOLVE

```