

# **Modelo Computacional para Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas em Madeira**

**Diana Carina Silva Coelho**

Relatório final de Dissertação apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

Orientadora:  
**Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca**

**Novembro de 2011**



Dedico este trabalho à minha querida Albina Jesus Vieira.

## **Agradecimentos**

Aproveito este espaço para agradecer às várias pessoas que tiveram um papel fulcral na realização deste trabalho, porque sem elas o resultado certamente não seria o mesmo.

Em primeiro lugar, deixo o meu agradecimento sincero à minha orientadora Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca, por todo o tempo disponibilizado, pelo encorajamento e compreensão nos momentos em que mais necessitei e por todo o empenho e dedicação que mostrou ao longo de todo este trabalho, tendo sempre uma resposta e uma solução para todas as minhas dúvidas e questões.

Ao Professor Paulo Piloto, pelos primeiros ensinamentos sobre o método de elementos finitos, utilizando o programa de cálculo que está por base neste trabalho, uma vez que esta transmissão de conhecimentos foi muito útil.

À família Rapazote, pela disponibilidade, acolhimento, amizade e ternura que me demonstram ao longo destes anos. E por tudo o que têm feito por mim, tratando-me como uma filha.

À minha família, por todo o amor, carinho, motivação e apoio que me deram em todos os momentos da minha vida.

# ***Modelo Computacional para Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas em Madeira***

por:

**DIANA CARINA SILVA COELHO**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

**Engenharia da Construção**

Realizada sob a supervisão de:

**Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca**

## **Resumo**

Este trabalho tem como objectivo avaliar estruturalmente duas espécies de madeira, calculando a sua resistência ao fogo para diferentes cenários de incêndio, através da redução da sua secção. Utilizando o método de elementos finitos, com recurso ao programa de cálculo Ansys®, é desenvolvido um modelo computacional térmico que permite o cálculo da camada e da velocidade de carbonização. O cálculo do perfil de temperaturas para as diferentes secções em estudo, é obtido em regime transiente, considerando as propriedades térmicas não lineares do material, obedecendo ao (EN1995-1-2, 2003).

Com base ainda no programa Ansys® é efectuada uma análise numérica estrutural em vigas, solicitadas por uma carga mecânica e sob influência da redução da secção recta, função do efeito térmico, para a determinação dos estados de tensão. A resistência mecânica é obtida, considerando as propriedades mecânicas ortotrópicas da madeira e função da temperatura. Com base em equações analíticas propostas para projecto, é efectuada uma comparação com os resultados numéricos.

Outro objectivo é identificar a capacidade de carga última em vigas de madeira, função da imposição de um carregamento mecânico em simultâneo com uma acção térmica, de forma a prever futuras considerações nas opções de projecto.

A grande finalidade deste estudo é contribuir com regras práticas de projecto, através da apresentação de gráficos de resistência ao fogo e de uma metodologia de cálculo simplificada, para a determinação do campo de tensões e da capacidade de resistente em vigas de madeira, submetidas a acções térmicas e mecânicas.

***Palavras chave:*** Madeira, Fogo, Elementos Finitos

# ***Computational Model for Thermal and Mechanical Assessment of Timber Structures***

by:

**DIANA CARINA SILVA COELHO**

Dissertation for attainment Master's degree of:

**Construction Engineering**

Supervised by:

**Prof. Doutora Elza Maria Morais Fonseca**

## **Abstract**

The main objective of this work is to assess the structural performance of two different timber specimens, calculating the fire resistance due different fire scenarios, through timber cross-section reduction. Using the finite element method, with Ansys® program, a computational model is developed which allows the timber charcoal thickness and the charring rate determination. The temperature evolution, in all studied timber cross-sections, is obtained using a transient thermal analysis, including the non-linear thermal properties, according (EN1995-1-2, 2003).

To characterize the stress state in beam components a structural numerical analysis will be conducted with Ansys® program, where all beams are submitted to a mechanical load and with the cross-section reduction influence due thermal effect. The mechanical strength is obtained, considering the orthotropic mechanical properties of wood material, dependent of the temperature. Based on proposed analytical design equations, a comparison with numerical results will be obtained.

Another objective of this work is to identify the ultimate load capacity in wooden beams, function of mechanical loading condition in simultaneous with thermal effect, in prevention to future design options.

The greater purpose of this study is to contribute with design practical rules, through fire resistance charts and a simplified calculation methodology, for stresses and ultimate load capacity calculation in wooden beams submitted to thermal and mechanical loading conditions.

***Keywords:*** Timber, Fire, Finite Elements

# Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>2</b>
1.1 Objectivos.....	2
1.2 Apresentação sumária dos capítulos.....	3
<b>2. Estrutura da Madeira .....</b>	<b>8</b>
2.1 Classificação botânica .....	8
2.2 Fisiologia da madeira.....	8
2.3 Estrutura fibrosa do lenho.....	11
2.3.1 Estrutura fibrosa do lenho de uma resinosa .....	11
2.3.2 Estrutura fibrosa do lenho de uma folhosa.....	13
2.3.3 Estrutura da parede celular .....	14
2.4 Composição química .....	15
2.4.1 Substâncias macromoleculares.....	16
2.5 Classificação da madeira .....	16
2.5.1 Classes de qualidade.....	17
2.5.2 Classificação visual .....	18
2.5.3 Classificação mecânica .....	21
2.6 Classes de resistência.....	22
2.7 Relação entre classes de qualidade e resistência .....	23
2.8 Espécies de madeira em estudo .....	24
2.8.1 Propriedades físicas.....	25
<b>3. Transferência de Calor .....</b>	<b>30</b>
3.1 Fenómenos de transferência de calor.....	30
3.1.1 Condução de calor.....	31
3.1.2 Convecção de calor .....	33
3.1.3 Radiação de calor .....	34
3.1.4 Transferência de calor por radiação e convecção.....	35

3.2	Curva de incêndio natural.....	36
3.3	Curvas de incêndio normalizadas .....	37
3.3.1	Curva de incêndio padrão ISO834 .....	37
3.3.2	Curva de incêndio para elementos exteriores.....	38
3.3.3	Curva de incêndio de hidrocarbonetos .....	38
3.4	Método dos elementos finitos aplicado à equação do calor .....	39
<b>4.</b>	<b>Comportamento Térmico da Madeira .....</b>	<b>44</b>
4.1	Pirólise.....	44
4.2	Camada de carbonização da madeira.....	45
4.3	Camada de carbonização efectiva.....	46
4.4	Propriedades térmicas.....	47
4.4.1	Condutividade térmica .....	47
4.4.2	Calor específico.....	48
4.4.3	Massa específica.....	49
<b>5.</b>	<b>Modelo Computacional para Avaliação Térmica .....</b>	<b>52</b>
5.1	Casquinha branca.....	53
5.1.1	Secção exposta a incêndio a 4 lados.....	53
5.1.2	Secção exposta a incêndio a 3 lados.....	57
5.2	Casquinha vermelha .....	60
5.2.1	Secção exposta a incêndio a 4 lados.....	60
5.2.2	Secção exposta a incêndio a 3 lados.....	63
5.3	Comparação da velocidade média de carbonização .....	65
<b>6.</b>	<b>Comportamento Mecânico da Madeira .....</b>	<b>68</b>
6.1	A madeira como material ortotrópico.....	68
6.2	Propriedades mecânicas.....	69
6.2.1	Propriedades de rigidez .....	70
6.2.2	Coefficiente de Poisson .....	73

6.2.3	Propriedades de resistência .....	73
6.2.4	Coeficiente de expansão térmica.....	74
<b>7.</b>	<b>Modelo Computacional para Avaliação Mecânica .....</b>	<b>76</b>
7.1	Modelo numérico termo-mecânico.....	76
7.1.1	Casquinha branca .....	77
7.1.2	Casquinha vermelha .....	85
7.2	Proposta de equações analíticas de projecto.....	92
7.3	Comparação dos resultados numéricos e analíticos. ....	93
<b>8.</b>	<b>Avaliação da Capacidade Resistente .....</b>	<b>96</b>
8.1	Casquinha branca.....	97
8.2	Casquinha vermelha .....	101
8.3	Equações analíticas de projecto e comparação dos resultados.....	106
<b>9.</b>	<b>Programa de Cálculo .....</b>	<b>110</b>
9.1	Introdução.....	110
9.2	Linguagem utilizada .....	110
9.3	Formulação matemática.....	111
9.4	Cálculo de tensões .....	113
9.5	Fluxograma do programa.....	114
9.6	Comparação dos resultados através do método numérico, analítico e do programa de cálculo .....	117
9.7	Conclusão .....	119
<b>10.</b>	<b>Conclusões e Futuros Desenvolvimentos.....</b>	<b>122</b>
10.1	Futuros desenvolvimentos .....	123
<b>11.</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>125</b>
<b>12.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>1</b>



## Índice de Figuras

Figura 1 – Corte transversal do caule de uma árvore. ....	9
Figura 2 - Eixos principais (LNEC). ....	10
Figura 3 - Estrutura do lenho de uma resinosa (Coutinho, 1999). ....	12
Figura 4 - Estrutura do lenho de uma folhosa (Coutinho, 1999). ....	13
Figura 5 – Modelo da estrutura celular, (Coutinho, 1999). ....	15
Figura 6 – Modos de transferência de calor: Condução, Convecção e Radiação. ....	31
Figura 7 - Condução de calor no estado estacionário. ....	31
Figura 8 – Curva de incêndio natural (Pinto, 2005). ....	37
Figura 9 - Curvas normalizadas de incêndio EC1. ....	38
Figura 10 – Condições de fronteira em problemas térmicos no domínio $\Omega$ (Fonseca, 1998). ..	39
Figura 11 - Zonas de degradação numa secção de madeira (Barreira, 2008). ....	44
Figura 12 – secção reduzida (EN 1995-1-2, 2003). ....	46
Figura 13 - Condutividade térmica em função da temperatura. ....	48
Figura 14 - Calor específico em função da temperatura. ....	49
Figura 15 - Gráfico da massa específica associada a cada uma das espécies. ....	50
Figura 16 – Cenários de exposição ao fogo. ....	52
Figura 17 – Malha de elementos finitos para a casquinha branca, secção 3. ....	52
Figura 18 – Malha de elementos finitos para a casquinha vermelha, secção 5. ....	53
Figura 19 - Área resistente para fogo a 4 lados com equação de área resultante. ....	56
Figura 20 - Área resistente para fogo a 3 lados com equação de área resultante. ....	59
Figura 21 - Área resistente para fogo a 4 lados com equação de área resultante. ....	62
Figura 22 - Área resistente para fogo a 3 lados com equação de área resultante. ....	65
Figura 23 – Eixos respeitantes à direcção do grão e anéis de crescimento, (Barreira, 2008). ..	68
Figura 24 – Representação dos módulos de elasticidade. ....	72
Figura 25 - Representação dos módulos de corte. ....	72
Figura 26 - Tensão/Deformação para as várias temperaturas. ....	74
Figura 27 – Viga simplesmente apoiada. ....	76
Figura 28 – Esquema do perfil da viga sujeita à carga mecânica e à carga térmica. ....	77
Figura 29 – Malha de elementos finitos para a casquinha branca e para a casquinha vermelha. .....	77
Figura 30 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 2. ....	81
Figura 31 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3. ....	81

Figura 32 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 2.....	84
Figura 33 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3.....	84
Figura 34 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3.....	88
Figura 35 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 5.....	88
Figura 36 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3.....	91
Figura 37 – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 5.....	91
Figura 38 – Curvas de pressão. ....	96
Figura 39 – Carga máxima para fogo a 3 lados.....	98
Figura 40 – Carga máxima para fogo a 4 lados.....	98
Figura 41 – Diagrama de tensões para a secção 2 com exposição ao fogo de 3 lados.....	99
Figura 42 – Diagrama de tensões para a secção 2 com exposição ao fogo de 4 lados.....	100
Figura 43 – Diagrama de tensões para a secção 3 com exposição ao fogo de 3 lados.....	100
Figura 44 – Diagrama de tensões para a secção 3 com exposição ao fogo de 4 lados.....	101
Figura 45 – Carga máxima para fogo a 3 lados.....	103
Figura 46 – Carga máxima para fogo a 4 lados.....	103
Figura 47 – Diagrama de tensões para a secção 2 com exposição ao fogo de 3 lados.....	104
Figura 48 – Diagrama de tensões para a secção 2 com exposição ao fogo de 4 lados.....	104
Figura 49 – Diagrama de tensões para a secção 3 com exposição ao fogo de 3 lados.....	105
Figura 50 – Diagrama de tensões para a secção 3 com exposição ao fogo de 4 lados.....	105
Figura 51 - Estudo de viga simplesmente apoiada submetida a cargas concentradas e/ou distribuídas. ....	111
Figura 52 – Diagrama para cálculo de reacções.....	112
Figura 53 – Divisão de um carregamento distribuído em $n$ cargas concentradas. ....	112
Figura 54 – Diagrama de corpo livre para a primeira situação de carregamento.....	51
Figura 55 – Diagrama de corpo livre para a segunda situação de carregamento.....	52
Figura 56 - Diagrama de corpo livre para a terceira situação de carregamento.....	53

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comprimento máximo das fendas num elemento de madeira <sup>b</sup> (EN 14081-1,2005). .....	19
Tabela 2 – Empeno máximo [mm], para comprimentos superiores a 2m <sup>b</sup> (EN 14081-1,2005). .....	20
Tabela 3 – Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (NP EN 1912,2003)..	23
Tabela 4 – Características da casquinha branca e da casquinha vermelha.....	24
Tabela 5 – Dimensões escolhidas para estudo. ....	25
Tabela 6 – Valores de retractibilidade.....	26
Tabela 7 – Valores da massa volúmica. ....	27
Tabela 8 – Valores para a taxa de carbonização $\beta_0$ , EC5.....	46
Tabela 9 - Valores para $k_0$ , Ec5.....	47
Tabela 10 – Condutividade térmica da madeira, EC5.....	47
Tabela 11 – Calor específico EC5.....	48
Tabela 12 - Taxa de densidade em função da temperatura EC5. ....	50
Tabela 13 – Espessura de carbonização para a casquinha branca secção 3 [mm], (fogo a 4 lados). ....	54
Tabela 14 – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha branca, (fogo a 4 lados). ....	55
Tabela 15 – Resultados obtidos para cada secção em estudo de casquinha branca, (fogo 4 lados). ....	56
Tabela 16 – Espessura de carbonização para a casquinha branca secção 3 [mm], (fogo a 3 lados). ....	57
Tabela 17 – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha branca, (fogo a 3 lados). ....	58
Tabela 18 – Resultados obtidos para cada secção em estudo de casquinha branca (fogo a 3 lados). ....	59
Tabela 19 – Espessura de carbonização para a casquinha vermelha secção 5 [mm], (fogo a 4 lados). ....	60
Tabela 20 – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha vermelha, (fogo 4 lados). ....	61
Tabela 21 – Resultados obtidos para cada secção em estudo de casquinha vermelha, (fogo 4 lados). ....	62

Tabela 22 – Espessura de carbonização para a casquinha vermelha secção 5 [mm], (fogo a 3 lados). .....	63
Tabela 23 – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha vermelha, (fogo a 3 lados). .....	64
Tabela 24 – Resultados obtidos para cada secção em estudo, (fogo a 3 lados). .....	64
Tabela 25- Comparação da velocidade média de carbonização $\beta$ .....	65
Tabela 26 – Propriedades mecânicas das espécies em estudo. ....	70
Tabela 27 – Razões elásticas das espécies em estudo para a humidade de 12%. ....	71
Tabela 28 – Valores dos módulos de elasticidade e dos módulos de corte.....	71
Tabela 29 - Representação dos coeficientes de Poisson. ....	73
Tabela 30 - Representação das tensões de rotura devido à compressão e à tracção. ....	73
Tabela 31 – Resultados numéricos para a casquinha branca. ....	78
Tabela 32 – Resultados numéricos para a secção 2 de casquinha branca, (fogo a 3 lados). ....	79
Tabela 33 - Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha branca, (fogo a 3 lados). ....	80
Tabela 34 - Resultados numéricos para a secção 2 de casquinha branca, (fogo a 4 lados). ....	82
Tabela 35 - Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha branca, (fogo a 4 lados). ....	83
Tabela 36 – Resultados numéricos para a casquinha vermelha. ....	85
Tabela 37 – Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha vermelha, (fogo a 3 lados). ....	86
Tabela 38 - Resultados numéricos para a secção 5 de casquinha vermelha, (fogo a 3 lados). ....	87
Tabela 39 – Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha vermelha, (fogo a 4 lados). ....	89
Tabela 40 - Resultados numéricos para a secção 5 de casquinha vermelha, (fogo a 4 lados). ....	90
Tabela 41 – Resultados da tensão máxima devido à carga mecânica. ....	93
Tabela 42 – Resultados da tensão máxima devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 3 lados. ....	93
Tabela 43 – Resultados da tensão máxima devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 4 lados. ....	94
Tabela 44 – Definição da curva de pressão.....	96
Tabela 45 – Carga máxima com fogo a 3 lados. ....	97
Tabela 46 – Carga máxima com fogo a 4 lados. ....	97
Tabela 47 – Carga máxima com fogo a 3 lados. ....	102
Tabela 48 – Carga máxima com fogo a 4 lados. ....	102
Tabela 49 – Resultados da carga máxima devido à secção resultante e à exposição ao fogo a 3 lados e 4 lados. ....	106
Tabela 50 – Equações para o cálculo de tensões.....	113

Tabela 51 – Resultado das tensões devido à carga mecânica. ....	117
Tabela 52 – Resultado das tensões devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 3 lados. .....	118
Tabela 53 – Resultado das tensões devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 4 lados. .....	118



## Nomenclatura

Os símbolos apresentados no texto, são definidos, dentro do possível, à medida que se apresentam, no entanto de modo a facilitar a consulta posterior deste documento, foi elaborada uma lista com a definição de alguns símbolos que são utilizados.

### Letras do alfabeto latino

A – Área [ $m^2$ ]

$A_r$  – % Área resultante/resistente

$b_t$  – Espessura carbonizada na horizontal para os diversos tempos de estudo  $t=15,30,45,60$  [mm]

B – Medida da base do perfil [m]

$C_p$  – Calor específico [kJ/kgK]

$d_{char,0}$  – Espessura de carbonização [mm]

$d_{char,n}$  – Espessura de carbonização considerando cantos, arredondamentos e fissuração [mm]

$d_{ef}$  – Espessura de carbonização efectiva [mm]

$d_t$  – Espessura carbonizada na vertical para os diversos tempos de estudo  $t=15,30,45,60$  [mm]

D – Medida da altura do perfil [m]

E – Radiação do corpo negro [ $W/m^2$ ]

$E_i$  – Módulo de elasticidade nas direcções  $i=x,y, z$  [MPa]

$G_i$  – Módulo ao corte nas direcções  $i=xy, xz, yz$  [MPa]

$G_{abs}$  – Taxa de irradiação absorvida por uma superfície [%]

$G_{inc}$  – Taxa de irradiação incidente numa superfície [%]

$h_c$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção [ $W/m^2K$ ]

$I_x$  – Momento de inércia na direcção  $x$  [ $m^4$ ]

$K_T$  – Factor de redução devido à temperatura

L – Comprimento do perfil [m]

$m_1$  – Massa da madeira húmida [kg]

$m_2$  – Massa da madeira seca [kg]

M – Massa [kg]

$M_x$  – Momento máximo [kN.m]

q – Calor transferido [ $W/m^2K$ ]

$q'_c$  – Fluxo de calor por convecção [ $W/m^2$ ]

$q_c$  – Quantidade de calor específico por convecção [W]  
 $q'_r$  – Fluxo de calor por radiação [ $W/m^2$ ]  
 $q_r$  – Quantidade de calor específico por radiação [W]  
 $q'_x$  – Fluxo de calor por condução [ $W/m^2$ ]  
 $q_x$  – Quantidade de calor específico por condução [W]  
 $t$  – Tempo decorrido [s]  
 $T_0$  – Temperatura inicial [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_f$  – Temperatura do fluido [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_g$  – Temperatura do gás [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_s$  – Temperatura da superfície [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_{s1}$  – Temperatura da superfície 1 [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_{s2}$  – Temperatura da superfície 2 [ $^{\circ}C$ ]  
 $V$  – Volume [ $m^3$ ]  
 $w$  – Grau de humidade [%]  
 $W$  – Carga distribuída [kN/m]  
 $\bar{y}$  – Distancia entre o centro geométrico e a extremidade onde se calculam tensões [m]

### **Letras do alfabeto grego.**

$\bar{\alpha}$  – Poder de absorção do corpo  
 $\alpha$  – Coeficiente de expansão térmica [ $^{\circ}C^{-1}$ ]  
 $\beta_0$  – Taxa de carbonização ao fogo normalizado [mm/min]  
 $\beta_t$  – Velocidade de carbonização devido aos vários tempos em estudo  $t = 15, 30, 45, 60$  [mm/min]  
 $\beta_n$  – Taxa de carbonização ao fogo normalizado considerando cantos, arredondamentos e fissuração [mm/min]  
 $\Delta T$  – Variação de temperatura [ $^{\circ}C$ ]  
 $\Delta x$  – Variação de comprimento [m]  
 $\bar{\epsilon}$  – Emissividade do material  
 $\epsilon$  – Deformação  
 $\lambda$  – Condutividade térmica [ $W/m^2K$ ]  
 $\rho$  – Massa volúmica [ $kg/m^3$ ]  
 $\sigma$  – Constante de Stefan Boltzman [ $W/m^2K^4$ ]  
 $\sigma_{m\acute{a}x}$  – Tensão de rotura máxima [MPa]

# **Capítulo 1**

## Introdução

# 1. Introdução

A madeira como recurso renovável tem atraído a atenção do público por ser o material de construção mais amigo do ambiente e devido a ser renovável, promovendo uma construção sustentável, com atributos atractivos, arquitectonicos e estruturais. Trata-se de um material com elevada resistência, sobretudo quando comparada com o seu peso. Tem uma durabilidade excepcional quando associada ao cumprimento de boas práticas construtivas, sendo resistente a vários factores, nomeadamente à água salgada, à oxidação e aos agentes corrosivos, (Cachim, 2007).

Quando exposta a acções acidentais, como é o caso da presença de incêndios, apresenta uma camada envolvente de carbonização. Esta camada tem como função retardar o processo de propagação da temperatura para o seu interior, podendo ser considerada como isolante. O núcleo da madeira pode permanecer a baixas temperaturas, mantendo as suas propriedades inalteradas, em função do tempo de exposição ao fogo e das dimensões do elemento. Conforme proposto no EC5 (EN1991-1-2, 2002), a temperatura na camada de carbonização que está em contacto com o núcleo frio da secção, é de aproximadamente 300 [°C].

Muitos investigadores têm apresentado trabalhos experimentais e numéricos para o estudo de modelos de cálculo da degradação física da madeira na presença de temperaturas elevadas (Janssens, 2004), (Gay, et al., 2011), (Pinto, et al., 2007), (White, et al., 1999).

As espécies em estudo neste trabalho são a casquinha branca (pinho abeto) e a casquinha vermelha (pinho silvestre), essencialmente originárias dos países do Norte da Europa. Estas espécies são aplicáveis na construção civil em geral, sendo utilizadas como elementos estruturais do tipo viga ou coluna, ou ainda na forma lamelar. Outras investigações com o contributo do autor (Barreira, 2008), foram efectuadas em diferentes espécies recorrendo a técnicas experimentais e numéricas.

## 1.1 Objectivos

Este trabalho teve como objectivos:

- Avaliar o comportamento térmico e mecânico da madeira de casquinha branca e de casquinha vermelha, quando sujeitas a elevadas temperaturas devido à simulação de uma situação de incêndio.

- Apresentar os modelos computacionais para a análise do comportamento de secções típicas quando sujeitos à presença de fogo, com imposição da degradação das propriedades físicas e mecânicas desses materiais, sob o efeito de altas temperaturas.
- Determinar a camada de carbonização e a velocidade de carbonização da madeira em duas espécies diferentes, quando exposta à situação de incêndio para diferentes instantes de tempo.
- Determinar a resistência mecânica numa gama de perfis seleccionados, calculando as tensões resultantes com base na redução de secção sob efeito térmico.
- Apresentar um conjunto de equações analíticas para projecto de vigas simplesmente apoiadas, sob efeito de uma carga distribuída e efeito redutor da secção, quando em presença de uma acção térmica.
- Determinar a capacidade de carga última em vigas simplesmente apoiadas, função da imposição de um carregamento uniformemente distribuído em simultâneo com uma acção térmica.
- Elaborar um programa de cálculo simples que permita calcular as reacções, momentos flectores máximos e tensões máximas em vigas simplesmente apoiadas sob acção mecânica e térmica.

## 1.2 Apresentação sumária dos capítulos

No **Capítulo 2**, é explicada a estrutura da madeira, e como esta é classificada de modo a tornar-se um material de construção estrutural. De uma forma muito geral, é abordada a classificação botânica, a fisiologia e a composição química. De seguida, são definidas as classes de qualidade e de resistência, fazendo alusão à ligação entre estas duas classes. Descrevem-se as espécies de madeira escolhidas para a elaboração deste trabalho, de acordo com as suas características, dimensões e propriedades físicas.

O **Capítulo 3**, descreve os fenómenos de transferência de calor, condução, convecção e radiação. É apresentada a curva de incêndio natural que caracteriza a evolução da temperatura ambiente de um incêndio em função do tempo de ocorrência, bem como as curvas paramétricas definidas pelo EC5. No final, é feita uma abordagem ao método dos elementos

finitos aplicado à equação de calor e representam-se as condições de fronteira em problemas térmicos.

No **Capítulo 4**, é tratado o comportamento térmico da madeira, onde se explica o processo de pirólise, ignição e formação da camada de carbonização. São apresentados os valores propostos pelo EC5 para a taxa de carbonização em função da massa específica. De seguida, são abordadas as propriedades térmicas da madeira que se encontram descritas no anexo B do EC5, dando valores para a condutividade térmica, calor específico e massa específica da madeira, considerando que a humidade inicial é de 12%.

No **Capítulo 5**, é apresentado um estudo numérico, realizado no programa de cálculo de elementos finitos ANSYS<sup>®</sup>, com o objectivo de se determinar a espessura da camada carbonizada em função do tempo, para 18 secções diferentes de elementos estruturais, sujeitos ao fogo, segundo a curva ISO834. O elemento finito utilizado nestas simulações é um sólido de 8 nós. As propriedades térmicas utilizadas apresentam um comportamento não linear, de acordo com o EC5. O cálculo da espessura de carbonização é efectuado pela determinação da temperatura a 300 [°C], que limita o interior da secção ainda intacta. Com os resultados obtidos para a espessura de carbonização, para um determinado tempo de exposição é calculada a velocidade de carbonização para cada uma das espécies em estudo. No final, é definida a área resistente das secções em estudo.

No **Capítulo 6**, é abordada a madeira como um material ortotrópico, que vai influenciar o comportamento mecânico da madeira, quando submetida a uma situação de incêndio. O aumento da temperatura, provoca a degradação das propriedades mecânicas. Encontram-se definidas as propriedades de rigidez, coeficientes de Poisson, propriedades de resistência e o coeficiente de expansão térmica.

O **Capítulo 7**, apresenta o estudo numérico elaborado através do método de elementos finitos, com o objectivo de determinar as tensões resultantes em vigas simplesmente apoiadas sob efeito da exposição ao fogo, em simultâneo com a presença de uma carga mecânica. Este estudo foi realizado para 4 vigas de madeira. As propriedades mecânicas utilizadas apresentam um comportamento não linear devido à redução das suas características com o aumento de temperatura. Apresentam-se também um conjunto de equações analíticas, como método alternativo, no cálculo das tensões resultantes. Foi realizada uma comparação entre os

resultados obtidos através do método numérico e equações analíticas, observando a influência do valor da percentagem de área resultante nas secções em estudo.

No **Capítulo 8**, é aplicado o estudo numérico através do método de elementos finitos, na determinação da capacidade de carga última nos perfis considerados. No programa de cálculo, são definidas as curvas de tensão máxima à tracção e à compressão, as curvas de pressão a aplicar em cada perfil. Apresenta-se como resultado ábacos, função dos valores máximos de capacidade de carga, para diferentes instantes de tempo de exposição ao fogo.

O **Capítulo 9**, apresenta o desenvolvimento de um código para o cálculo de tensões lineares em vigas de madeira simplesmente apoiadas, submetidas a carregamento mecânico e ou térmico. O programa de cálculo permite obter as reacções e os esforços internos ao longo de vigas com secção constante e sujeitos a carregamentos combinados, conhecendo as respectivas propriedades do material a utilizar.

No **Capítulo 10**, apresentam-se as conclusões finais sobre todo o trabalho desenvolvido, bem como algumas sugestões para uma futura investigação nesta área de desenvolvimento.



## **Capítulo 2**

### Estrutura da Madeira

## 2. Estrutura da Madeira

A madeira é um material de construção proveniente de um ser vivo, a árvore, necessitando de suporte, alimentação e protecção. As suas propriedades são o resultado do processo de crescimento. No sentido lato, pode dizer-se que a árvore é constituída por três elementos, com características e funções específicas, raízes, tronco e copa. A madeira é um conjunto de tecidos, com a exclusão da casca, que formam a árvore com altura superior a 5 metros, (Cachim, 2007).

### 2.1 Classificação botânica

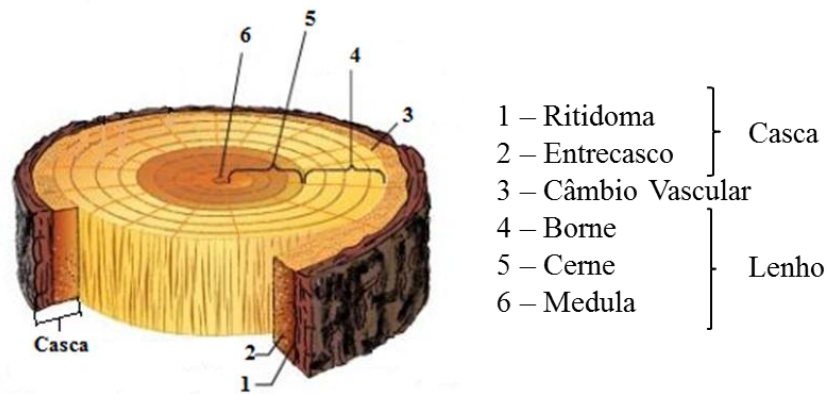
As árvores são plantas de elevada complexidade anatómica e fisiológica. Botanicamente estão contidas na divisão das Fanerógamas e são vegetais complexos, ou seja, estão dotados de raízes, caules, folhas e flores. Estas, por sua vez, subdividem-se em Angiospérmicas e as Gimnospérmicas.

As gimnospérmicas são árvores coníferas e resinosas, também chamadas de *softwoods*, têm como características folhas persistentes em forma de agulha e não fornecem frutos. São as madeiras de lenho mais mole, correspondendo a 35% das espécies conhecidas.

As angiospérmicas são árvores com características exuberantes e frondosas, conhecidas como madeira de lei, correspondendo a 65% das espécies conhecidas. São também designadas como folhosas ou *hardwoods*. Caracterizam-se por terem sementes, flores com pétalas, frutos de grande diversidade de forma, textura e cor; apresentam folhas persistentes ou caducas, com forma geralmente plana e uma rede de finas nervuras, (Coutinho, 1999).

### 2.2 Fisiologia da madeira

Para a produção de peças de madeira natural, como material de construção, a parte considerada útil para a sua produção é o tronco da árvore. A figura seguinte ilustra os elementos que compõe o tronco. O caule é constituído por casca, ritidoma, entrecasco, câmbio vascular, borne, cerne e medula, (Coutinho, 1999).



**Figura 1** – Corte transversal do caule de uma árvore.

### Casca

Protege o lenho e é o veículo que transporta a seiva que é elaborada, das folhas para o lenho do tronco. As duas camadas assumem essa função: um estrato externo e epidérmico, formado por tecido morto, denominado por ritidoma e outro interno, formado de tecido vivo, mole e húmido, ou seja, com actividade fisiológica e condutor da seiva elaborada, denominado por carrasco.

O ritidoma protege os tecidos mais novos do ambiente, dos excessos de evaporação e dos agentes de destruição. Quando racha, cai e é renovado, pois como é um tecido morto não tem crescimento associado.

Na outra camada que compõe a casca, o entrecasco, desce a seiva elaborada nas folhas, a partir de substâncias retiradas do solo e do ar. É do solo que provem a água que contém em solução, compostos minerais e que constitui a seiva bruta que sobe por capilaridade pela parte viva do lenho, o borne, até às folhas da copa. Nas folhas e nas partes verdes da copa são absorvidos do ar, o anidrido carbónico e o oxigénio e realiza-se a função clorofilina ou fotossíntese, formando-se a seiva elaborada que desce pelo entrecasco e pode ficar armazenado nas células sob a forma de amido. Partindo dos açúcares que formam a seiva elaborada, as árvores sintetizam todas as substâncias orgânicas que compõem as células lenhosas. Essa transformação ocorre principalmente no estrato que segue à casca, o câmbio vascular, (Coutinho, 1999).

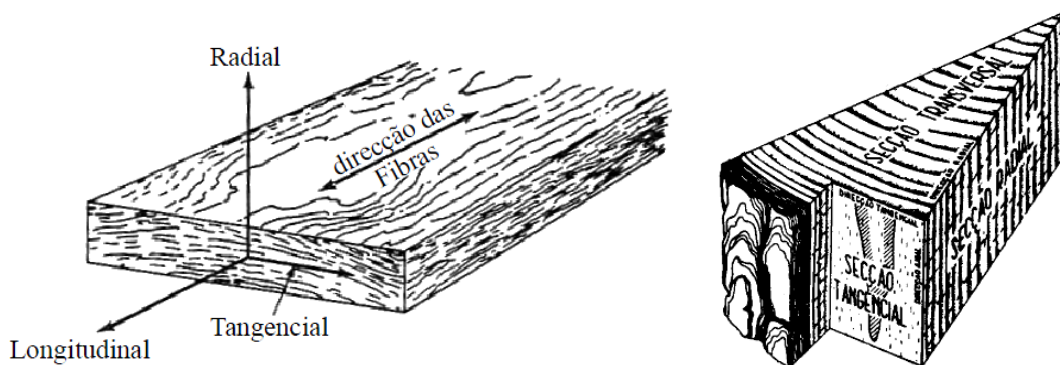
### Câmbio vascular

É uma camada de tecidos vivos, fina e quase invisível, situada entre a casca e o lenho. É constituído por um tecido de células em permanente transformação. No câmbio realiza-se a importante transformação dos açúcares e amidos em celulose e lenhina, principais

constituintes do tecido lenhoso. O crescimento transversal verifica-se pela adição de novas camadas concêntricas e periféricas provenientes dessa transformação no câmbio: os anéis de crescimento. É nos anéis anuais de crescimento que se encontram reflectidas as condições de desenvolvimento da árvore: são largos e pouco distintos em zonas de clima tropical, que se traduzem num rápido crescimento; são apertados e bem configurados em espécies provenientes das zonas temperadas ou frias. Em cada anel, associado a cada ano que passa, destacam-se duas camadas: uma de cor mais clara, com células largas de paredes finas, que é formada durante a primavera e o verão, denominada por anel de primavera; e outra de cor mais escura, com células estreitas, de paredes grossas formada no verão e outono, designado por anel de outono.

Os aneis de crescimento registam a idade da árvore e são a referencia para a consideração e estudo da anisotropia da madeira. Na avaliação do desempenho físico e mecânico do material são considerados ensaios nas três direcções ou eixos principais, figura 2, nomeadamente:

- Direcção tangencial ou direcção transversal tangencial aos anéis de crescimento;
- Direcção radial ou direcção transversal radial dos anéis de crescimento;
- Direcção axial ou no sentido das fibras, longitudinal em relação ao caule, (Coutinho, 1999).



**Figura 2** - Eixos principais (LNEC).

## Lenho

É o núcleo de sustentação e resistência da árvore, é pela sua parte viva, que sobe a seiva bruta. Constitui a secção útil do tronco para obtenção das peças estruturais de madeira natural ou madeira de obra. O lenho é constituído pelo borne, cerne e medula.

O borne, a camada externa, tem a cor mais clara que o cerne, é formado por células vivas e activas. Além de lhe estar associada a função resistente, é esta camada que transporta a seiva bruta, por ascensão capilar.

O cerne, a camada interna, tem a cor mais escura que o borne, é formado por células mortas. As alterações no borne, vão formando e ampliando o cerne. As alterações devidas aos processos de crescente engrossamento das paredes celulares provocados por sucessivas impregnações de lenhina, resinas, taninos e corantes, fazem com que o cerne tenha maior densidade, compacidade, resistência mecânica, e maior durabilidade. Esta durabilidade está associada à sua constituição, ou seja, como o cerne é composto de tecido morto, isento de seiva, amidos ou açúcares, não atrai os insectos, nem os outros agentes de deterioração.

A medula é o núcleo do lenho. O tecido que o constitui é mole e esponjoso, muitas vezes já apodrecido. Não tem resistência mecânica nem durabilidade, (Coutinho, 1999).

### **Raios lenhosos**

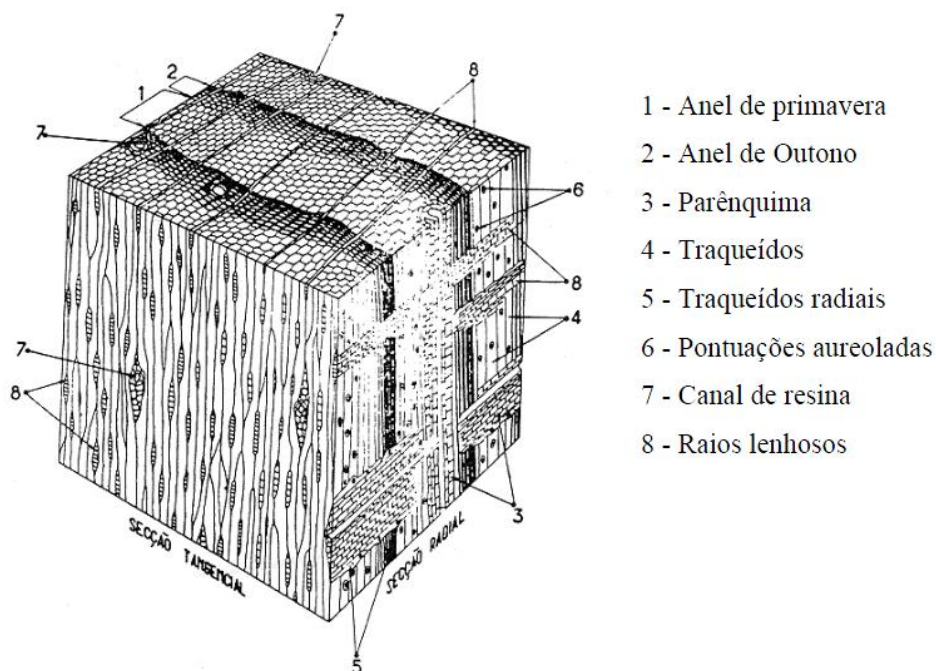
São conjuntos de células lenhosas transversais radiais, cuja função principal é o transporte e armazenamento de nutrientes, (Coutinho, 1999).

## **2.3 Estrutura fibrosa do lenho**

O lenho é constituído por vários tipos de células elementares cujas dimensões, forma e agrupamentos variam de acordo com a sua localização no lenho e a espécie lenhosa. A constituição diferenciada do tecido lenhoso é a causa do comportamento anisotrópico da madeira e da sua heterogeneidade quer em relação às várias espécies quer em função da localização no mesmo toro. O lenho das resinosas e das folhosas tem uma constituição diferente, (Coutinho, 1999).

### **2.3.1 Estrutura fibrosa do lenho de uma resinosa**

O lenho de uma resinosa é constituído por anel de primavera, anel de outono, parênquima, traqueídeos, pontuações aureoladas, canal de resina e raios lenhosos, como se pode verificar na figura 3:



**Figura 3** - Estrutura do lenho de uma resinoso (Coutinho, 1999).

### **Traqueídeos**

O lenho das resinosas é composto quase na totalidade pelo prosênquima que é um tecido formado de traqueídeos que são células alongadas de diâmetro quase constante, semelhante a tubos finos e que desempenham uma função dupla de condução da seiva e suporte mecânico. Os traqueídeos, designados por fibras, podem ser longitudinais ou radiais e tem pontuações aureoladas que consistem em depressões sensivelmente tronco-cônicas de uma das camadas da parede celular, (Coutinho, 1999).

### **Raios lenhosos**

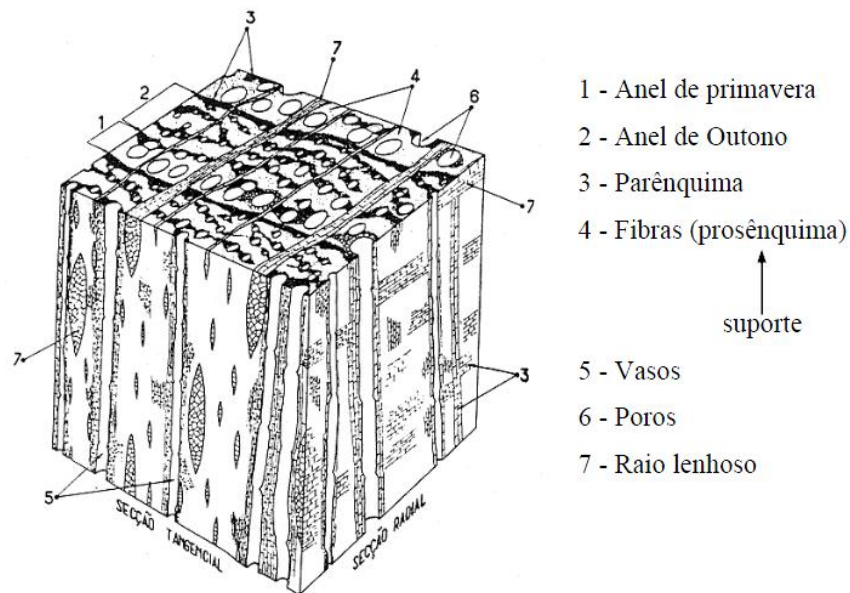
Além dos traqueídeos, existem também numerosas linhas finas e claras que se desenvolvem radialmente – os raios lenhosos e que conduzem e/ou armazenam substâncias nutrientes no sentido radial do tronco. Os raios lenhosos constituem o parênquima radial. O tecido do parênquima, disposto segundo a direcção geral das fibras designa-se por parênquima longitudinal. O parênquima é, portanto, um tecido de células curtas providas de paredes relativamente pouco espessas, disseminado no seio do prosênquima e destinado principalmente à distribuição e reserva das substâncias nutrientes, (Coutinho, 1999).

### Canais de resina

As resinosas ainda contêm os canais resiníferos que são limitados por células secretoras de resina, (Coutinho, 1999).

### 2.3.2 Estrutura fibrosa do lenho de uma folhosa

O lenho de uma folhosa é constituído por anel de Primavera, anel de Outono, parênquima, fibras (prosênquima), vasos, poros e raios lenhosos, como se verifica na figura 4:



**Figura 4** - Estrutura do lenho de uma folhosa (Coutinho, 1999).

### Vasos

São tubos longitudinais de células do prosênquima, que é o tecido que forma, nas folhosas, grande parte do lenho. Cada vaso é formado de células longitudinais e tubulares justapostas, visíveis a olho nu, abertas nas extremidades e justapostas, permitindo o fluxo da seiva através do lenho, (Coutinho, 1999).

### Fibras

São células com extremidades afiladas, diâmetro variável e reduzido, dispostas longitudinalmente no caule. No seu conjunto, fortemente aglomeradas, constituem elementos de resistência e sustentação da árvore. As características mecânicas da madeira produzida

estão estreitamente ligadas à compacidade, textura e disposição do tecido fibroso. As fibras são células do prosênquima, (Coutinho, 1999).

### **Parênquima**

É um tecido de células curtas providas de paredes relativamente pouco espessas disseminado no seio do prosênquima, destinado principalmente à distribuição e reserva de hidratos de carbono, (Coutinho, 1999).

### **Raios lenhosos**

São faixas de células do parênquima dispostas em fiadas radiais. A sua presença implica uma amarração das fibras no sentido radial, alterando as características nesta direcção, (Coutinho, 1999).

### **2.3.3 Estrutura da parede celular**

A parede celular é constituída por um arranjo concêntrico que é causado pelas diferenças na composição química e pela diferente orientação dos elementos estruturais. Os componentes são subdivididos da seguinte forma:

- Componente estrutural – Celulose
- Componentes sub-estruturais – Polioses e lignina.

Após a remoção das polioses e da lignina, a textura do elemento celulósico, chamado de fibrila, é visível. Entre as células individuais. Há uma fina camada, a lamela média, a qual une as células entre si, formando o tecido. Embora fibrilas simples possam cruzar a lamela media, esta camada é em princípio livre de celulose.

A lamela média é altamente lignificada. A sua espessura é de 0,2 a 1,0 $\mu$ m.

Na parede primária (P), as fibrilas de celulose são arrançadas em delgadas camadas que se cruzam formando redes. A parede primária é a primeira camada depositada durante o desenvolvimento da célula. A quantidade de celulose na parede primária é muito limitada, contém também polioses, pectina e proteínas imersos numa matriz de lignina, a sua espessura varia de 0,1 a 0,2 $\mu$ m.

A parede secundária, é a camada espessante da célula, depositada sobre a parede primária, após o seu crescimento superficial ter-se completado. Consiste em três camadas: uma externa (S1 definida como a camada de transição), uma média (S2) e uma interna (S3

definida como uma camada terciária). A espessura da parede secundária pode variar de 1 a 10 $\mu$ m.

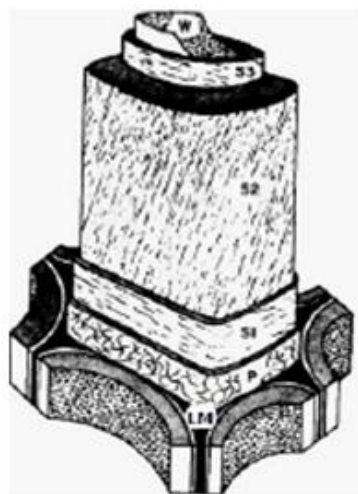
Na camada S1, com espessura de 0,2 a 0,3 $\mu$ m, as fibrilas de celulose apresentam uma orientação helicoidal suave. Esta camada é mais lignificada, conferindo-lhe maior resistência ao ataque de fungos do que S2.

A camada S2 é a mais espessa da parede celular, com valores entre 1 a 9 $\mu$ m.

A camada S3, considerada também como parede terciária, possui maior concentração de substâncias não estruturais.

Os traqueóides de coníferas e as fibras libriformes de folhosas mais primitivas, apresentam quase sempre uma camada ou zona verrugosa (warts), que é uma pequena membrana delgada e amorfa, localizada na superfície interna da camada S3 ou parede terciária. É constituída de material semelhante a lignina em conjunto com pequenas quantidades de hidratos de carbono e substâncias pécicas.

Devido à pequena inclinação das fibrilas, S2 é provida de resistência à tracção, enquanto S1, com grande inclinação das fibrilas, confere resistência à compressão, ambas ao longo do eixo da célula. Na figura seguinte é apresentado o modelo da parede celular, (Coutinho, 1999).



Lm=lamela média,  
P=parede primária,  
S1=camada 1 da parede secundária,  
S2=camada 2 da parede secundária,  
S3=camada 3 da parede secundária  
ou parede terciária  
W=camada verrugosa

**Figura 5** – Modelo da estrutura celular, (Coutinho, 1999).

## 2.4 Composição química

A composição química da madeira, é semelhante em todas as espécies. Os principais elementos existentes na madeira são o Carbono, que varia entre 49% e 50%; o Hidrogénio (H)

correspondente a 6%, o Oxigénio (O) que varia entre 44% e 45%; e o Nitrogénio (N) que varia entre 0,1% e 1%. Além destes elementos encontram-se pequenas quantidades de Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg) e outros, constituindo as substâncias minerais existentes na madeira, (Coutinho, 1999).

#### **2.4.1 Substâncias macromoleculares**

Do ponto de vista da análise dos componentes da madeira, é necessário distinguir os principais componentes macromoleculares constituintes da parede celular:

- Celulose
- Polioses (hemiceluloses),
- Lignina,

Que estão presentes em todas as madeiras, e os componentes minoritários de baixo peso molecular, extractivos e substâncias minerais, os quais são geralmente relacionados a madeira de certas espécies, no tipo e quantidade. As proporções e composição química da lignina e polioses diferem em coníferas e folhosas, enquanto a celulose é um componente uniforme da madeira. Composição média de madeiras de coníferas e folhosas:

- Celulose – coníferas  $42\pm 2\%$ ; - folhosas  $45\pm 2\%$
- Polioses – coníferas  $27\pm 2\%$ ; - folhosas  $30\pm 2\%$
- Lignina – coníferas  $28\pm 2\%$ ; - folhosas  $20\pm 4\%$
- Extrativos – coníferas  $5\pm 3\%$ ; - folhosas  $3\pm 2\%$ , (Coutinho, 1999).

### **2.5 Classificação da madeira**

Para que a madeira possa ser utilizada como um material estrutural as propriedades de resistência e rigidez têm que ser conhecidas e controladas. Estas propriedades variam de espécie para espécie, ao longo da secção transversal e longitudinal, e podem ainda variar consoante a forma como a madeira é cortada. De modo a homogeneizar estas propriedades, foi criado um processo de classificação que permite estimar a resistência da madeira, (Cachim, 2007).

### 2.5.1 Classes de qualidade

A necessidade de conhecer a qualidade da madeira estrutural, se irá responder de acordo ao que está projectado devido às solicitações a que estará sujeita no seu tempo de vida, requer o conhecimento das suas características e o modo como estas devem ser determinadas. De modo a clarificar a escolha nos projectos, tendo em conta a relação qualidade/preço, foram criadas no sistema europeu quatro normas da série EN 14081 de 2005:

- EN 14081-1 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1 – General requirements;
- EN 14081-2 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2 – Machine grading: additional requirements for initial type testing;
- EN 14081-3 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 - Machine grading: additional requirements for factory production control;
- EN 14081-4 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4 - Machine grading: settings for machine controlled systems.

Nestas normas são definidas e descritas as regras gerais de classificação das madeiras estruturais: a classificação visual e a mecânica.

A **classificação visual** é estabelecida pela avaliação das características, dos defeitos estruturais da madeira, das imperfeições geométricas de secção e das alterações da madeira. Estes parâmetros são limitados pela norma de classificação visual EN 14081-1, onde se encontram definidas as madeiras aceites e as respectivas classes de qualidade.

A **classificação mecânica** é a caracterização da madeira através de um conjunto de processos mecânicos, não destrutivos, onde são determinadas as propriedades mecânicas, sem que exista a necessidade de uma inspecção visual. Através de ensaios, a madeira é classificada de acordo com os valores característicos de resistência, massa volúmica e rigidez, que permitem atribuir uma classe de qualidade, (Franco, 2008).

## 2.5.2 Classificação visual

Os indicadores de qualidade são as singularidades e defeitos aparentes da madeira e o peso relativo que cada um deles possui no elemento. Estes factores são determinantes do seu comportamento estrutural, deve proceder-se à sua identificação e medição.

As características da madeira devem ser em função da população em que estão inseridas, tendo em conta:

- Espécie ou conjunto de espécies;
- Origem geográfica;
- Requisitos dimensionais;
- Qualidade do material disponível no mercado;
- Influência histórica ou a tradição dos mercados.

No Anexo A da norma EN 14081-1, encontram-se definidas as exigências de desempenho gerais relacionadas com defeitos e características da madeira. São indicadas as limitações para:

- Características que reduzem a resistência:
  1. **Nós:** são especificadas as formas de medição de nós e de buracos de nós, que podem ser determinados em relação:
    - À altura ou espessura da peça de madeira sobre valores lineares;
    - À secção ocupada em função da secção total;
    - A valores absolutos estabelecidos de um dado conjunto de dimensões de madeira estrutural.

Os limites referentes à dimensão dos nós, podem ainda ser estabelecidos de acordo com as zonas das peças em que se encontram. Em Portugal a norma que regulamenta o método de medição é a NP 4305.

2. **Desvio do fio:** A norma que define como deve ser medida esta característica é a EN 1310, que estabelece limitações para cada classe.
3. **Densidade e/ou taxa de crescimento:** De acordo com o regulamento EN 384, pelo menos um destes parâmetros deve estar limitado. Se for a densidade a ser especificada, deverá estar relacionada com um teor de água de referência de 20%. Se for a taxa de crescimento a ser

especificada, os métodos de medição devem apresentar limites aconselhados: 15 [mm], 10 [mm], 8 [mm], 6 [mm], 4 [mm] e 3 [mm].

4. **Fendas:** medem-se nos locais onde tenham influência na resistência ao corte de uma viga, o seu valor deve ser limitado de acordo com a EN 1310. As fendas dividem-se em repassadas e não repassadas, o seu comprimento não deve ser superior aos valores de referência traduzidas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Comprimento máximo das fendas num elemento de madeira<sup>b</sup> (EN 14081-1,2005).

Tipo	Comprimento máximo permitido, correspondendo aos níveis das classes de resistência C18 <sup>a</sup> e abaixo.	Comprimento máximo permitido, correspondendo aos níveis das classes de resistência acima de C18 <sup>a</sup> .
Fendas não repassadas	Fendas com profundidade superior a 50% da espessura podem ser desprezadas. Não superior a 1,5 [m] ou ½ do comprimento da peça.	Não superior a 1 [m] ou ¼ do comprimento da peça.
Fendas repassadas	Não superior a 1 [m] ou ¼ do comprimento da peça. Junto aos topos, o comprimento não deve ser superior a duas vezes a espessura da peça.	Só permitida junto aos topos, com um comprimento não superior à espessura da peça.

Nota: O comprimento das fendas está relacionado com o teor da água, e por isso, os limites acima referidos só são aplicáveis no momento da classificação.

<sup>a</sup> De acordo com a EN 338

<sup>b</sup> Limites válidos tanto para a profundidade como para o comprimento de fendas, quando referentes a uma soma cumulativa de fendas num plano, num dado elemento de madeira concreto.

- Características geométricas:

1. **Descaio:** os métodos e os critérios de medição do descaio devem ser adequados à largura, espessura e comprimento da peça. O descaio não deve reduzir mais de dois terços as dimensões da face ou canto. Em construção, este parâmetro deve ser limitado porque se torna indesejável, quando são utilizados parafusos metálicos ou conectores, ou quando há compressão transversal.

2. **Empenos:** estão associados ao teor de água e variam com o tempo. Podem também estar relacionados com as dimensões da peça. São limitados para empenos em arco, em meia cana e hélice. Os valores máximos permitidos estão definidos na tabela 2 aplicáveis a madeira seca. Os métodos de medição encontram-se definidos na norma EN 1310.

**Tabela 2** – Empeno máximo [mm], para comprimentos superiores a 2m<sup>b</sup> (EN 14081-1,2005).

Tipo	Empeno máximo	Empeno máximo
	correspondendo às classes de resistência C18 <sup>a</sup> e abaixo.	correspondendo às classes de resistência acima de C18 <sup>a</sup> .
Empeno em arco de face	20	10
Empeno em arco de canto	12	8
Empeno em hélice	2 [mm] / 25 [mm] de espessura	1 [mm] / 25 [mm] de espessura
Empeno em meia cana	Sem restrições	Sem restrições

<sup>a</sup> De acordo com EN338.

<sup>b</sup> Para empenos em peças com outros comprimentos, os requisitos devem ser ajustados proporcionalmente.

- Características biológicas:

Devem ser impostos limites para os danos provocados por fungos ou insectos, e não permitir a utilização de madeira com ataque de insectos activo. Quaisquer podridões activas não podem ser permitidas em nenhuma classe. As peças danificadas por ataques inactivos, apenas podem ser permitidas em classes baixas, como refere a norma EN 338.

As normas referidas anteriormente aplicam-se apenas a madeira serrada, ou seja, madeira maciça, obtida directamente do tronco da árvore, cuja secção transversal apresenta o formato de viga ou prancha.

A técnica de classificação visual apresenta algumas vantagens e inconvenientes na sua aplicação:

- Técnica simples e facilmente apreendida, é expedita se for bem aplicada;
- É pouco objectiva e rigorosa;
- É segura para o cliente, mas ineficiente para o produtor. Pois subestima a qualidade resistente da madeira. Para que seja uma classificação mais

equilibrada é habitual conjugar com métodos não destrutivos para a determinação da resistência;

- Tem de ser feita peça a peça, e com alguma rapidez para que seja economicamente viável.
- Não necessita da utilização de equipamentos dispendiosos.
- Permite a confirmação de resultados em qualquer altura.

### 2.5.3 Classificação mecânica

A capacidade resistente da madeira apenas pode ser conhecida com exactidão e eficácia sendo necessário realizar ensaios mecânicos. A forma mais precisa de conhecer essa capacidade só é possível com a realização de um ensaio mecânico da peça até à rotura, onde resultam vários valores, nomeadamente o valor de resistência da rotura à flexão. No entanto, este tipo de procedimentos implica que o provete não possa ser reutilizado. Por esse motivo, foram desenvolvidos os métodos não destrutivos para determinar os vários parâmetros, como mostra a norma EN 14081.

Existem dois tipos de classificação mecânica: a classificação controlada pelo produto (output controlled) e a classificação pela máquina (machine controlled). Ambos os sistemas exigem uma inspecção visual para detectar defeitos com influência na resistência mecânica que a máquina não detecta.

O **sistema controlado pelo produto** é adequado para ser utilizado em serrações para um número reduzido de dimensões, espécies e classes de qualidade. O controlo do produto classificado é efectuado diariamente através de ensaio realizado de acordo com a EN 408, em peças seleccionadas aleatoriamente dos lotes classificados. Estes ensaios em conjunto com procedimentos estatísticos são utilizados para afinar os controlos de máquina com vista à correcta classificação para cada classe.

O **sistema controlado pela máquina** recorre apenas à avaliação contínua de uma propriedade mecânica determinante do grau, não necessitando de testes reais de controlo. A propriedade mecânica que normalmente serve para atribuir a classe é o módulo de elasticidade na direcção do fio, ou seja, existem deformações limite para cada classe tendo em conta uma dada tensão aplicada em contínuo às peças que vão entrando e saindo da máquina para classificação. Este sistema assenta a sua fiabilidade num esforço contínuo de investigação que permita afinar continuamente a máquina para cada processo de classificação, esforço esse que é reproduzido em contínuo (Franco, 2008).

## 2.6 Classes de resistência

As classes de resistência baseiam-se na atribuição das principais propriedades físicas e mecânicas a uma dada população de madeira para estrutura, de uma forma simples e objectiva, de modo a facilitar a sua aplicação na construção. Estas classes foram implementadas através da norma NP EN 338, são aplicáveis a todas as madeiras folhosas ou resinosas para uso estrutural, introduzindo factores de segurança adicional na especificação da madeira como material de construção, facilitando a fase de projecto. A atribuição da classe é efectuada a uma população de madeira, definida por parâmetros como a espécie ou grupo de espécies, a origem e as qualidades que têm propriedades mecânicas semelhantes.

A separação entre classes resistentes de resinosas e folhosas resulta das diferenças estruturais e anatómicas de ambas, que faz com que o seu comportamento seja distinto. A classe de resistência de uma determinada população é representada pela letra C para as resinosas ou pela letra D para as folhosas, seguida de um valor característico associado à flexão em  $\text{N/mm}^2$ . Encontram-se definidas doze classes para as resinosas e seis classes para as folhosas.

A atribuição de uma população a uma classe de resistência implica que se verifiquem em simultâneo as seguintes propriedades:

- Valores característicos da resistência à flexão e da massa volúmica iguais ou superiores aos valores de referência;
- Valor característico médio do módulo de elasticidade à flexão igual ou superior a 95% do valor de referência para uma classe de resistência específica.

Concluindo, para fazer corresponder uma espécie/qualidade de uma população a uma classe de resistência, é suficiente a determinação de três propriedades: resistência à flexão, massa volúmica e módulo de elasticidade. Após determinar a classe, os valores característicos das restantes propriedades, obtêm-se através de expressões incluídas na NP EN 338. Esta norma apresenta:

- Propriedades resistentes [ $\text{N/mm}^2$ ] – flexão, tracção paralela e perpendicular às fibras, compressão paralela e perpendicular às fibras, e corte;
- Propriedades elásticas [ $\text{kN/mm}^2$ ] – módulo de elasticidade;
- Valores da massa volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ] – massa volúmica característica e média.

Os valores referidos no anexo 1, foram obtidos a partir de ensaios realizados sobre peças do tamanho real, considerando os defeitos fundamentais e sua influência na capacidade resistente final do elemento. No entanto, os valores indicados não traduzem na realidade a potencialidade de cada espécie de madeira, (Franco, 2008).

## 2.7 Relação entre classes de qualidade e resistência

A definição de uma classe de qualidade está relacionada com a classe de resistência, porque o objectivo é saber a capacidade resistente da peça estrutural e como esta responderá a cada uma das solicitações a que estará sujeita ao longo da sua vida. A relação entre classes encontra-se definida na norma NP EN 1912 que associa a cada uma das classes de resistência, todas as classes de qualidade e respectivas espécies que lhe correspondem, (Pereira, 2009).

A relação entre a classe de qualidade e a classe de resistência encontra-se resumida na tabela seguinte:



**Tabela 3** – Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (NP EN 1912,2003).

<b>Espécie de Madeira</b>	<b>Classe de Qualidade (Norma)</b>	<b>Classe de Resistência</b>
Pinho Bravo ( <i>Pinus Pinaster Ait.</i> )	E (NP 4305)	C18
Casquinha ( <i>Pinus Silvestris L.</i> )	SS (BS 4978) GS (BS 4978)	C24 C16
Espruce ( <i>Picea Ables Kars</i> )	S13 (DIN 4074) S10 (DIN 4074) S7 (DIN 4074)	C30 C24
Câmbala ( <i>Milícia Excelsea A. Chev.</i> <i>Ou M. Regia A. Chev.</i> )	HS (BS 5756)	D40

## 2.8 Espécies de madeira em estudo

Para a elaboração do estudo do modelo numérico, foram escolhidas duas espécies de madeira resinosa comercializadas em Portugal, originárias do Norte da Europa: a casquinha branca e a casquinha vermelha. De modo a uniformizar as características destas madeiras, foram consultadas as fichas técnicas de várias empresas. Na tabela seguinte encontram-se sintetizadas as características das duas espécies.

**Tabela 4** – Características da casquinha branca e da casquinha vermelha.

	Casquinha Branca	Casquinha Vermelha
Ilustração		
Nomes científicos	<i>Picea abies</i> , Karst, <i>Picea excels</i> , <i>Abies alba</i> mill.	<i>Pinus sylvestris</i> , L. <i>Pinus rubra</i> , <i>Pinus Borealis</i>
Cor	Borne: indiferenciado Cerne: Branco amarelado	Borne: Amarelo pálido Cerne: Vermelho acastanhado
Grão	Fino	Fino a grosseiro
Textura	Fina, lustrosa e com fibra recta	Média, uniforme com fibra recta
Formas de comercialização	Prancha e viga	Prancha
Durabilidade	Durabilidade natural média	Durabilidade natural média
Conservação	Impregnabilidade fraca do borne, o cerne não é impregnável. Resistência baixa a fungo; média a xilófagos e térmitas.	Impregnabilidade média do borne, o cerne não é impregnável. Resistência média a fungos, a xilófagos e térmitas.
Aplicações mais comuns	Lambrins/Forros, mobiliário, portas, remos e rodapés.	Lambrins/Forros, mobiliário, portas, rodapés e soalhos.

Estas espécies encontram-se disponíveis no mercado em várias dimensões. As que foram escolhidas para o estudo encontram-se na tabela 5:

**Tabela 5** – Dimensões escolhidas para estudo.

Secção	Casquinha Branca		Casquinha Vermelha	
	B [mm]	D [mm]	B [mm]	D [mm]
1	230	350	90	105
2	250	350	90	75
3	300	350	175	105
4	230	250	90	50
5	250	250	225	105
6	300	250	175	75
7	230	100	225	75
8	250	100	175	50
9	300	100	225	50

### 2.8.1 Propriedades físicas

As principais propriedades físicas da madeira são: o teor de humidade existente na peça, a retracção de acordo com a direcção estrutural e a massa volúmica.

#### Teor de humidade

Designa-se por higroscopicidade, a propriedade que os materiais porosos têm para reter uma certa quantidade de humidade, quanto menor for o seu teor, melhores são as propriedades físicas e mecânicas da peça. O grau de humidade  $w$  é obtido através da expressão 1.

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Em que a percentagem existente é obtida através do quociente entre a diferença de massas existente (ou seja, é a diferença entre a massa da amostra de madeira húmida e a massa dessa mesma amostra após secagem em estufa e após estabilização do seu peso [kg]) e a massa da amostra seca (NP-614, 1973).

Existe um valor internacionalmente designado por teor normal de humidade igual a 12%.

A madeira pode ser classificada e ordenada por categorias em função do seu teor de água:

- Madeira verde – apresenta um grau de humidade acima do ponto de saturação ao ar, normalmente superior a 30%;
- Madeira semi-seca – o teor de água inferior ao ponto de saturação do ar, mas superior a 23%;
- Madeira seca – teor de água compreendida entre 18% e 23%;
- Madeira seca ao ar – teor de água entre 13% e 18%;
- Madeira dessecada – teor de água que oscila entre os 0% e 13%;
- Madeira completamente seca ou anidra – apresenta 0% de teor de água, (Pereira, 2009).

### **Retractilidade**

A madeira como material higroscópico, contrai quando o seu teor de água diminui ao ponto de saturação das fibras até à condição completamente seca ou anidra. Assim sendo, a retractilidade pode ser definida como a alteração das dimensões das peças, quando o seu teor de humidade se altera, contraindo ou inchando consoante existe uma libertação ou absorção de humidade.

Quando um dado elemento de madeira perde água, diminuindo a sua humidade, além da perda de massa, existe também uma diminuição da sua dimensão ou volume, designada por retractilidade linear ou volumétrica, (Pereira, 2009).

De acordo com as tabelas técnicas consultadas, encontram-se referenciados os valores associados à retractilidade, como mostra a tabela 6, conforme fichas técnicas apresentadas no anexo 2.

**Tabela 6** – Valores de retractibilidade.

<b>Retracção</b>	<b>Casquinha Branca</b>	<b>Casquinha Vermelha</b>
Linear tangencial (%)	8,7-9	5,98-8
Linear radial (%)	3,7-5	3,22-4,5
Volumétrica para 1% de humidade	13,5	13,5

## Massa volúmica

A massa volúmica é uma das propriedades físicas mais importantes da madeira porque é dela que dependem a maior parte das outras propriedades, e serve como referencia para a classificação da peça, (Franco, 2008). De acordo com a NP 616, a massa volúmica é calculada através de expressão seguinte:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

A massa volúmica [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] depende da massa do provete [kg] e o volume [ $\text{m}^3$ ].

De acordo com o anexo 2, a massa volúmica encontra-se tabelada de acordo com a espécie conforme representado na tabela 7.

**Tabela 7** – Valores da massa volúmica.

<b>Massa Volúmica</b>	<b>Casquinha Branca</b>	<b>Casquinha Vermelha</b>
$\rho$ em verde [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	800	800
$\rho$ a 12% [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	450-460	520-530



## **Capítulo 3**

### Transferência de Calor

### 3. Transferência de Calor

A análise térmica, segundo a ICTAC – *International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry*, é toda e qualquer propriedade física, química ou resultante de produtos de reacção que é monitorizada em função do tempo ou temperatura, sujeita a uma atmosfera específica, submetida a uma programação controlada.

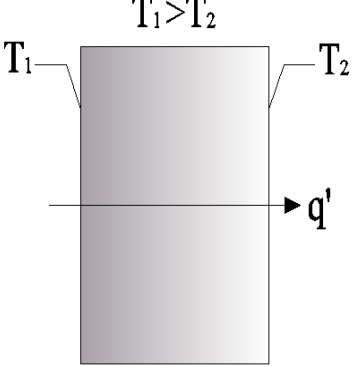
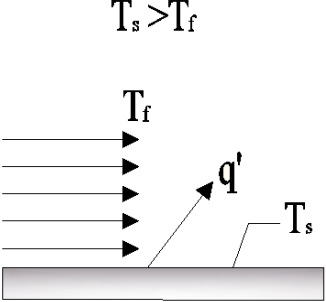
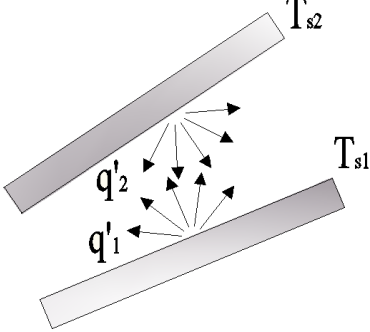
Esta análise, aplicada ao tema em estudo, tem como objectivo determinar o campo de variação de temperaturas, de modo a calcular as tensões térmicas. Em engenharia da construção civil, este estudo é muito importante porque permite determinar o comportamento térmico dos materiais com a finalidade de garantir a segurança, mantendo a estabilidade estrutural dos elementos.

#### 3.1 Fenómenos de transferência de calor

A energia térmica é a fracção de energia interna de um corpo que pode ser transferida devido a uma diferença de temperaturas. Esta energia transferida é designada por *calor* e o processo de *transferência de calor*. Supondo que o corpo não tem alterações do seu estado físico, a variação da energia interna sofrida, pode ser calculada através da expressão 3, que relaciona a massa  $m$  [kg], a variação de temperatura ocorrida  $\Delta T$  [°C] e o calor específico do corpo  $C_p$  [kJ/kgK], (EDEQ, 2007).

$$q = M \times C_p \times \Delta T \quad (3)$$

Existindo no espaço, zonas em que as temperaturas são diferentes, a transferência de calor ocorre no sentido das zonas em que a temperatura é mais baixa. Esta transferência ocorre pelo mecanismo de condução, convecção e radiação, como mostra a figura 6.

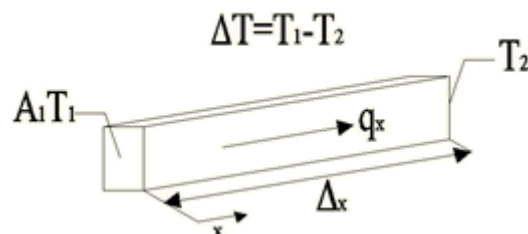
Condução através de um sólido ou de um fluido estacionário	Convecção entre uma superfície e um fluido em movimento	Troca de calor por radiação entre duas superfícies
		

**Figura 6** – Modos de transferência de calor: Condução, Convecção e Radiação.

### 3.1.1 Condução de calor

A condução de calor está associada à transferência de calor que ocorre a nível atômico e molecular por transferência de energia, ou seja, as partículas que se encontram com maior temperatura transferem a sua energia para as partículas contíguas com menos temperatura, as quais recebem essa energia (EDEQ, 2007). Esta transferência ocorre na presença de um gradiente de temperatura.

A lei que descreve a condução térmica é a lei de Fourier. Trata-se de uma lei empírica estabelecida que descreve a teoria da condutibilidade calorífica, em regime de temperaturas estacionárias e variáveis.



**Figura 7** - Condução de calor no estado estacionário.

Tomando como exemplo a figura 7 aplicando-lhe a lei de Fourier, o calor transferido é calculado pela expressão 4, que não depende do tipo de material em causa.

$$q_x \sim A \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4)$$

A quantidade de calor transferido  $q_x$  [W], depende da área do elemento  $A$  [m<sup>2</sup>], da variação de temperatura  $\Delta T$  [°C] e da variação do comprimento do elemento  $\Delta x$  [m]. No entanto este cálculo depende do material. O parâmetro que vai efectuar a proporcionalidade associada ao material é a condutividade térmica  $\lambda$  [W/m<sup>2</sup>.K], como se representa na equação 5.

$$q_x = \lambda \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5)$$

No limite, quando a variação do comprimento tende para 0, o calor transferido é dado por:

$$q_x = -\lambda \times A \times \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

O fluxo de calor é dado pela expressão 7.

$$q'_x = \frac{q_x}{A} = -\lambda \times \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

O sinal negativo é necessário porque o calor é sempre transferido na direcção da diminuição da temperatura. Na expressão anterior, o fluxo de calor  $q'_x$  [W/m<sup>2</sup>], encontra-se calculado na direcção normal  $x$ , a uma superfície de temperatura constante.

Sabendo que o fluxo de calor é um vector, pode ainda ser calculado através da equação 8.

$$q'_x = -\lambda \nabla T = -\lambda \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8)$$

Na expressão anterior, o gradiente de temperaturas é dado em coordenadas cartesianas. Um outro modo de apresentar o fluxo de calor encontra-se na equação 9, e permite utilizar o gradiente de temperaturas na direcção  $n$ . (DeWitt, et al., 2006).

$$q'_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (9)$$

### 3.1.2 Convecção de calor

A convecção é um processo de transferência de calor, que é constituído por dois mecanismos, pelo movimento interno provocado pelas moléculas e pelo movimento do próprio fluido (gás ou líquido). O conjunto destes movimentos quando se encontra na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor (DeWitt, et al., 2006).

A convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície limitadora quando se encontram a diferentes temperaturas, como mostra a figura 6.

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a sua natureza por convecção livre e convecção forçada. Se o movimento do fluido resultar dos efeitos de ascensão provocados pela massa devido à gravidade e à diferença de temperaturas, trata-se de convecção livre. Se o movimento do fluido for causado de forma artificial, trata-se de convecção forçada (DeWitt, et al., 2006). Independentemente da natureza da transferência de calor por convecção, em conjunto com o fenómeno de convecção é dada pela equação 10.

$$q_c = h_c \times A \times (T_f - T_s) \quad (10)$$

A quantidade de calor transferido  $q_c$  [W] depende do coeficiente de transferência de calor por convecção  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>.K], da área superficial  $A$  [m<sup>2</sup>] e da diferença entre a temperatura da superfície  $T_s$  e a temperatura do fluido  $T_f$  [°C].

O valor do fluxo de calor é dado pela expressão seguinte:

$$q'_c = h_c \times (T_s - T_f) \quad (11)$$

A expressão 11 é usada, quando a temperatura do fluido é superior à temperatura da superfície, que traduz a Lei de Newton para o arrefecimento.

### 3.1.3 Radiação de calor

A radiação térmica resulta da emissão e propagação de ondas electromagnéticas por alteração da configuração electrónica de átomos e moléculas. Esta transferência de calor ocorre em sólidos, líquidos, e gases, excepto se estes forem opacos à radiação térmica (EDEQ, 2007).

Os processos de emissão e absorção de energia radiante encontram-se associados à massa. Na absorção, a radiação incide na superfície de um corpo, e à medida que o vai penetrando a energia vai sendo atenuada. Na emissão, a radiação que existe no interior do corpo é emitida até à superfície. Pode então dizer-se que a radiação é emitida ou absorvida pela superfície quando a sua atenuação ocorre próximo dela e que apenas em vácuo, a radiação propaga-se sem atenuação (DeWitt, et al., 2006).

O fluxo máximo de radiação emitido por um corpo é dado pela lei de Stefan-Boltzmann e é válida apenas para corpos negros, ou seja, para corpos que absorvem a totalidade da energia radiante que lhe seja incidida.

$$E = \sigma \times T_s^4 \quad (12)$$

Nesta expressão,  $E$  é a radiação do corpo negro [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] que depende da constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma$  igual a  $5,67 \times 10^{-8}$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ] e da temperatura  $T$  [K].

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que num corpo negro. Esta diminuição deve-se ao valor da emissividade do material ( $\bar{\epsilon}$ ) que varia entre zero e um. O fluxo de radiação para um corpo real é calculado pela expressão 13.

$$E = \bar{\epsilon} \times \sigma \times T_s^4 \quad (13)$$

A taxa de radiação que incide numa superfície designa-se por irradiação ( $G_{inc}$ ). A irradiação absorvida pela superfície ( $G_{abs}$ ), faz com que a energia térmica do material aumente e seja obtida pela expressão 14.

$$G_{abs} = \bar{\alpha} \times G_{inc} \quad (14)$$

Esta irradiação depende do poder de absorção do corpo ( $\bar{\alpha}$ ), que varia entre zero e um, e depende da natureza de radiação e da sua própria superfície. Na maioria dos casos, um líquido

é considerado como opaco e um gás considerado como transparente. No caso dos sólidos, estes são considerados opacos ou semitransparentes.

Considerando que  $\bar{\varepsilon} = \bar{\alpha}$ , o valor do fluxo de calor é dado pela expressão 15.

$$q_r' = \bar{\varepsilon} \times \sigma(T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \quad (15)$$

Na expressão anterior, já se encontra contemplada a energia que é libertada pela emissão da radiação e a radiação absorvida.

A quantidade de calor associada à radiação pode ser escrita como se mostra a equação 16.

$$q_r = h_r \times A(T_{s1} - T_{s2}) \quad (16)$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação  $h_r$  é obtido em função de:

$$h_r \equiv \bar{\varepsilon} \times \sigma(T_{s1} - T_{s2})(T_{s1}^2 + T_{s2}^2) \quad (17)$$

Calculando-se de forma semelhante à da convecção. (DeWitt, et al., 2006).

### 3.1.4 Transferência de calor por radiação e convecção

Normalmente a transferência de calor numa superfície ocorrem em simultâneo, a radiação para a vizinhança e a convecção com o ambiente. A quantidade de calor é calculada através da equação seguinte (DeWitt, et al., 2006):

$$q = q_c + q_{rad} = h_c A(T_s - T_f) + \bar{\varepsilon} A \sigma(T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \quad (18)$$

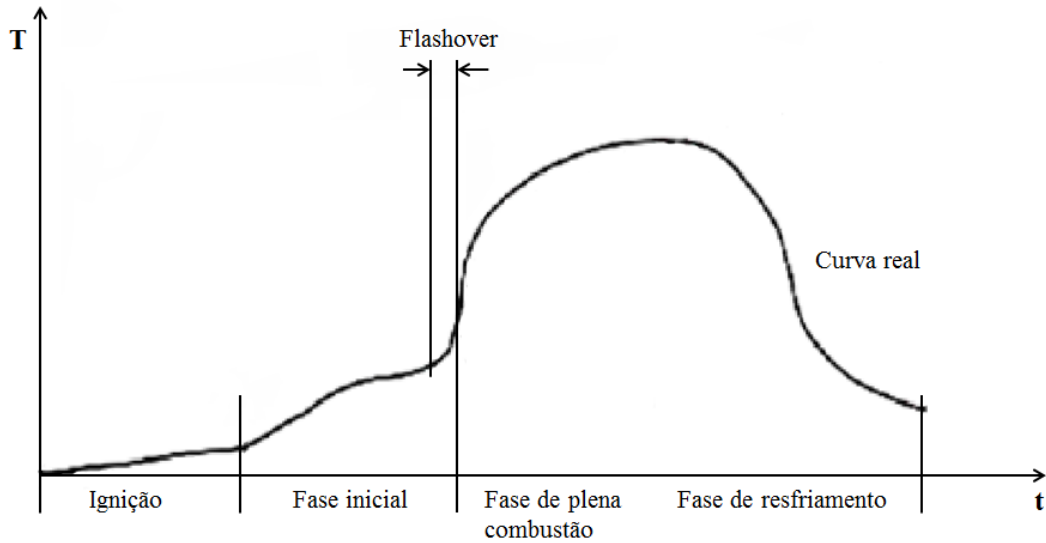
## 3.2 Curva de incêndio natural

Para que ocorra um incêndio é necessário que existam em simultâneo uma fonte de calor, um combustível e um comburente (oxigénio). O início do incêndio dá-se quando a mistura combustível e oxigénio está suficientemente quente para que ocorra uma combustão.

Como se pode verificar na figura 8 está representada a curva de incêndio natural que se divide em quatro fases sucessivas:

- A fase inicial ou fase de ignição: as temperaturas são baixas e não provocam influências no comportamento estrutural dos edifícios. É nesta fase em que se pretende que sejam salvas as vidas humanas, além disso, também se produzem os gases tóxicos (Real, 2003). Para a madeira, a temperatura de ignição depende de vários factores, nomeadamente da espécie, da densidade, do teor de água e da forma da secção. Na presença de um foco de incêndio, o valor frequente de temperatura de ignição é de 300°C (Duarte, 2005).
- A fase da propagação: o fogo espalha-se por radiação ou por contacto directo, dando-se num determinado instante a inflamação súbita dos gases e o incêndio generaliza-se em todo o compartimento. É nesta fase que ocorre o “flashover”, em que as temperaturas se encontram entre os 450°C e os 600°C. A partir deste instante as temperaturas sobem repentinamente (Real, 2003). Na madeira, a velocidade de propagação depende de vários factores, nomeadamente das características do material, da forma das peças e das condições envolventes.
- A fase de desenvolvimento pleno: onde o material combustível queima, e as temperaturas mantêm-se constantes.
- A fase de extinção ou fase de arrefecimento: em que a temperatura desce progressivamente, ou pela falta de combustível ou pela falta de oxigénio, (Real, 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, (Pinto, 2005).



**Figura 8** – Curva de incêndio natural (Pinto, 2005).

### 3.3 Curvas de incêndio normalizadas

De acordo com o EC1 (EN1991-1-2, 2002), a evolução da temperatura de incêndio ao longo do tempo pode ser definida pelas curvas de incêndio normalizadas: a curva de incêndio padrão ISO834, a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio de hidrocarbonetos. Apesar de neste trabalho se utilizar unicamente a curva ISO834, no subcapítulo seguinte encontram-se as equações que traduzem o comportamento das diferentes curvas possíveis.

#### 3.3.1 Curva de incêndio padrão ISO834

A curva de incêndio padrão ISO834, é definida pela equação 19:

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

Onde T é a temperatura dos gases no compartimento de incêndio [°C],  $T_0$  é a temperatura inicial, que no EC1 (EN1991-1-2, 2002) é tomada com o valor de 20 [°C] e t é o tempo decorrido desde o início do incêndio [min].

### 3.3.2 Curva de incêndio para elementos exteriores

A curva de incêndio para elementos exteriores é definida pela equação 20:

$$T = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + T_0 \quad (20)$$

Nesta curva após os 51min a temperatura mantém-se constante a 680°C.

### 3.3.3 Curva de incêndio de hidrocarbonetos

A curva de incêndio de hidrocarbonetos é definida pela equação 21:

$$T = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + T_0 \quad (21)$$

Nesta curva a partir dos 81min a temperatura T mantém-se a 1100°C. O gráfico da Figura 9 representa a evolução das três curvas definidas ao longo do tempo.

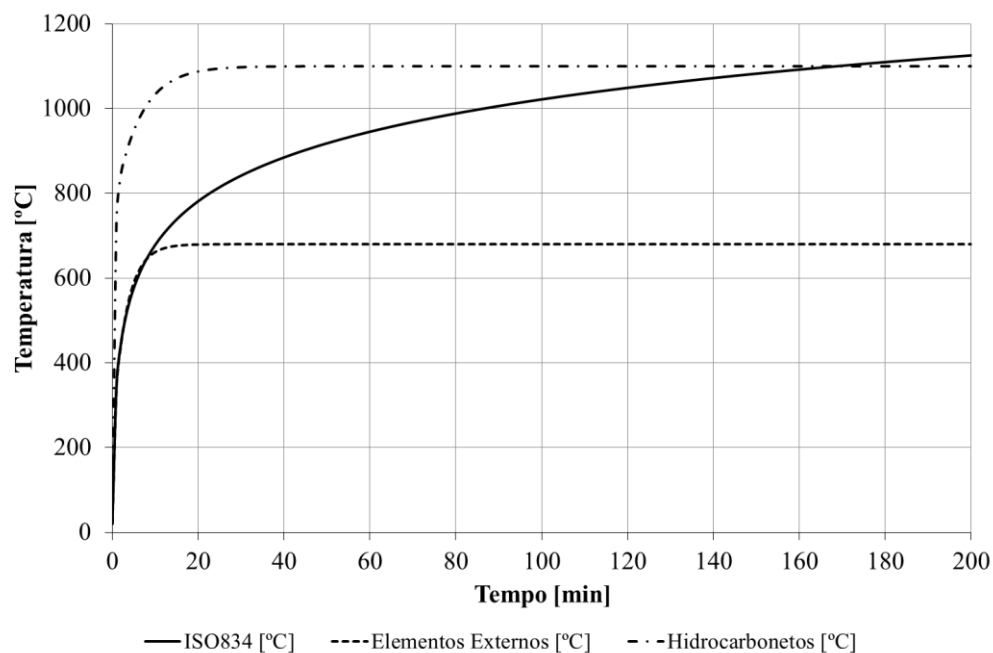


Figura 9 - Curvas normalizadas de incêndio EC1.

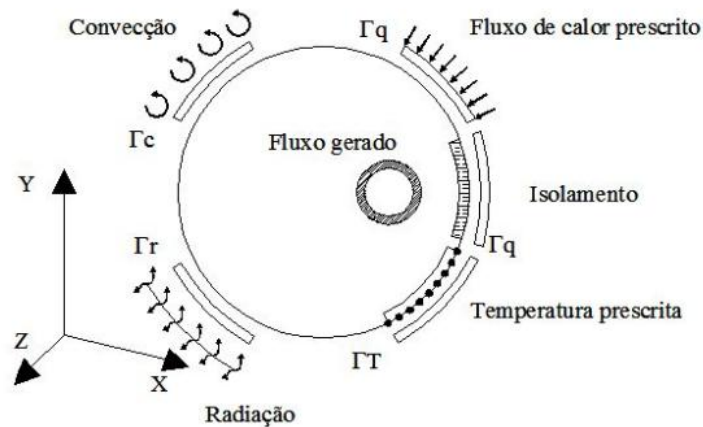
### 3.4 Método dos elementos finitos aplicado à equação do calor

Para que se possa conhecer a distribuição de temperaturas em elementos estruturais, é necessário compreender os processos de transferência de calor. A descrição da distribuição da temperatura num volume é feita através da aplicação da equação diferencial seguinte:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (22)$$

Em que  $\lambda$  é a condutividade térmica,  $C_p$  é o calor específico do material,  $\rho$  é a massa específica do material e  $T$  é o campo de temperaturas e  $t$  o tempo.

Esta expressão, estabelece que em qualquer ponto do meio, a taxa de energia líquida transferida por condução para o interior do volume unitário, somando a taxa volumétrica de geração de energia térmica deve ser igual à taxa de variação da energia térmica armazenada no interior desse volume. Além disso, é necessário satisfazer as condições iniciais e de fronteira do problema, indicadas na figura 10.



**Figura 10** – Condições de fronteira em problemas térmicos no domínio  $\Omega$  (Fonseca, 2003).

A equação diferencial de condução de calor 22, é substituída por um sistema de equações diferenciais, através de uma discretização no espaço. Aplicando o método dos

resíduos pesados à equação de calor em regime transiente no domínio  $\Omega$ , considerando as suas condições de fronteira, (Fonseca, 1998), tem-se que:

$$\int_{\Omega} W_i R_{\Omega} d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{W}_i R_q d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} \bar{W}_i R_h d\Gamma_h = 0 \quad i = 1, 2 \dots \quad (23)$$

Em que  $W_i$  e  $\bar{W}_i$  são as funções de peso do domínio  $\Omega$  e na fronteira  $\Gamma$ , respectivamente. Esta equação pode ser expressa através da soma das parcelas ou também designados por resíduos conforme as expressões seguintes:

$$R_{\Omega} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \text{ resíduo em } \Omega \quad (24)$$

$$R_q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \bar{q}, \text{ resíduo em } \Gamma_q \quad (25)$$

$$R_h = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h_{cr} T_s - h_{cr} T_f, \text{ resíduo em } \Gamma_h \quad (26)$$

A substituição destas parcelas na equação 23, permite obter a expressão

$$\int_{\Omega} W_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{W}_i \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \bar{q} \right) d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} \bar{W}_i \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h_{cr} (T_s - T_f) \right) d\Gamma_h = 0 \quad (27)$$

O método dos resíduos pesados permite passar da forma diferencial das equações à sua forma integral. De seguida, aplica-se o método de aproximação por elementos finitos, que permite discretizar a forma integral em cada elemento, de modo a obter um sistema global de equações com a seguinte forma, (Fonseca, 1998):

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{F\} \quad (28)$$

Cada termo da equação 28 representa diferentes constituintes, a matriz de condutividade térmica, de capacidade calorífica e o vector representativo das forças térmicas, num domínio cartesiano, em função das expressões 29, 30 e 31.

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_h^e} N_i N_j h_{cr} d\Gamma_h^e, \quad (29)$$

$$1 \leq i, j \leq m$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho C_p N_i N_j h_{cr} d\Omega^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (30)$$

$$F_i = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^p \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_h^e} h_{cr} T_f N_i d\Gamma_h^e, \quad 1 \leq i \leq m \quad (31)$$

Onde  $E$  é o número total de elementos,  $n$  é o número de elementos com fronteira do tipo convecção e radiação  $\Gamma_h$  e o  $p$  é o número de elementos com fronteira do tipo adiabático  $\Gamma_q$ ,  $d\Gamma_h^e$  e  $d\Gamma_q^e$  representam elementos de área e  $d\Omega^e$  é o elemento de volume, (Barreira, 2008), (Fonseca, 1998).

Para concluir a substituição dos termos na equação 28, a função desconhecida, campo de temperaturas nodal, é aproximada no interior de cada elemento em função de funções de forma lineares,  $N$  conforme as expressões 32 e 33.

$$T = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) T_j(t) = \{T^e\} \quad (32)$$

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) \dot{T}_j(t) = \{\dot{T}^e\} \quad (33)$$

O método descrito, permite obter uma solução numérica para o cálculo do campo de temperaturas num domínio do problema, função da discretização da equação de calor e aplicação das condições de fronteira associadas.

No trabalho proposto, e considerando a acção do fogo, são consideradas as condições de fronteira relativas à presença da convecção, radiação e isolamento da estrutura. O coeficiente de transmissão de calor por convecção considerado, e de acordo com o (EN1991-1-2, 2002), para superfícies expostas ao fogo utilizando a curva ISO834 é igual a 25 [W/m<sup>2</sup>°C], sendo o valor da emissividade da superfície do elemento estrutural da madeira, igual a 0,8, conforme proposto no (EN1995-1-2, 2003), (Barreira, 2008).

## **Capítulo 4**

### Comportamento Térmico da Madeira

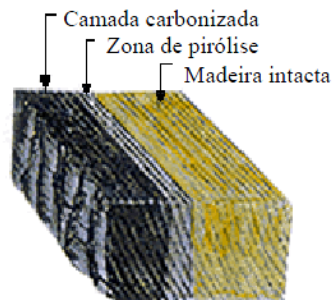
## 4. Comportamento Térmico da Madeira

A madeira tem baixa condutividade térmica, por este motivo, esta propriedade dificulta o aumento 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 de carbonização isolante, que dificulta a transmissão do calor e a progressão do fogo para o interior.

Sob a camada de carbonização, existe outra camada com uma espessura inferior, em que a madeira se encontra alterada, mas não se encontra totalmente decomposta. Esta camada é designada por pirólise. A restante secção encontra-se a uma temperatura mais baixa e mantém as capacidades mecânicas originais, contribuindo para a resistência da estrutura, (Barreira, 2008).

Na Figura 11 encontram-se as várias secções de madeira sujeitas a altas temperaturas.



**Figura 11** - Zonas de degradação numa secção de madeira (Barreira, 2008).

O comportamento térmico da madeira pode ser descrito através dos processos de formação da zona da pirólise e pela formação da camada de carbonização.

### 4.1 Pirólise

A degradação da madeira ocorre na ausência de oxigénio. Quando a madeira é aquecida até aos 100 [°C], ocorrem poucas reacções químicas. Aproximadamente aos 100 [°C] ocorre a evaporação da maior parte da humidade existente. Até aos 200 [°C], a camada superficial da madeira começa a ficar desidratada, libertando a restante humidade, calor e dióxido de carbono. Entre os 200 [°C] e os 280 [°C], a camada superficial deteriorada começa a deslocar-se para o interior da secção. Esta zona é sucedida por uma camada na qual a pirólise se

processa lentamente. A celulose da madeira começa a decompor-se no intervalo entre os 240 [°C] e os 380 [°C]. Entre os 280[°C] e os 500 [°C] ocorrem reacções exotérmicas, sob a forma de fumo, com a libertação de gases combustíveis e alcatrão, formando o carvão. Se a temperatura exceder os 500 [°C], pode dizer-se que a carbonização se encontra completa (Pinto, 2005).

## 4.2 Camada de carbonização da madeira

A velocidade de carbonização da madeira, em que esta passa de madeira intacta a carvão é uma propriedade que permite avaliar a sua resistência ao fogo. Esta velocidade pode ser baseada em modelos experimentais e teóricos. Esta velocidade é determinada pelo avanço da carbonização [mm/s], fazendo com que exista uma redução da secção, permitindo estudar o comportamento dos elementos estruturais em situação de incêndio.

O EC5 (EN1995-1-2, 2003), propõe uma equação de projecto, para determinar a evolução da espessura de carbonização  $d_{char,0}$  [mm], em estruturas não protegidas durante a exposição ao fogo normalizado ISO834, como mostra a equação 34.

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t \quad (34)$$

A profundidade de carbonização, depende da taxa de carbonização ao fogo normalizado  $\beta_0$  [mm/min] e do tempo de exposição ao fogo  $t$  [min]. No entanto, esta profundidade não contempla o arredondamento dos cantos e a fissuração. Para que sejam considerados esses efeitos, o regulamento propõe a expressão 35.

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (35)$$

O regulamento (EN1995-1-2, 2003) propõe ainda os valores a considerar para a taxa de carbonização, em função da massa específica e da tipologia da madeira, como se representa na tabela 8.

**Tabela 8** – Valores para a taxa de carbonização  $\beta_0$ , EC5.

Tipologia	Material	$\beta_0$	$\beta_n$
Softwood (Madeira macia)	MLC* $\rho \geq 290$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0,65	0,70
	Madeira maciça $\rho \geq 290$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0,65	0,80
Hardwood (Madeira estrutural)	MLC* ou Madeira maciça $\rho \geq 290$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0,65	0,70
	MLC* ou Madeira maciça $\rho \geq 450$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0,50	0,55

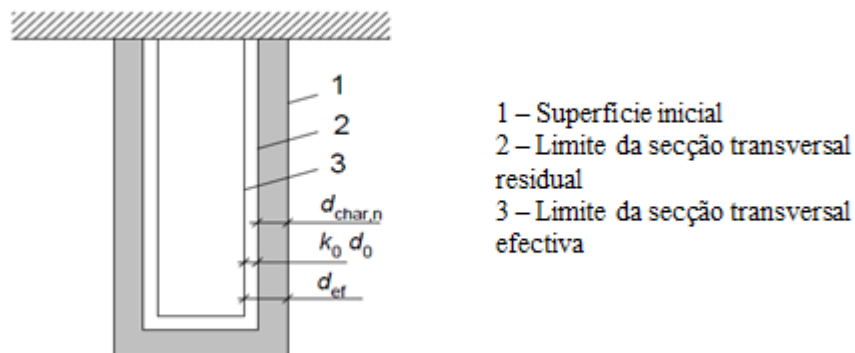
\*MLC - MADEIRA LAMINADA COLADA

### 4.3 Camada de carbonização efectiva

Como se pode verificar no capítulo anterior, 4.2, a espessura de carbonização é uma camada inicial, na qual não foi contabilizada a espessura resultado da pirólise. Segundo o EC5 (EN1995-1-2, 2003), a espessura de carbonização efectiva  $d_{ef}$  [mm] e para superfícies não protegidas, como mostra a figura 12, é calculada através da equação 36.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 = \beta_n \times t + k_0 \times d_0 \quad (36)$$

$d_0$  é igual a 7mm e o  $k_0$  é obtido em função dos valores que compõe a tabela 9.



**Figura 12** – secção reduzida (EN 1995-1-2, 2003).

**Tabela 9** - Valores para  $k_0$ , Ec5.

Tempo $t$	$k_0$
$t < 20$ minutos	$t/20$
$t \geq 20$ minutos	1,0

## 4.4 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas da madeira, que se encontram definidas no anexo B, do (EN1995-1-2, 2003), estão condicionadas pela temperatura ambiente, que se deve considerar com o valor de 20°C, pelo teor de humidade da madeira inicial de 12% e em condições de incêndio normalizado, independentemente da espécie de madeira.

As propriedades térmicas a definir são: a condutividade térmica, o calor específico e a massa específica.

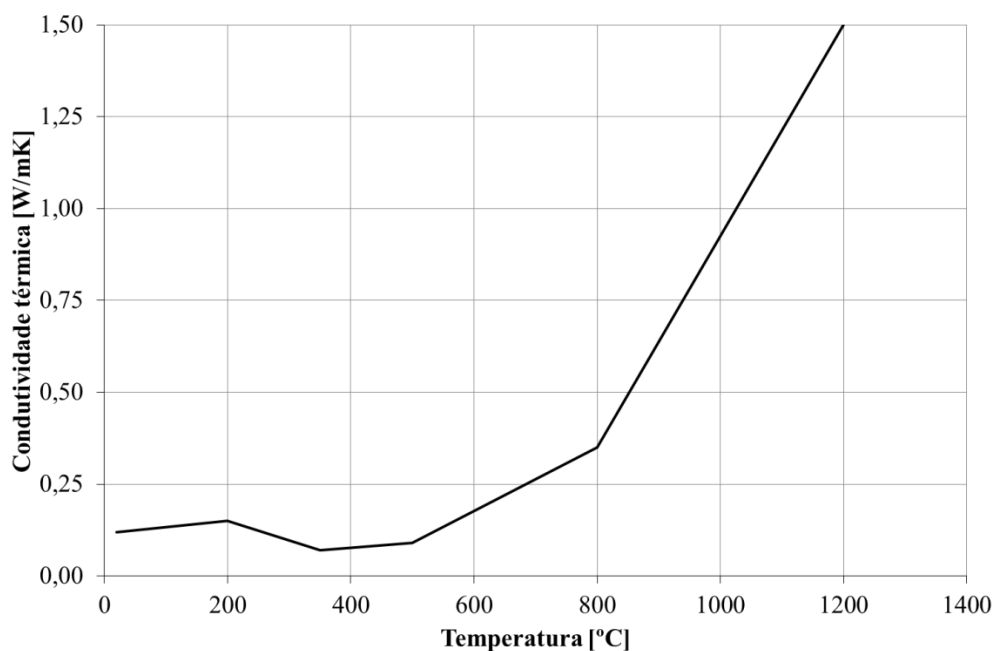
### 4.4.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica consiste na capacidade de um elemento conduzir o calor. Representa a taxa temporal de transmissão de energia, sob a forma de calor, através de um material (Moreschi, 2010). A proposta do EC5 relativamente à condutividade térmica é função de um intervalo de temperaturas, demonstrada na tabela 10:

**Tabela 10** – Condutividade térmica da madeira, EC5.

T - Temperatura [°C]	$\lambda$ – Condutividade térmica [W/mK]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

Com os dados da tabela anterior, pode verificar-se a evolução da temperatura, através do gráfico seguinte:



**Figura 13** - Condutividade térmica em função da temperatura.

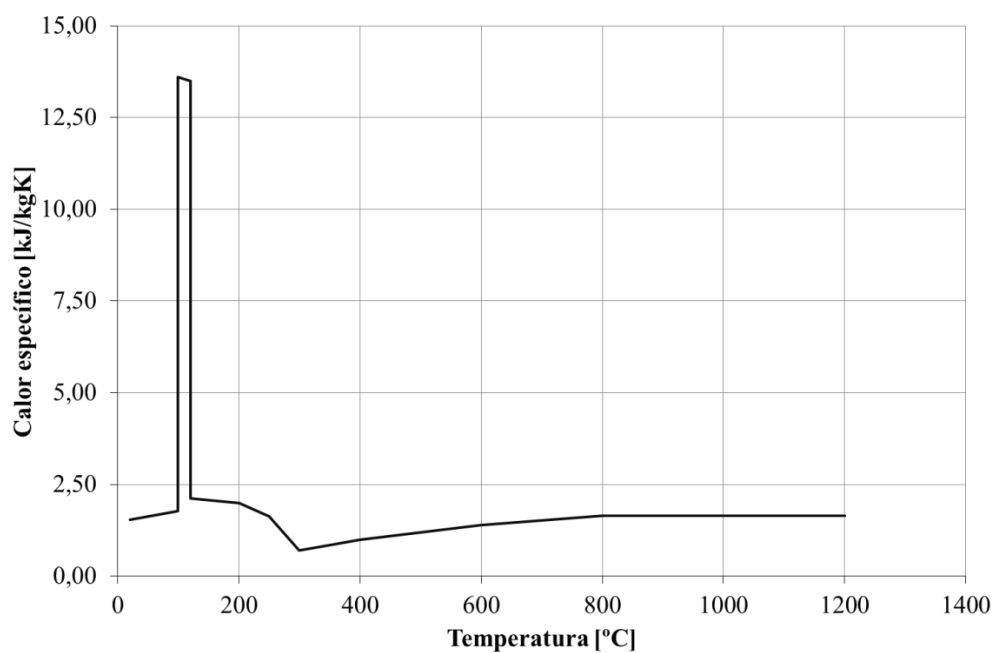
#### 4.4.2 Calor específico

O calor específico consiste na quantidade de calor que é necessário fornecer à unidade de massa de uma substância para elevar a sua temperatura de um grau. Define-se o calor específico a pressão constante representado por  $C_p$ , dependente da temperatura e do teor de humidade (Moreschi, 2010). Os valores propostos pelo EC5, estão representados na tabela 11:

**Tabela 11** – Calor específico EC5.

T - Temperatura [°C]	$C_p$ – 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

Com os resultados da tabela 11, pode verificar-se a evolução do calor específico em função da temperatura no gráfico da figura 14.



**Figura 14** - Calor específico em função da temperatura.

#### 4.4.3 Massa específica

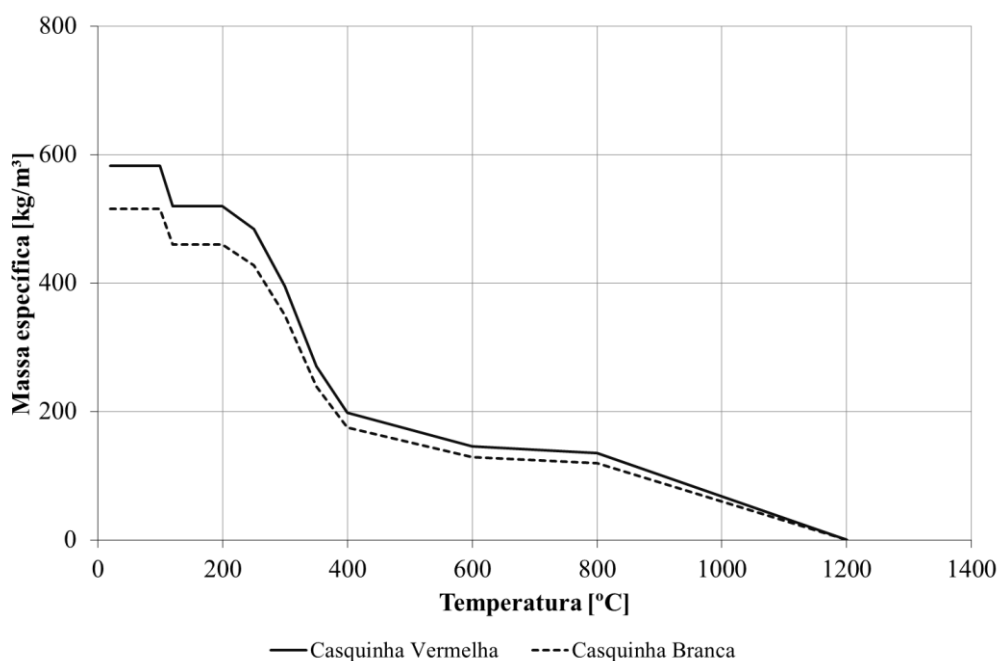
A massa específica consiste na relação entre a massa de um elemento e o volume que ocupa. No caso das madeiras, este parâmetro está intimamente associado ao teor de humidade (Moreschi, 2010). A taxa de densidade é dada em função da tabela 12, considerando um teor de humidade inicial de 12%.

**Tabela 12** - Taxa de densidade em função da temperatura EC5.

T - Temperatura [°C]	Taxa de Densidade
20	1+w
99	1+w
99	1+w
120	1,00
120	1,00
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0,00

Para as espécies em estudo, a massa específica ( $\rho$ ) para a espécie casquinha vermelha e casquinha branca é de  $520 \text{ kg/m}^3$  e  $460 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente (White, et al., 1999).

O gráfico da figura seguinte, representa a massa específica de cada uma das espécies de madeira em estudo.



**Figura 15** - Gráfico da massa específica associada a cada uma das espécies.

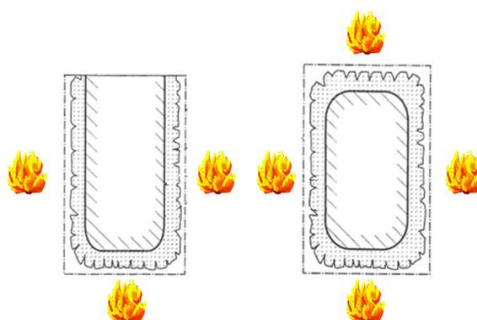
## **Capítulo 5**

### **Modelo Computacional para Avaliação Térmica**

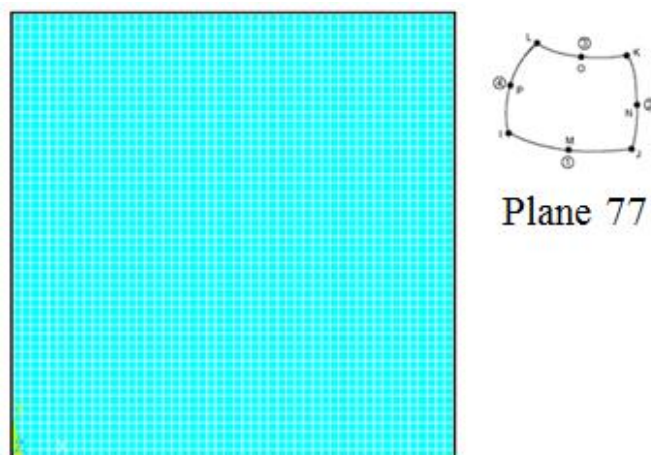
## 5. Modelo Computacional para Avaliação Térmica

O método de elementos finitos é muito utilizado para aproximação de soluções numéricas das equações diferenciais. Por esse motivo, a formulação de elementos finitos deve ser realizada com recurso a sistemas computacionais de elevado desempenho, como é o caso do programa de elementos finitos utilizado neste trabalho, o ANSYS®. No anexo 3 apresentam-se os ficheiros de código para esta análise.

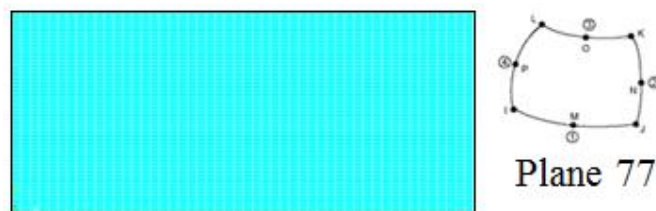
Um dos objectivos é determinar a espessura de carbonização em função do tempo, para várias secções, expostas a um cenário de incêndio se acordo com a curva ISO834. Foram efectuadas 36 simulações, para a casquinha branca e casquinha vermelha. Foram considerados dois cenários de incêndio diferentes para 3 e 4 lados de exposição de fogo em cada uma das secções, como mostra a figura 16. Foram consideradas as nove secções diferentes (tabela 5) para os valores de tempo de 15 [min], 30 [min], 45 [min] e 60 [min]. As figuras 17 e 18 representam malhas de elementos finitos para duas das secções em estudo. Foram utilizados elementos planos de 8 nós (Plane 77) com um grau de liberdade, relativo à temperatura.



**Figura 16** – Cenários de exposição ao fogo.



**Figura 17** – Malha de elementos finitos para a casquinha branca, seção 3.



**Figura 18** – Malha de elementos finitos para a casquinha vermelha, secção 5.

A espessura de carbonização é determinada através dos resultados obtidos pelo programa ANSYS®, através da verificação e do registo de temperaturas de 300 [°C], na fronteira que limita o núcleo frio da madeira, conforme proposto no EC5. Nos capítulos seguintes encontram-se as imagens dos resultados associados aos perfis de temperatura. Estas variam entre os 20 [°C] e os 300 [°C], considerando que a espessura que se encontra a cinza é a profundidade carbonizada, para cada secção em estudo, em que houve registos de temperaturas superiores a 300 [°C].

Com este estudo pretende-se determinar a velocidade de carbonização e a área reduzida após a exposição ao fogo. A velocidade de carbonização varia em função da espessura carbonizada, o tempo decorrido para atingir essa profundidade. A área reduzida da secção após a exposição ao fogo é obtida pela diferença entre a área inicial da secção e a redução sofrida após a carbonização.

Para cumprimento dos objectivos propostos, foi utilizado um modelo numérico para análise térmica em regime transiente, e utilização das propriedades dependentes da temperatura no domínio não-linear.

## **5.1 Casquinha branca**

Neste capítulo vão ser analisados os resultados obtidos para as nove secções em estudo de casquinha branca, para exposição de incêndio, nos vários intervalos de tempo.

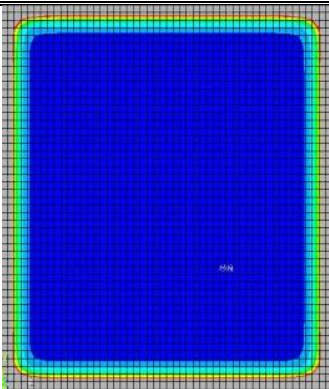
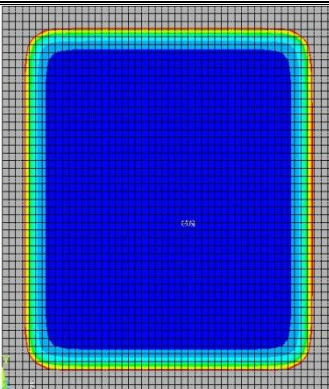
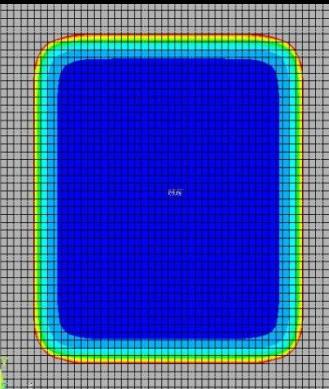
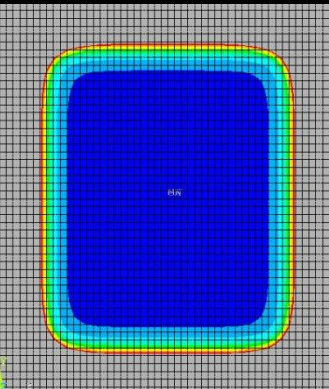
### **5.1.1 Secção exposta a incêndio a 4 lados**

Na tabela 13 encontra-se representado o perfil de temperaturas de uma das secções, como representativa do comportamento da casquinha branca exposta a fogo de 4 lados, para os valores de tempo de 15 [min], 30 [min], 45 [min] e 60 [min].

Foi adoptada a designação  $b_t$  para a espessura carbonizada na direcção tangencial e  $d_t$  na direcção vertical da secção em estudo, em que o sub-índice  $t$ , indica o intervalo de tempo em estudo.

O cálculo da velocidade de carbonização, resulta do valor da espessura carbonizada para o tempo de exposição ao fogo considerado, confirme se representa através de  $\beta_{bt}$  e  $\beta_{dt}$ , nas tabelas apresentadas.

**Tabela 13** – Espessura de carbonização para a casquinha branca secção 3 [mm], (fogo a 4 lados).

Após 15 min	Após 30 min
 <p><math>b_{(t=15)}=9,6</math> [mm] ; <math>d_{(t=15)}=9,8</math> [mm]  <math>\beta_{b(t=15)}=0,64</math> [mm/min] <math>\beta_{d(t=15)}=0,65</math> [mm/min]</p>	 <p><math>b_{(t=30)}=19,2</math> [mm] ; <math>d_{(t=30)}=19,6</math> [mm]  <math>\beta_{b(t=30)}=0,64</math> [mm/min] <math>\beta_{d(t=30)}=0,65</math> [mm/min]</p>
Após 45 min	Após 60 min
 <p><math>b_{(t=45)}=29,1</math> [mm] ; <math>d_{(t=45)}=28,7</math> [mm]  <math>\beta_{b(t=45)}=0,65</math> [mm/min] <math>\beta_{d(t=45)}=0,64</math> [mm/min]</p>	 <p><math>b_{(t=60)}=36,3</math> [mm] ; <math>d_{(t=60)}=36,8</math> [mm]  <math>\beta_{b(t=60)}=0,61</math> [mm/min] <math>\beta_{d(t=60)}=0,61</math> [mm/min]</p>

Para a secção 3, representada na tabela anterior a carbonização até aos 45 [min] foi-se mantendo constante. Nos 60 [min] existiu um abrandamento na velocidade de carbonização.

A velocidade média para cada secção sujeita a fogo nos 4 lados é representada na tabela 14, através dos valores médios para cada intervalo de tempo de estudo  $\bar{\beta}_t$ .

**Tabela 14** – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha branca, (fogo a 4 lados).

Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 4 lados			
			$\bar{\beta}_{(t=15)}$	$\bar{\beta}_{(t=30)}$	$\bar{\beta}_{(t=45)}$	$\bar{\beta}_{(t=60)}$
			[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]
1	230	350	0,55	0,65	0,62	0,61
2	250	350	0,68	0,65	0,63	0,62
3	300	350	0,65	0,65	0,64	0,61
4	230	250	0,55	0,65	0,64	0,62
5	250	250	0,63	0,65	0,64	0,63
6	300	250	0,66	0,64	0,65	0,62
7	230	100	0,54	0,69	0,72	0,88
8	250	100	0,65	0,68	0,73	0,88
9	300	100	0,67	0,68	0,72	0,87
<b>Velocidade Média [mm/min]</b>			0,62	0,66	0,67	0,70

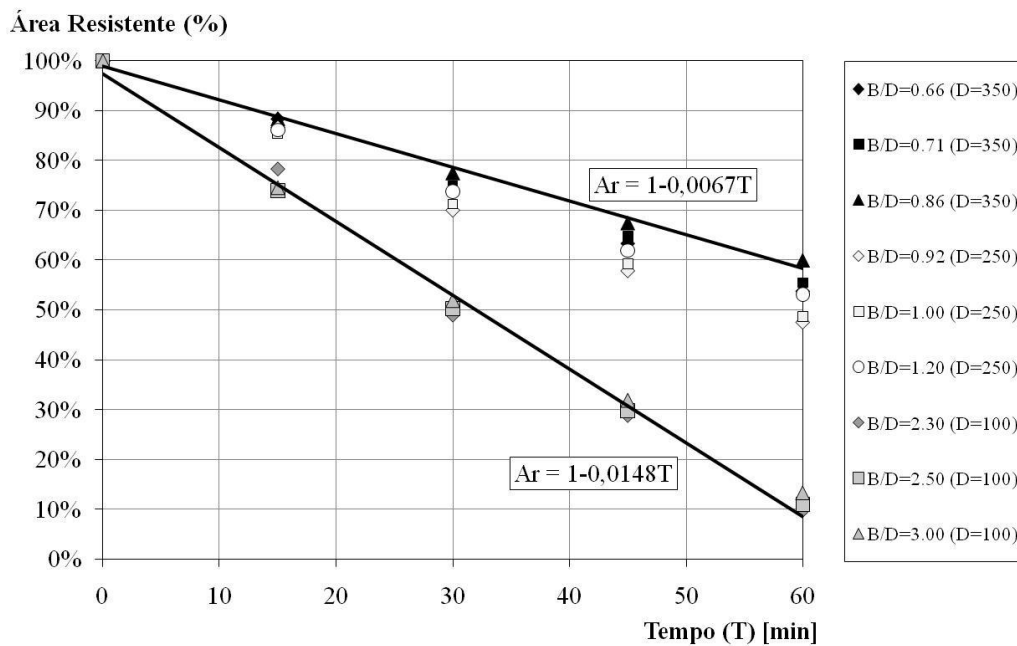
Analisando a tabela 14, pode concluir-se que para a secção mais alongada, com D mais elevado, a velocidade de carbonização nos primeiros 15 [min] é menor, começando a carbonizar mais rapidamente nos minutos seguintes; para a secção mais compacta, a velocidade de carbonização inicial é superior e diminui a partir dos 45 [min]. Efectuando a média dos valores obtidos por secção, pode-se verificar que a velocidade aumenta gradualmente.

Na tabela 15, encontram-se registadas as áreas resultantes das secções sujeitas a 4 lados de incêndio, para os vários intervalos de tempo.

**Tabela 15** – Resultados obtidos para cada secção em estudo de casquinha branca, (fogo 4 lados).

Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 4 lados			
			Ar 15 [min]	Ar 30 [min]	Ar 45 [min]	Ar 60 [min]
1	230	350	88%	74%	63%	54%
2	250	350	87%	75%	65%	55%
3	300	350	88%	77%	67%	60%
4	230	250	87%	70%	58%	48%
5	250	250	85%	71%	59%	49%
6	300	250	86%	74%	62%	53%
7	230	100	78%	49%	29%	10%
8	250	100	74%	50%	30%	11%
9	300	100	75%	52%	32%	13%

Interpretando os dados compilados na tabela anterior, pode verificar-se que para as secções 7, 8 e 9, ao fim de 60 [min], apenas 10% da secção se mantém intacta; para as restantes secções, ao atingir os 60 [min], cerca de 50% da secção mantém a resistência inicial. Os resultados obtidos podem ser representados em forma de gráfico, como demonstra a figura 19.



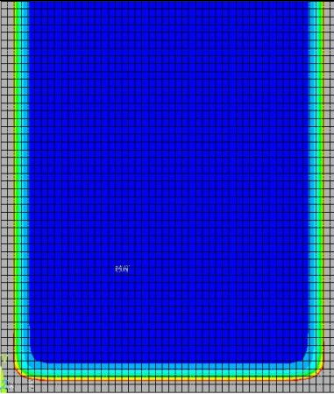
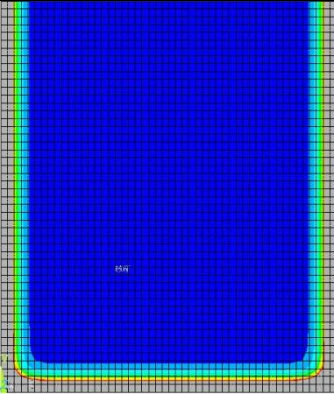
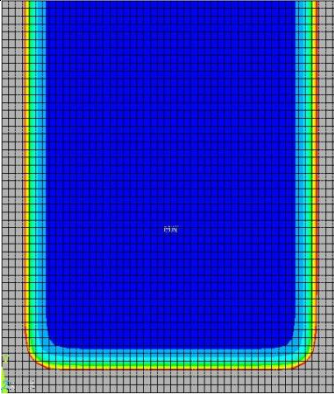
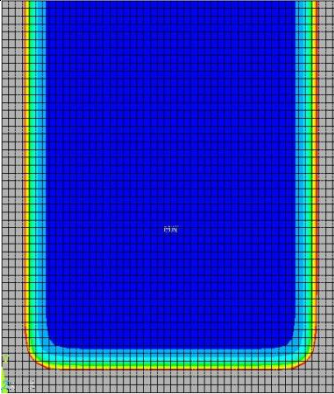
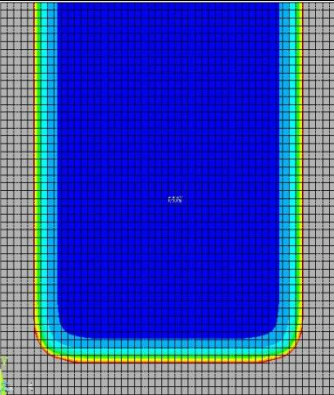
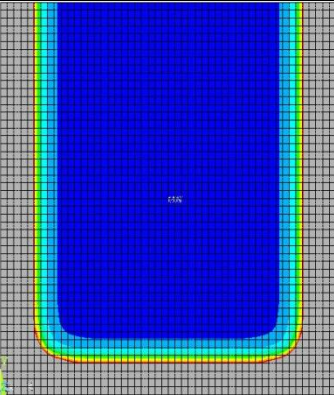
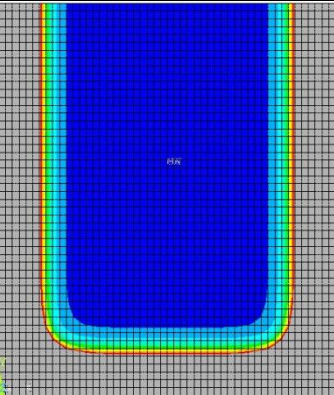
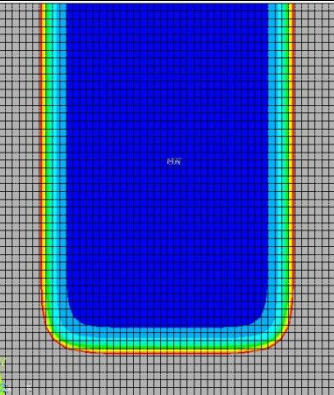
**Figura 19** - Área resistente para fogo a 4 lados com equação de área resultante.

Na figura anterior encontram-se representados os valores de área resultante para cada uma das secções de casquinha branca, e as respectivas linhas de tendência para equações de cálculo fácil. À medida que o tempo de exposição ao fogo aumenta, a área resistente da secção diminui. Para o mesmo tempo de exposição as secções mais esbeltas resistem muito mais.

### 5.1.2 Secção exposta a incêndio a 3 lados

Na tabela 16 encontra-se representado o perfil de temperaturas para a mesma secção representativa, do comportamento da casquinha branca exposta ao fogo em 3 lados, para os valores de tempo de 15 [min], 30 [min], 45 [min] e 60 [min].

**Tabela 16** – Espessura de carbonização para a casquinha branca secção 3 [mm], (fogo a 3 lados).

Após 15 min		Após 30 min	
			
$b_{(t=15)}=10,5$ [mm] ; $d_{(t=15)}=9,6$ [mm]		$b_{(t=30)}=19,5$ [mm] ; $d_{(t=30)}=19,6$ [mm]	
$\beta_{b(t=15)}=0,70$ [mm/min] $\beta_{d(t=15)}=0,64$ [mm/min]		$\beta_{b(t=30)}=0,65$ [mm/min] $\beta_{d(t=30)}=0,65$ [mm/min]	
Após 45 min		Após 60 min	
			
$b_{(t=45)}=28,5$ [mm] ; $d_{(t=45)}=27,7$ [mm]		$b_{(t=60)}=36,6$ [mm] ; $d_{(t=60)}=36,4$ [mm]	
$\beta_{b(t=45)}=0,63$ [mm/min] $\beta_{d(t=45)}=0,61$ [mm/min]		$\beta_{b(t=60)}=0,61$ [mm/min] $\beta_{d(t=60)}=0,61$ [mm/min]	

Na tabela anterior encontra-se representada uma secção em que a velocidade de carbonização é mais elevada nos primeiros 15 [min]. Nos instantes seguintes, existe um abrandamento. Para 60 [min], a velocidade de carbonização toma o mesmo valor, para esta secção, quando sujeita a 4 lados de exposição ao incêndio.

A velocidade média para todas as secções em estudo com fogo a 3 lados é mostrada na tabela 17:

**Tabela 17** – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha branca, (fogo a 3 lados).

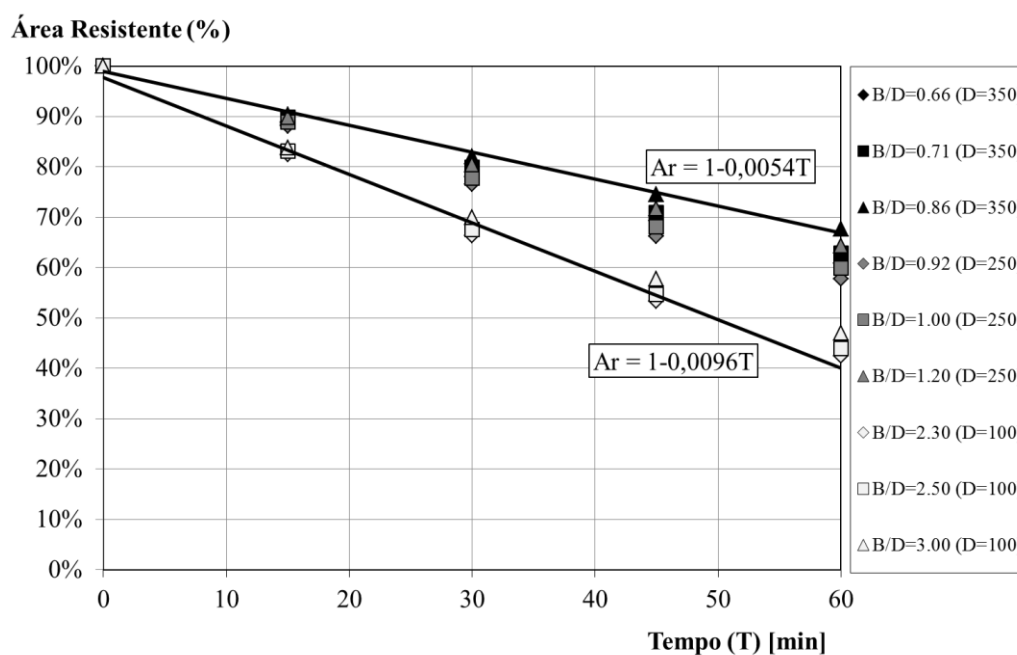
Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 3 lados			
			$\bar{\beta}_{(t=15)}$	$\bar{\beta}_{(t=30)}$	$\bar{\beta}_{(t=45)}$	$\bar{\beta}_{(t=60)}$
			[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]
1	230	350	0,66	0,66	0,62	0,61
2	250	350	0,64	0,65	0,63	0,61
3	300	350	0,67	0,65	0,62	0,61
4	230	250	0,64	0,65	0,64	0,62
5	250	250	0,63	0,65	0,64	0,62
6	300	250	0,65	0,65	0,64	0,62
7	230	100	0,66	0,66	0,64	0,62
8	250	100	0,65	0,66	0,64	0,62
9	300	100	0,67	0,65	0,64	0,62
<b>Velocidade Média [mm/min]</b>			0,65	0,65	0,63	0,62

Observando a tabela 17, pode-se concluir que, independentemente da secção em causa, não existe uma grande variação de velocidades de carbonização. Efectuando a média dos valores obtidos pode dizer-se que para os primeiros 30 [min] a velocidade mantém-se constante e para os valores de tempo seguintes, a velocidade tem uma ligeira tendência para diminuir. Na tabela 18, encontram-se registadas as áreas resultantes das secções sujeitas a 3 lados de incêndio, para os vários intervalos de tempo.

**Tabela 18** – Resultados obtidos para cada secção em estudo de casquinha branca (fogo a 3 lados).

Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 3 lados			
			Ar 15 [min]	Ar 30 [min]	Ar 45 [min]	Ar 60 [min]
1	230	350	89%	78%	69%	61%
2	250	350	90%	80%	71%	63%
3	300	350	90%	82%	75%	68%
4	230	250	88%	77%	66%	58%
5	250	250	89%	78%	68%	60%
6	300	250	90%	80%	72%	64%
7	230	100	82%	66%	53%	42%
8	250	100	83%	68%	55%	44%
9	300	100	84%	70%	58%	47%

Examinando os dados compilados na tabela anterior, pode verificar-se que para as secções 7, 8 e 9, ao fim de 60 [min], cerca de 45% da secção ainda se mantém intacta; e para as restantes secções, ao atingir os 60 [min], cerca de 60% da secção. De modo a representar os resultados obtidos foi elaborado um gráfico, como demonstra a figura 20.



**Figura 20** - Área resistente para fogo a 3 lados com equação de área resultante.

A figura anterior representa os valores de área resultante para cada uma das secções, e as respectivas linhas de tendência. As secções em estudo de casquinha branca, para fogo de 3 lados apresentam no geral 60 [min] de exposição com uma área resistente superior a 40%.

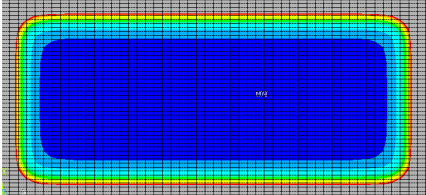
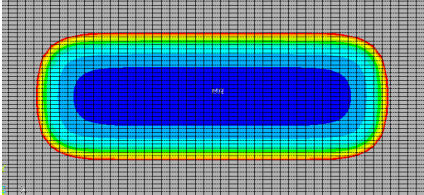
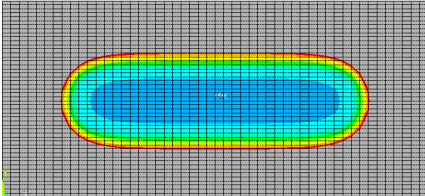
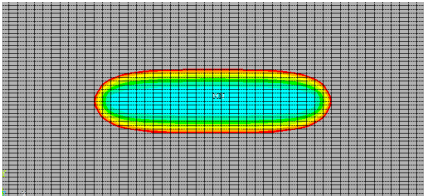
## 5.2 Casquinha vermelha

Neste capítulo vão ser analisados os resultados obtidos para as nove secções em estudo de casquinha vermelha para exposição de incêndio em vários intervalos de tempo.

### 5.2.1 Secção exposta a incêndio a 4 lados

Na tabela 19 encontra-se representado o perfil de temperaturas da secção 5, representativa do comportamento da casquinha vermelha exposta a fogo de 4 lados, para os valores de tempo de 15 [min], 30 [min], 45 [min] e 60 [min].

**Tabela 19** – Espessura de carbonização para a casquinha vermelha secção 5 [mm], (fogo a 4 lados).

Após 15 min	Após 30 min
	
$b_{(t=15)}=9,0$ [mm] ; $d_{(t=15)}=9,5$ [mm] $\beta_{b(t=15)}=0,6$ [mm/min] $\beta_{d(t=15)}=0,63$ [mm/min]	$b_{(t=30)}=18,9$ [mm] ; $d_{(t=30)}=18,7$ [mm] $\beta_{b(t=30)}=0,63$ [mm/min] $\beta_{d(t=30)}=0,62$ [mm/min]
Após 45 min	Após 60 min
	
$b_{(t=45)}=30,8$ [mm] ; $d_{(t=45)}=27,3$ [mm] $\beta_{b(t=45)}=0,69$ [mm/min] $\beta_{d(t=45)}=0,61$ [mm/min]	$b_{(t=60)}=49,5$ [mm] ; $d_{(t=60)}=35,3$ [mm] $\beta_{b(t=60)}=0,83$ [mm/min] $\beta_{d(t=60)}=0,59$ [mm/min]

A velocidade de carbonização mantém-se próxima com valores entre 0,6 e 0,62 [mm/min] nos primeiros 30 [min]. Esta velocidade aumenta na direcção horizontal para os intervalos de tempo entre 45 e 60 [min].

A velocidade média para cada secção sujeita a fogo a 4 lados é mostrada na tabela 20.

**Tabela 20** – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha vermelha, (fogo 4 lados).

Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 4 lados			
			$\bar{\beta}_{(t=15)}$	$\bar{\beta}_{(t=30)}$	$\bar{\beta}_{(t=45)}$	$\bar{\beta}_{(t=60)}$
			[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]
1	90	105	0,64	0,66	0,76	-
2	90	75	0,64	0,72	-	-
3	175	105	0,64	0,63	0,65	0,72
4	90	50	0,69	-	-	-
5	225	105	0,62	0,63	0,65	0,71
6	175	75	0,64	0,69	0,89	-
7	225	75	0,62	0,69	0,89	-
8	175	50	0,70	-	-	-
9	225	50	0,69	-	-	-
<b>Velocidade Média [mm/min]</b>			0,65	0,67	0,77	0,71

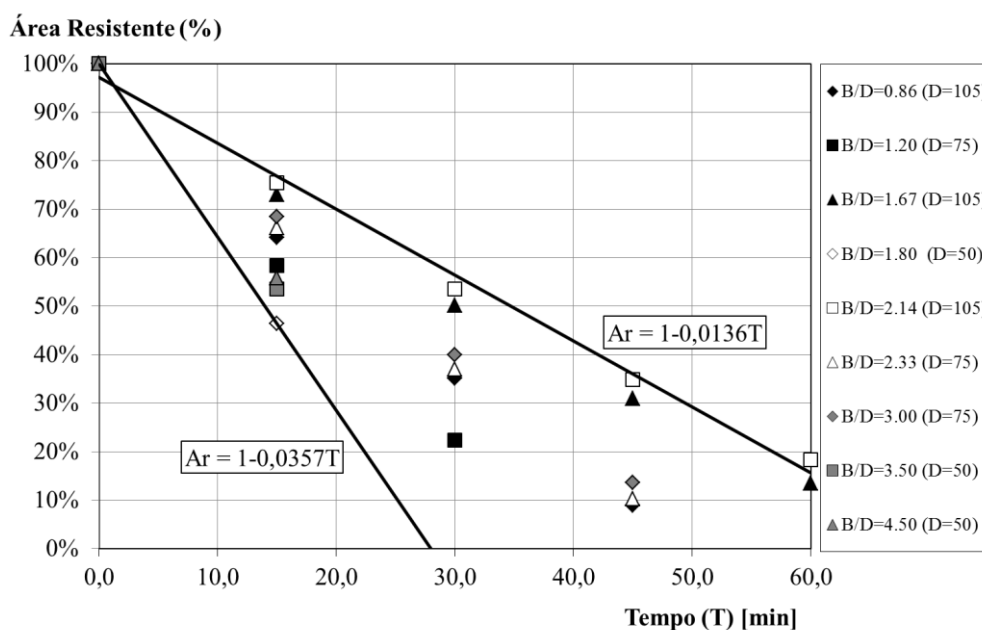
Analisando a tabela anterior, pode-se concluir que apenas a secção 3 e 5 de casquinha vermelha resistem aos 60 [min] de exposição a incêndio a 4 lados. A velocidade de carbonização aumenta à medida que o tempo vai passando. Verifica-se ainda que em determinadas secções não foi possível o registo da velocidade carbonizada, para tempos de exposição superiores a 15 [min]. Tal facto acontece nas secções mais reduzidas.

Na tabela 21, encontram-se registadas as áreas resultantes das secções sujeitas a 4 lados de incêndio, para os vários intervalos de tempo.

**Tabela 21** – Resultados obtidos para cada secção em estudo de casquinha vermelha, (fogo 4 lados).

Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 4 lados			
			Ar 15 [min]	Ar 30 [min]	Ar 45 [min]	Ar 60 [min]
1	90	105	64%	35%	9%	0%
2	90	75	58%	22%	0%	0%
3	175	105	73%	50%	31%	13%
4	90	50	46%	0%	0%	0%
5	225	105	75%	54%	35%	18%
6	175	75	66%	37%	10%	0%
7	225	75	68%	40%	14%	0%
8	175	50	54%	0%	0%	0%
9	225	50	56%	0%	0%	0%

Interpretando os dados compilados na tabela anterior, pode verificar-se que, para as secções 3, e 5, ao fim de 60 [min], apenas 13% e 18% da secção, respectivamente, se mantém intacta. As restantes secções não resistem a este tempo de exposição ao fogo. As 9 secções em estudo resistem, em geral, 15 [min] de actuação ao fogo, resultando numa secção resistente superior a 40% da sua área inicial. Para tempos de 30, 45 e 60 [min], há secções que não têm qualquer resistência ao fogo. De modo a representar os resultados obtidos foi elaborado um gráfico, como demonstra a figura 21 e as respectivas linhas de tendência.



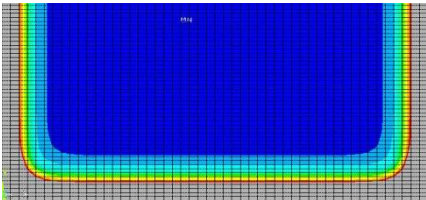
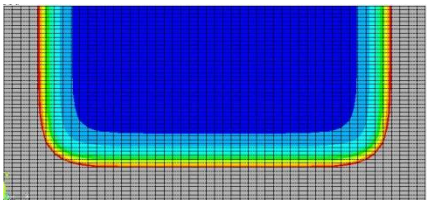
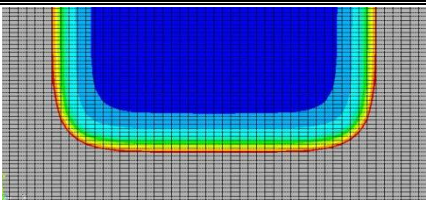
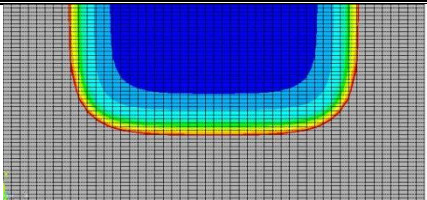
**Figura 21** - Área resistente para fogo a 4 lados com equação de área resultante.

Este gráfico permite facilmente determinar a área resistente de uma secção de casquinha vermelha para um determinado tempo de exposição ao fogo.

### 5.2.2 Secção exposta a incêndio a 3 lados

Na tabela 22 encontra-se representado o perfil de temperaturas da secção 5, representativa do comportamento da casquinha vermelha exposta a fogo de 3 lados, para os valores de tempo de 15 [min], 30 [min], 45 [min] e 60 [min].

**Tabela 22** – Espessura de carbonização para a casquinha vermelha secção 5 [mm], (fogo a 3 lados).

Após 15 min	Após 30 min
	
$b_{(t=15)}=8,8$ [mm] ; $d_{(t=15)}=9,5$ [mm] $\beta_{b(t=15)}=0,59$ [mm/min] $\beta_{d(t=15)}=0,63$ [mm/min]	$b_{(t=30)}=18,0$ [mm] ; $d_{(t=30)}=18,7$ [mm] $\beta_{b(t=30)}=0,6$ [mm/min] $\beta_{d(t=30)}=0,62$ [mm/min]
Após 45 min	Após 60 min
	
$b_{(t=45)}=26,6$ [mm] ; $d_{(t=45)}=26,9$ [mm] $\beta_{b(t=45)}=0,59$ [mm/min] $\beta_{d(t=45)}=0,6$ [mm/min]	$b_{(t=60)}=35,1$ [mm] ; $d_{(t=60)}=34,9$ [mm] $\beta_{b(t=60)}=0,59$ [mm/min] $\beta_{d(t=60)}=0,58$ [mm/min]

A velocidade de carbonização é mais elevada nos primeiros 15 [min]. Nos minutos seguintes, existe um abrandamento e para 60 [min], a velocidade de carbonização é inferior a 0,6 [mm/min].

A velocidade média para cada secção sujeita a fogo a 3 lados está representada na tabela 23.

**Tabela 23** – Velocidades médias obtidas para cada secção de casquinha vermelha, (fogo a 3 lados).

Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 3 lados			
			$\bar{\beta}_{(t=15)}$	$\bar{\beta}_{(t=30)}$	$\bar{\beta}_{(t=45)}$	$\bar{\beta}_{(t=60)}$
			[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]
1	90	105	0,64	0,65	0,70	0,94
2	90	75	0,62	0,65	0,71	-
3	175	105	0,64	0,63	0,61	0,59
4	90	50	0,63	0,66	0,78	-
5	225	105	0,61	0,61	0,59	0,58
6	175	75	0,6	0,59	0,60	0,61
7	225	75	0,61	0,61	0,60	0,60
8	175	50	0,64	0,64	0,66	0,76
9	225	50	0,62	0,63	0,66	0,75
<b>Vel. Média [mm/min]</b>			0,63	0,63	0,66	0,69

Observando a tabela 23, pode-se concluir que independentemente da secção em causa, não existe uma grande variação de velocidades de carbonização. Efectuando a média dos valores obtidos pode dizer-se que para os primeiros 30 [min] a velocidade mantém-se constante e para os valores de tempo seguintes, a velocidade aumenta gradualmente.

As áreas resultantes das secções sujeitas a 3 lados de incêndio, para os vários intervalos de tempo, encontram-se registadas na tabela 24.

**Tabela 24** – Resultados obtidos para cada secção em estudo, (fogo a 3 lados).

Secção	B [mm]	D [mm]	Fogo a 3 lados			
			Ar 15 [min]	Ar 30 [min]	Ar 45 [min]	Ar 60 [min]
1	90	105	71%	47%	26%	5%
2	90	75	69%	43%	20%	0%
3	175	105	81%	64%	51%	40%
4	90	50	64%	34%	7%	0%
5	225	105	84%	69%	57%	46%
6	175	75	78%	61%	44%	30%
7	225	75	81%	63%	49%	36%
8	175	50	72%	49%	29%	10%
9	225	50	75%	52%	33%	15%

Nas secções em estudo as que tem menor resistencia ao fogo são as secções 1, 2, 4, 8 e 9, por representarem uma área resultante inferior a 15%. A figura seguinte representa os resultados obtidos, e as respectivas linhas de tendência.

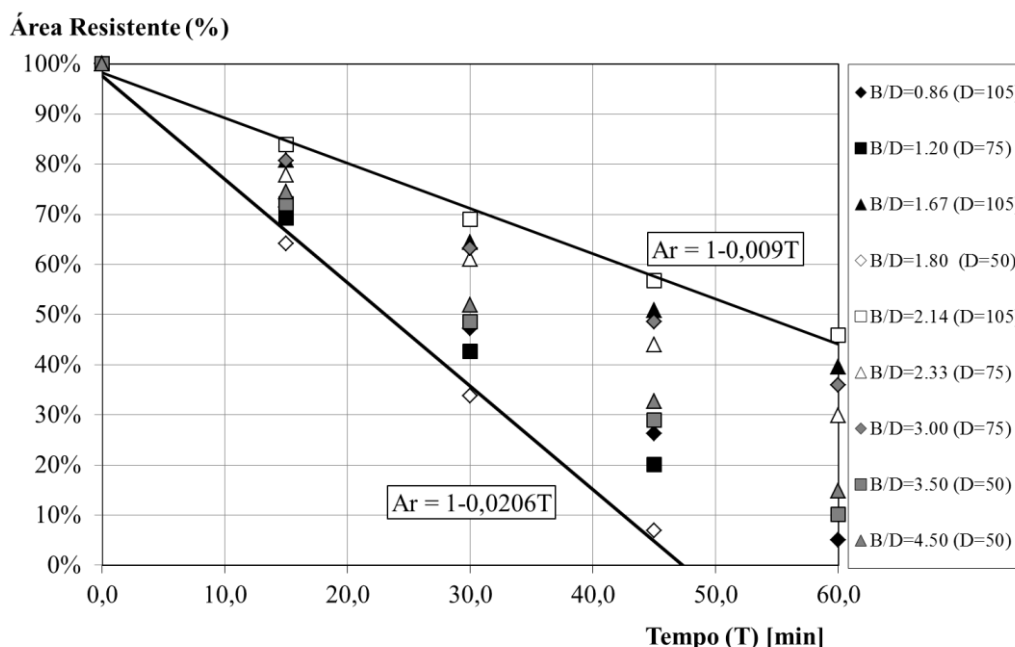


Figura 22 - Área resistente para fogo a 3 lados com equação de área resultante.

### 5.3 Comparação da velocidade média de carbonização

Após a análise das várias simulações efectuadas, é necessário comparar os resultados obtidos numericamente com a velocidade de carbonização disponibilizada pelo EC5 (EN1995-1-2, 2003). Esta comparação vai ser apresentada de forma sucinta na tabela 25.

Tabela 25- Comparação da velocidade média de carbonização  $\beta$ .

Espécies	4 Lados Ansys [mm/min]	3 Lados Ansys [mm/min]	Eurocódigo 5 [mm/min]
Casquinha Branca	0,66	0,64	0,65
Casquinha Vermelha	0,70	0,65	0,65

Analisando a última tabela podemos verificar que quando as secções se encontram sujeitas a incêndio por 3 lados, a velocidade média de carbonização é muito semelhante com o valor fornecido pelo EC5. Quando as secções se encontram expostas a incêndio em 4 lados,

verifica-se que a casquinha branca mantém a proximidade com o valor de referência do EC5, enquanto que a casquinha vermelha toma valores superiores. Esta diferença deve-se à geometria da secção e às propriedades da espécie.

Com base no cálculo da velocidade de carbonização é possível obter facilmente a espessura carbonizada para determinada secção, conforme a expressão:

$$d = \beta t \quad (37)$$

Onde  $d$  representa a espessura em [mm],  $\beta$  a velocidade de carbonização em [mm/min] e  $t$  é o tempo de exposição em [min].

## **Capítulo 6**

### Comportamento Mecânico da Madeira

## 6. Comportamento Mecânico da Madeira

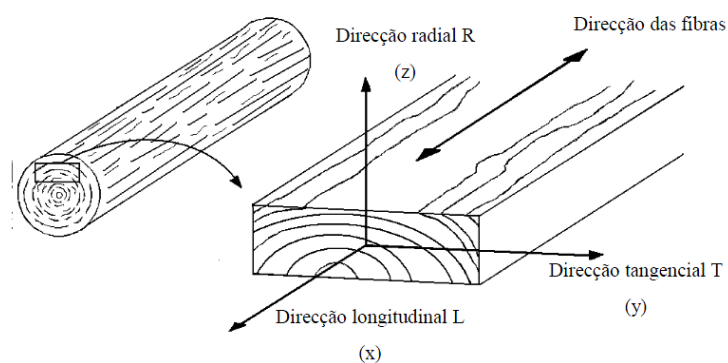
As propriedades mecânicas da maioria dos materiais são isotrópicas. No caso da madeira, mesmo que se tratem de amostras sem defeitos, é constituída por uma sobreposição sucessiva de camadas curvas concêntricas de dois componentes de massas específicas diferentes e é formada por fibras orientadas numa direcção preferencial. A orientação longitudinal, paralela às fibras, não é perfeitamente paralela ao eixo de simetria representado pelo eixo do tronco. Pode então concluir-se que a madeira é um material anisotrópico. Devido a esta característica, considera-se que para cada direcção existem módulos de elasticidade à tracção e à compressão diferentes, módulos de corte e coeficientes de Poisson.

Além das variações quanto à direcção do grão e dos anéis de crescimento, quando a madeira se encontra submetida a uma situação de acidente, ou seja, quando submetida a uma situação de incêndio, as propriedades mecânicas dependem também da temperatura, (Santos, 2007).

As propriedades mecânicas apresentadas neste capítulo foram obtidas de forma empírica através de ensaios realizados em provetes de madeira limpa (sem existência de nós, imperfeições ou fendas) e de grão contínuo, (White, et al., 1999).

### 6.1 A madeira como material ortotrópico

A madeira pode ser descrita como um material ortotrópico por se considerar que as suas propriedades coincidem com as direcções dos três eixos perpendiculares entre si, como representa a figura 23.



**Figura 23** – Eixos respeitantes à direcção do grão e anéis de crescimento, (Barreira, 2008).

O eixo longitudinal L é paralelo às fibras, o eixo radial R é paralelo aos anéis de crescimento e perpendicular ao grão na direcção radial e o eixo tangencial T é perpendicular ao grão e tangente aos anéis de crescimento, figura 23, (White, et al., 1999).

Nos subcapítulos posteriores vai ser verificado que a diferença entre as propriedades associadas às direcções radial e tangencial não é relevante devido à predominância das propriedades na direcção longitudinal.

## 6.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços de natureza mecânica. Estas resultam das propriedades anisotrópicas e da heterogeneidade do material lenhoso, (Pereira, 2009).

A lei constitutiva pretende ligar as forças aplicadas a um corpo aos movimentos que essas forças provocam no material que o constitui, ou seja, pretende determinar as relações entre as tensões e as extensões. Esta lei pode ser descrita por um tensor.

O modelo mais simples que estipula que a extensão é proporcional à tensão que a provoca é o modelo definido por Robert Hooke.

A lei de Hooke generalizada é aplicada a estes materiais seguindo um modelo constitutivo de acordo com a expressão 38.

$$\{\varepsilon\} = [D^{-1}]\{\sigma\} \quad (38)$$

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

Tratando-se das direcções de simetria, as componentes normais do tensor das tensões não produzem distorções e as componentes tangenciais só produzem distorção no plano em que actuam. Pode assim definir-se doze constantes elásticas (três módulos de elasticidade:  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$ ; três módulos de corte:  $G_{xy}$ ,  $G_{xz}$  e  $G_{yz}$  e seis coeficientes de Poisson:  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$ ,  $\nu_{xz}$ ,  $\nu_{zx}$ ,  $\nu_{yz}$ , e  $\nu_{zy}$ ). Estas constantes, apenas nove são independentes, pois pode aplicar-se o teorema de Maxwell aos três pares de direcções de ortotropia obtendo-se as relações como mostra a equação seguinte, conforme (Silva, 2004).

$$\frac{v_{xy}}{E_x} = \frac{v_{yx}}{E_y}; \quad \frac{v_{xz}}{E_x} = \frac{v_{zx}}{E_z}; \quad \frac{v_{yz}}{E_y} = \frac{v_{zy}}{E_z} \quad (39)$$

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

$$\{D^{-1}\} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -v_{LT}/E_L & -v_{LT}/E_L & 0 & 0 & 0 \\ -v_{TL}/E_T & 1/E_T & -v_{TR}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -v_{RL}/E_R & -v_{LT}/E_R & 1/E_R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{TR} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{bmatrix} \quad (40)$$

As direcções principais do estado de tensão e de deformação não coincidem, (Silva, 2004).

As propriedades mecânicas associadas à máxima tensão e ao módulo de elasticidade, necessárias ao estudo de cada espécie, para uma temperatura de 20 [°C] encontram-se representadas na tabela 26 (White, et al., 1999).

**Tabela 26** – Propriedades mecânicas das espécies em estudo.

Espécie	Humidade	Máxima tensão,	Módulo de elasticidade,
		$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$E_L$ [MPa]
Casquinha Branca	12%	40,0	10300
Casquinha Vermelha	12%	42,4	9200

O valor do módulo de elasticidade está de acordo com a norma EN 338 para as classes de resistência das espécies escolhidas C18/C24.

### 6.2.1 Propriedades de rigidez

O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. E pode ser obtido através da razão entre a tensão e a deformação.

O módulo de corte é definido entre a tensão de corte e a sua deformação específica. Pode ainda ser obtido pela relação entre o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, (Silva, 2004).

As relações existentes entre estes dois módulos encontram-se na tabela 27, propostas por (White, et al., 1999).

**Tabela 27** – Razões elásticas das espécies em estudo para a humidade de 12%.

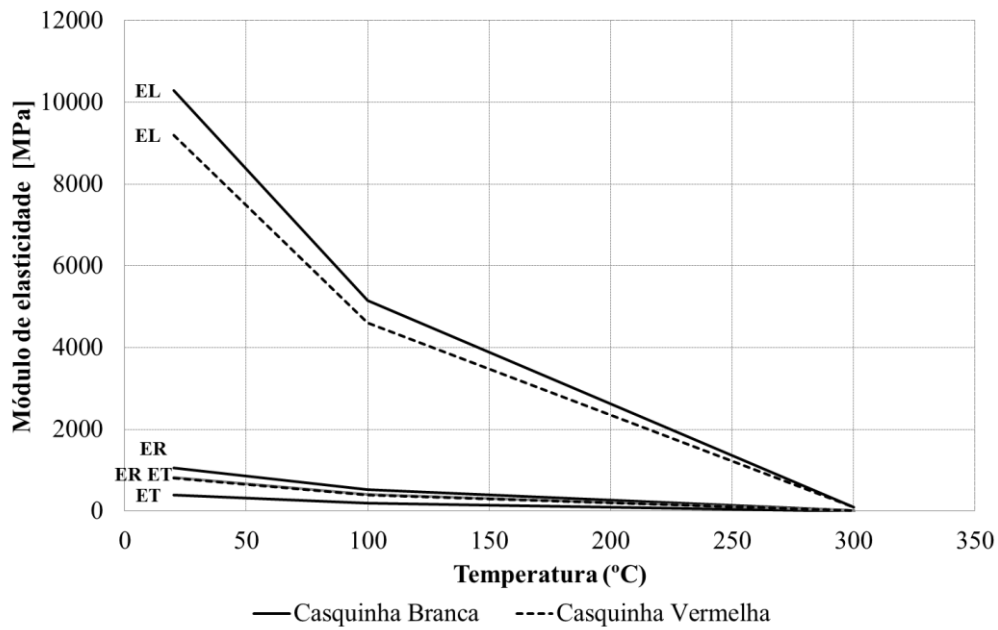
<b>Espécie</b>	<b><math>E_T/E_L</math></b>	<b><math>E_R/E_L</math></b>	<b><math>G_{LR}/E_L</math></b>	<b><math>G_{LT}/E_L</math></b>	<b><math>G_{RT}/E_L</math></b>
Casquinha branca	0,039	0,0102	0,070	0,058	0,006
Casquinha vermelha	0,089	0,087	0,066	0,077	0,011

Na presença do aumento de temperaturas, as propriedades mecânicas do material vão-se degradando. Segundo o regulamento (EN1995-1-2, 2003), encontram-se estipulados os valores do factor de redução. Na tabela 28, encontram-se os valores dos módulos de elasticidade e de corte em função da temperatura.

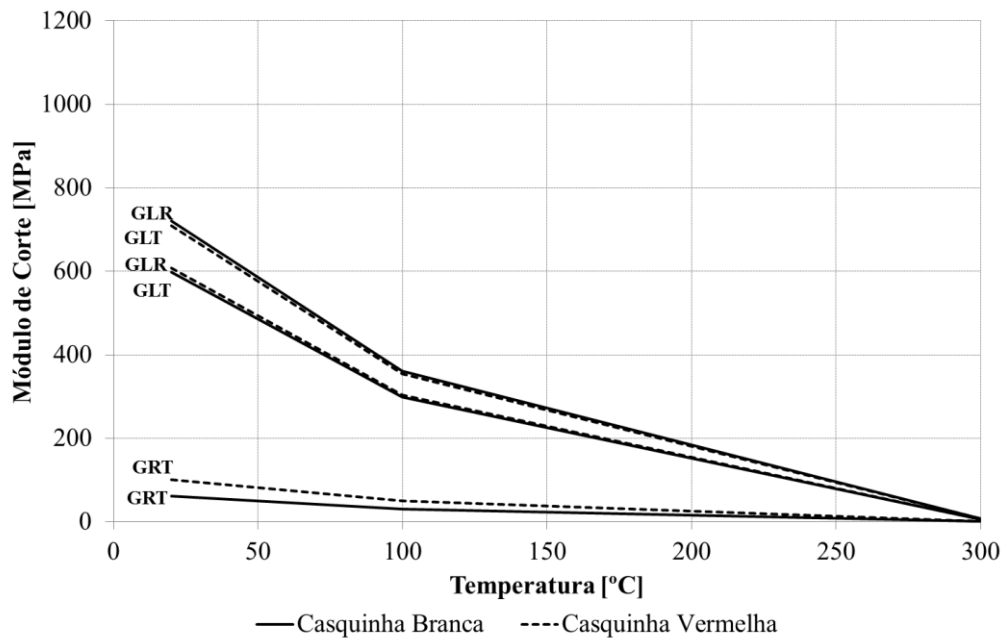
**Tabela 28** – Valores dos módulos de elasticidade e dos módulos de corte.

<b>Espécie</b>	<b>T [°C]</b>	<b><math>K_T</math></b>	<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>			<b>Módulo de corte [MPa]</b>		
			<b><math>E_L</math></b>	<b><math>E_T</math></b>	<b><math>E_R</math></b>	<b><math>G_{LR}</math></b>	<b><math>G_{LT}</math></b>	<b><math>G_{RT}</math></b>
Casquinha branca	20	1,00	10300,00	401,70	1050,60	721,00	597,40	61,08
	100	0,50	5150,00	200,85	525,30	360,50	298,70	30,90
	300	0,01	103,00	4,02	10,51	7,21	5,97	0,62
Casquinha vermelha	20	1,00	9200,00	818,80	800,40	607,20	708,40	101,20
	100	0,50	4600,00	409,40	400,20	303,60	354,20	50,60
	300	0,01	92,00	8,19	8,00	6,07	7,08	1,01

Nas figuras 24 e 25 encontram-se representadas a evolução do módulo de elasticidade nas direcções longitudinal, radial e tangencial e do módulo de corte em função dos planos longitudinal-radial, longitudinal-tangencial e radial-tangencial, respectivamente, função do aumento da temperatura.



**Figura 24** – Representação dos módulos de elasticidade.



**Figura 25** - Representação dos módulos de corte.

Como se pode verificar na figura 24, o módulo de elasticidade predominante está associado à direcção longitudinal da peça. Para a figura 25 os módulos de corte, cujo valor é preponderante estão associados com a direcção longitudinal, conjugado com as direcções radial e tangencial. À temperatura ambiente, a madeira mantém as suas propriedades,

degradando-se à medida que a temperatura aumenta. Considera-se que a partir dos 300 [°C], a madeira não tem capacidade resistente.

### 6.2.2 Coeficiente de Poisson

Um material ortotrópico, como a madeira, tem direcções preferidas de forças que são mutuamente perpendiculares. O coeficiente de Poisson varia com a espécie e de acordo com o teor de humidade existente no material. Na tabela 29 encontram-se representados os valores sugeridos por (White, et al., 1999), para o coeficiente de Poisson.

**Tabela 29** - Representação dos coeficientes de Poisson.

Espécies	Coeficientes de Poisson		
	$\nu_{LR}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{RT}$
Casquinha Branca	0,341	0,332	0,437
Casquinha Vermelha	0,360	0,346	0,373

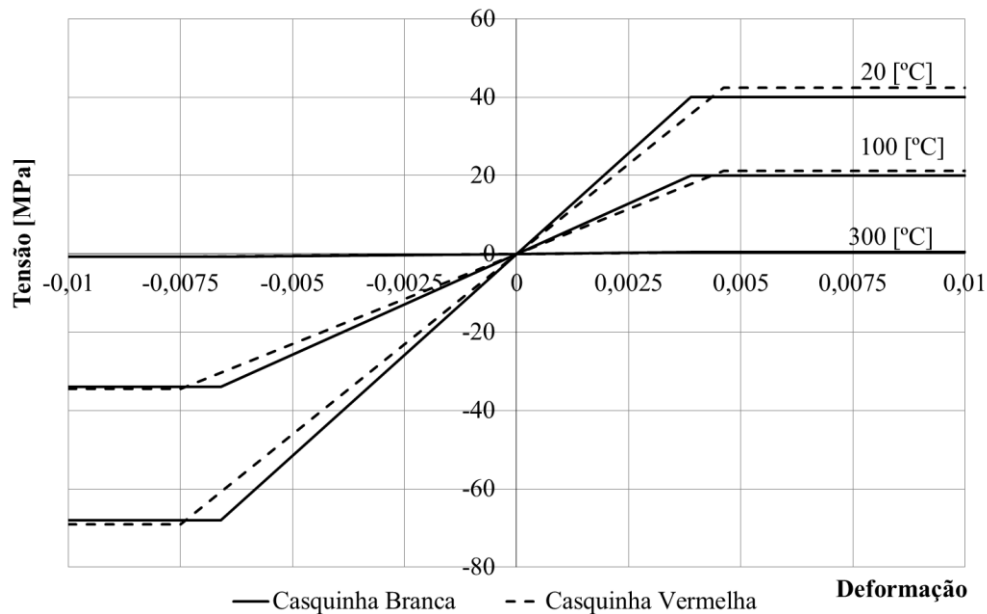
### 6.2.3 Propriedades de resistência

Os valores de tensão à compressão e tracção paralelas às fibras, são obtidas pela consulta dos valores propostos por (White, et al., 1999), que dependem da espécie. Estes valores são válidos para a temperatura ambiente a 20 [°C], encontrando-se representados na tabela 30. Utilizando os factores de redução, é possível obter os valores em função da temperatura.

**Tabela 30** - Representação das tensões devido à compressão e à tracção.

Espécie	T [°C]	$K_T$	Tensão à Compressão	Tensão à Tracção
			[MPa]	[MPa]
Casquinha Branca	20	1,00	40,00	68,00
	100	0,50	20,00	34,00
	300	0,01	0,40	0,68
Casquinha Vermelha	20	1,00	42,40	69,00
	100	0,50	21,20	34,50
	300	0,01	0,424	0,69

Na figura seguinte encontram-se representadas as curvas de tensão-deformação das duas espécies em estudo, em função da temperatura.



**Figura 26** - Tensão/Deformação para as várias temperaturas.

Analisando a figura anterior, as propriedades de resistência dos materiais diminuem com o aumento de temperatura. Estas curvas são importantes para a utilização na análise térmica nos modelos em estudo.

#### 6.2.4 Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica é um valor que permite verificar a mudança de dimensão causada pela alteração da temperatura. A expansão térmica da madeira seca é positiva em todas as suas direcções. A madeira expande quando aquecida e contrai quando arrefecida. O coeficiente de expansão linear paralelo às fibras, da madeira seca, não varia com a espécie e considera-se  $\alpha=3 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ , (Winandy, 1994).

## **Capítulo 7**

### **Modelo Computacional para Avaliação Mecânica**

## 7. Modelo Computacional para Avaliação Mecânica

A madeira é um corpo que dilata e contrai com a variação da temperatura, fazendo com que as suas propriedades também se alterem. Esta perda de capacidade resistente deve-se ao facto da madeira ser um material anisotrópico, ou seja, quando uma peça é sujeita à temperatura, a sua influência vai ser diferente, mesmo que se trate da mesma secção. Essa variação vai produzir tensões térmicas na peça.

Quando a peça além de estar exposta a uma situação de incêndio, estiver a ser solicitada por uma carga mecânica, vai produzir um aumento de tensões instaladas.

### 7.1 Modelo numérico termo-mecânico

Pretende-se analisar numericamente, o comportamento térmico e mecânico de vigas simplesmente apoiadas como mostra a figura 27, submetidas à acção do fogo, representadas na figura 28. As variações das propriedades consideradas estão de acordo com a regulamentação existente (EN1995-1-2, 2003).

Foram realizadas diferentes simulações com os seguintes objectivos:

- Avaliar o comportamento mecânico de uma viga sujeita unicamente a uma carga mecânica uniformemente distribuída de 0,5 [kN/m].
- Avaliar a capacidade resistente de uma viga sujeita a uma carga mecânica uniformemente distribuída de 0,5 [kN/m], simultaneamente com o efeito da acção térmica por exposição ao fogo.

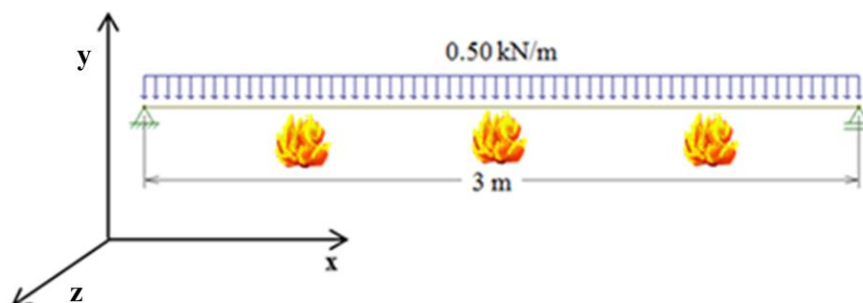
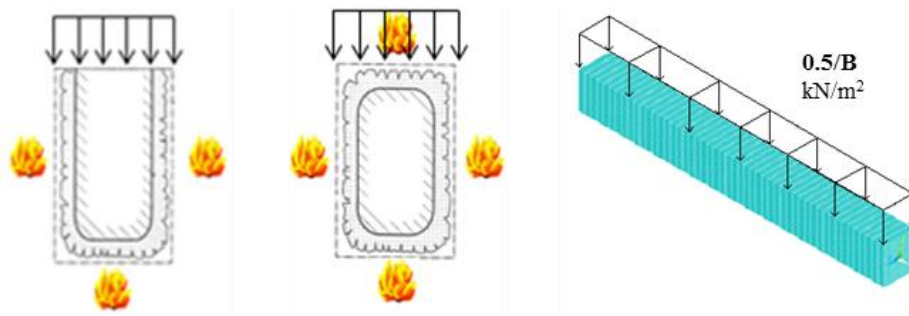


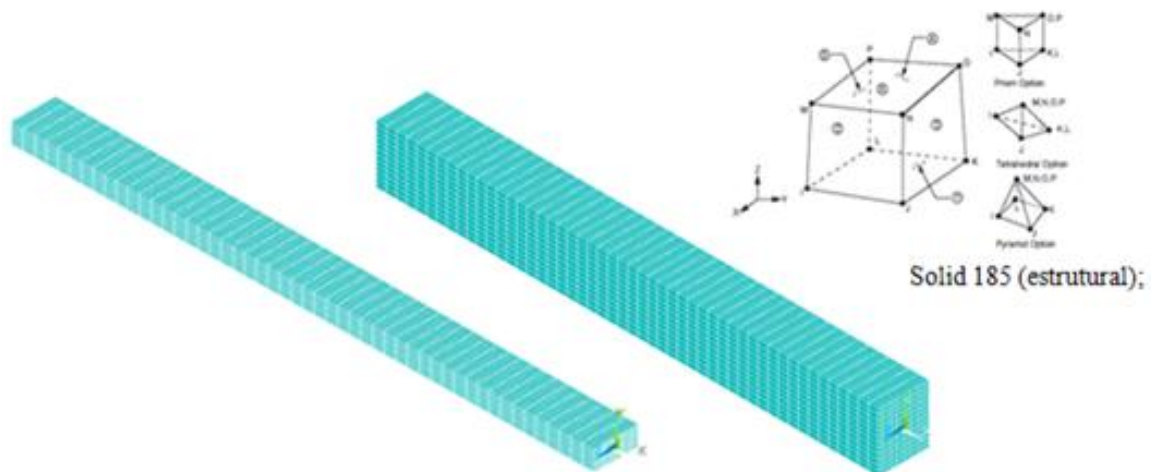
Figura 27 – Viga simplesmente apoiada.



**Figura 28** – Esquema do perfil da viga sujeita à carga mecânica e à carga térmica.

Estudaram-se as secções 2 e 3 para a casquinha branca e as secções 3 e 5 para a casquinha vermelha, sujeitas à situação de incêndio de 3 e 4 lados, para 0 [min], 15 [min], 30 [min], 45 [min] e 60 [min].

Nestas simulações, é utilizado um elemento finito sólido térmico e um elemento finito sólido estrutural de 8 nós, figura 29. No anexo 3 apresentam-se os ficheiros de código para este tipo de análise.



**Figura 29** – Malha de elementos finitos para a casquinha branca e para a casquinha vermelha.

### 7.1.1 Casquinha branca

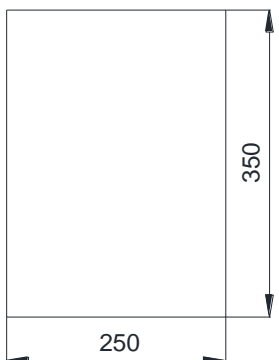
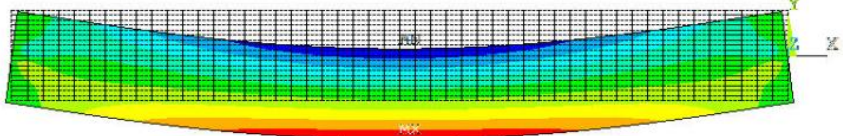
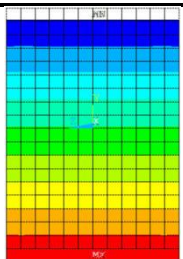
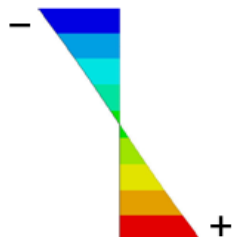
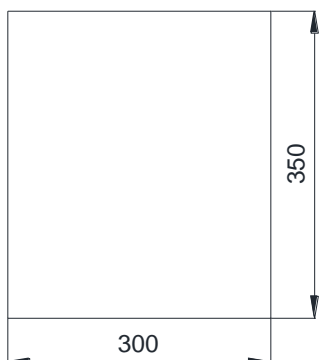
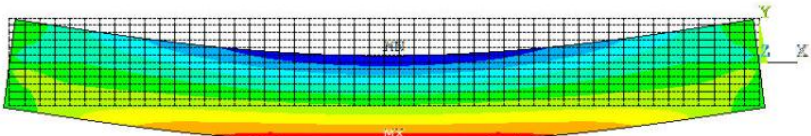
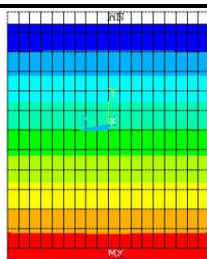
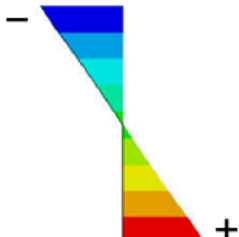
Neste capítulo vão ser analisadas as tensões obtidas para as duas secções em estudo de casquinha branca, sujeitas:

- i. A uma carga linear uniformemente distribuída;
- ii. À exposição de incêndio durante vários intervalos de tempo em simultâneo com uma carga mecânica.

### 7.1.1.1 Tensões função da carga mecânica

Na tabela 31, encontra-se a deformada e a gama de tensões a meio vão provocadas pelo carregamento mecânico.

**Tabela 31** – Resultados numéricos para a casquinha branca.

Secção	Deformada
<p>Secção 2</p> 	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Tensões a meio vão</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Diagrama de tensões</p>  </div> </div> <p>Tensão máxima/mínima: ± 110,97 [kPa]</p>
<p>Secção 3</p> 	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Tensões a meio vão</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Diagrama de tensões</p>  </div> </div> <p>Tensão máxima/mínima: ± 91,67 [kPa]</p>

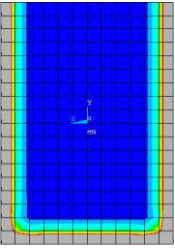
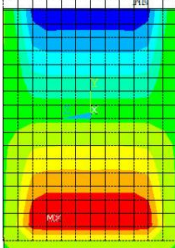
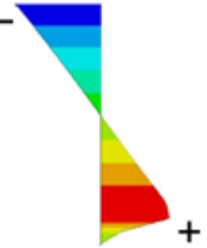
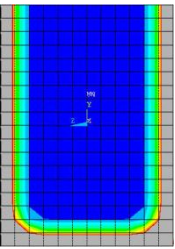
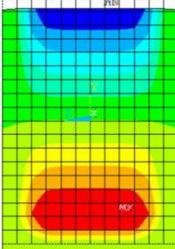

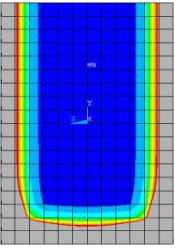
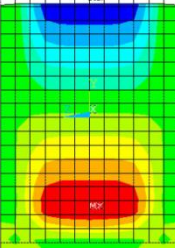

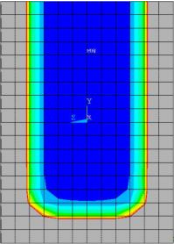
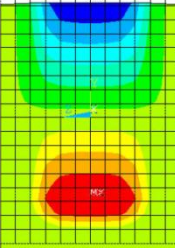

### 7.1.1.2 Tensões função da temperatura de incêndio e carga mecânica

Na análise seguinte pretende-se avaliar a influência do aumento de temperaturas para os vários intervalos de tempo, em simultâneo com uma carga de 0,5 [kN/m], nas diferentes acções do fogo.

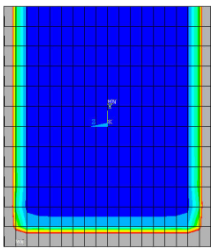
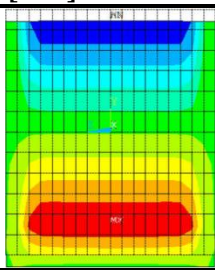

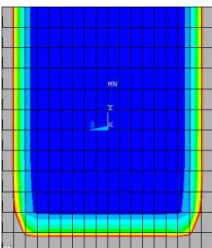
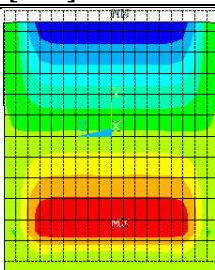

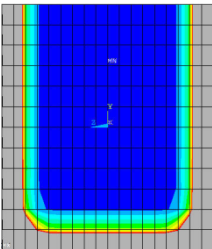
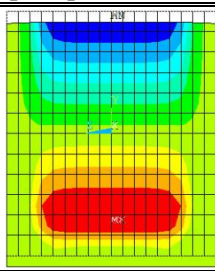
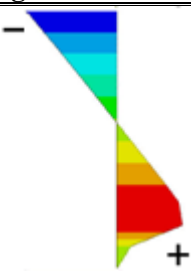
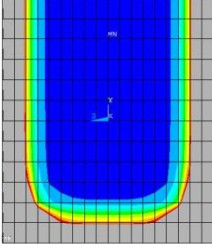
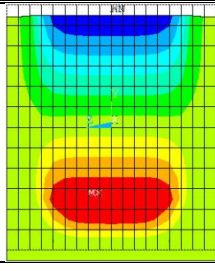

## Acção do fogo em 3 lados

Os resultados apresentados nas tabelas 22 e 23 para as secções 2 e 3 respectivamente, resultam da análise do efeito térmico e mecânico para diferentes instantes de tempo. Estes valores são relativos à secção a meio-vão da viga, uma vez que é a zona com maior incidência de esforços internos.

**Tabela 32** – Resultados numéricos para a secção 2 de casquinha branca, (fogo a 3 lados).

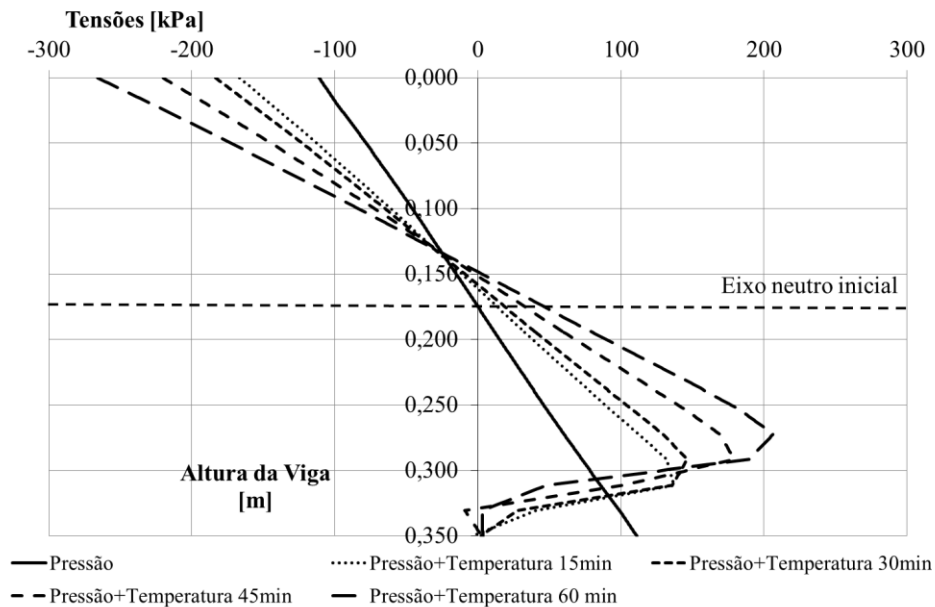
Duração do fogo 15 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]		Tensão máxima/mínima: -166,50/+137,23[kPa]
Duração do fogo 30 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]		Tensão máxima/mínima: -183,51/+146,37[kPa]
Duração do fogo 45 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]		Tensão máxima/mínima: -220,25/+179,28[kPa]
Duração do fogo 60 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]		Tensão máxima/mínima: -265,94/+206,59[kPa]

**Tabela 33** - Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha branca, (fogo a 3 lados).

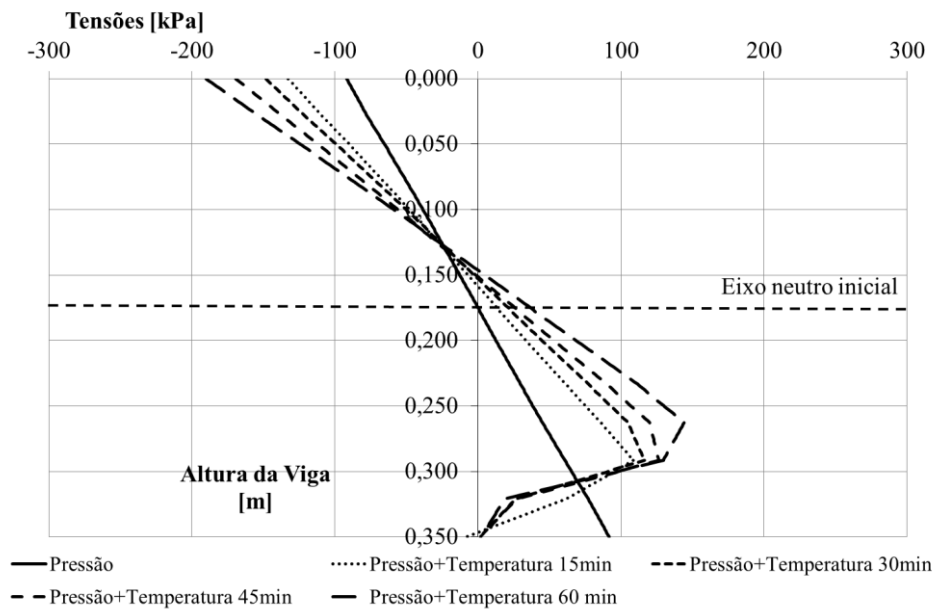
<b>Duração do fogo 15 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -132,51/+108,74 [kPa]	
<b>Duração do fogo 30 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -148,30/+116,39[kPa]	
<b>Duração do fogo 45 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -126,45/+169,11 [kPa]	
<b>Duração do fogo 60 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -189,96/+144,29 [kPa]	

Analisando os resultados, verifica-se que existe a sobreposição dos efeitos das tensões de origem mecânica com as de origem térmica, resultando na modificação do perfil de tensões. Nota-se ainda que a distribuição de tensões é máxima à compressão na parte superior da viga e apresenta valores inferiores na zona à tração, dado absorver o efeito térmico.

Com os resultados obtidos, representam-se nas figuras 30 e 31, as distribuições da tensão a meio vão do perfil, para os casos em estudo de casquinha branca e exposição ao fogo em 3 lados, combinando todos os casos de carga diferentes em estudo.



**Figura 30** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 2.



**Figura 31** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3.

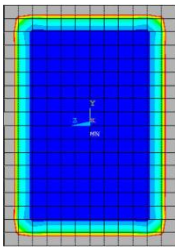
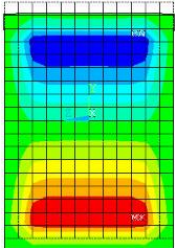

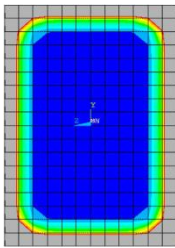
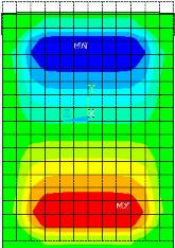

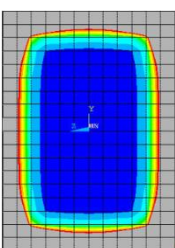
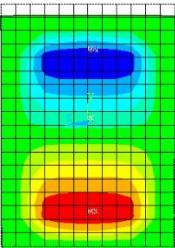

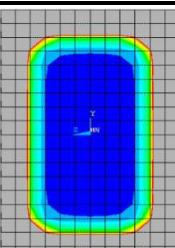
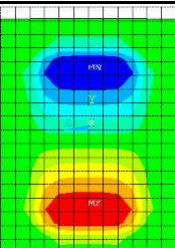
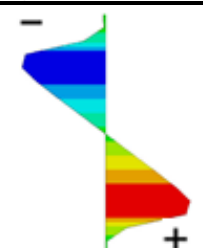
Sobrepondo os resultados do campo de tensões, verifica-se que a linha neutra da secção é desviada cerca de metade da espessura carbonizada, quando actua em simultâneo a carga

mecânica e o fogo. Pode ainda concluir-se que a tensão varia linearmente ao longo do núcleo frio da secção, perdendo resistência quando existe o efeito da camada carbonizada.

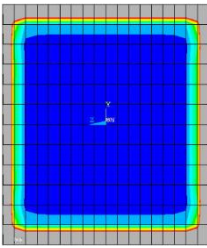
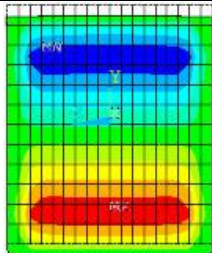

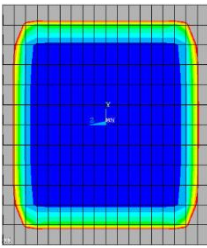
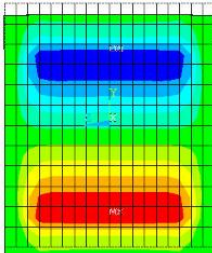

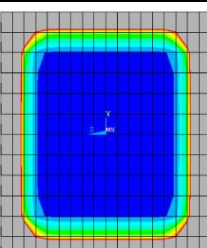
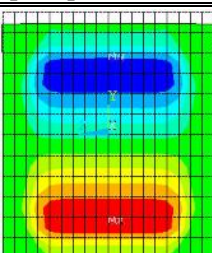

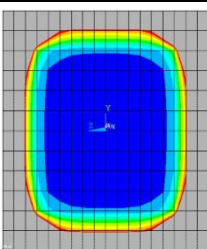
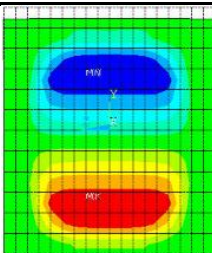

### Acção do fogo em 4 lados

Relacionando os dados simulados do carregamento térmico e mecânico, obtêm-se os resultados mostrados nas tabelas 34 e 35 na secção a meio vão do perfil 2 e 3.

**Tabela 34** - Resultados numéricos para a secção 2 de casquinha branca, (fogo a 4 lados).

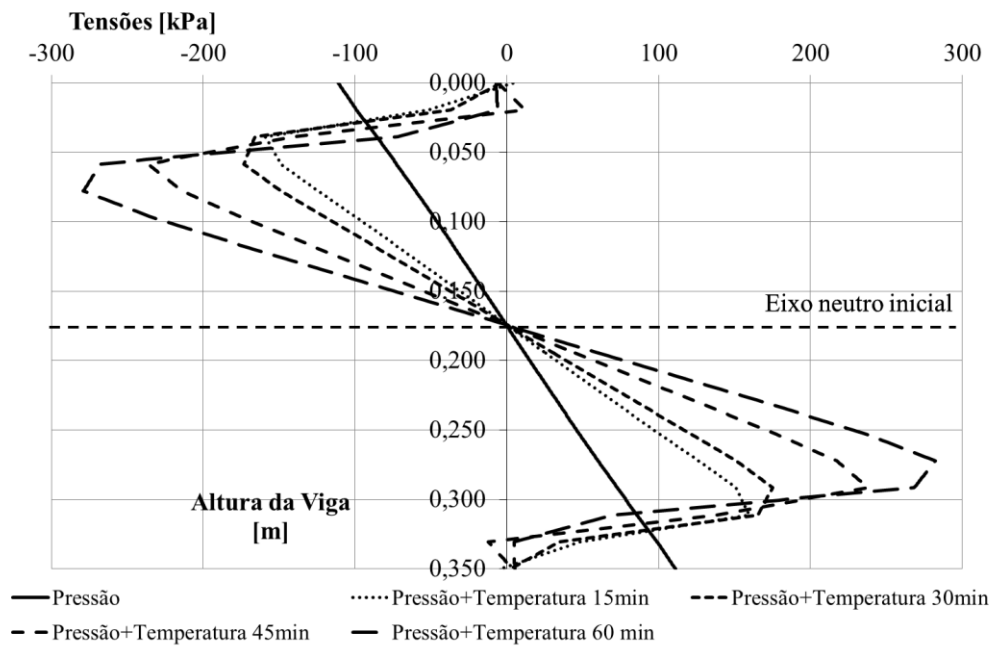
Duração do fogo 15 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -159,10/+159,54[kPa]	
Duração do fogo 30 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -173,14/+175,12[kPa]	
Duração do fogo 45 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -236,16/+237,97[kPa]	
Duração do fogo 60 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -278,95/+282,26[kPa]	

**Tabela 35** - Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha branca, (fogo a 4 lados).

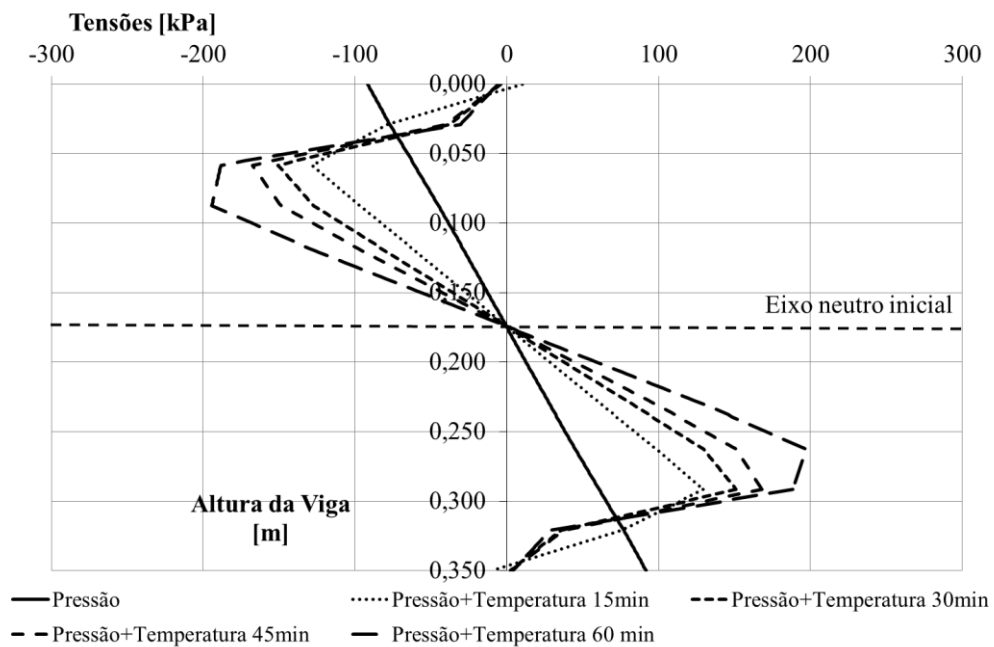
<b>Duração do fogo 15 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -128,17/+129,41[kPa]	
<b>Duração do fogo 30 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: - 150,59/+151,07[kPa]	
<b>Duração do fogo 45 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -167,58/+167,92[kPa]	
<b>Duração do fogo 60 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -194,25/+197,00[kPa]	

Tal como referido anteriormente, a distribuição de tensões é afectada pela presença da acção térmica. As tensões são lineares no núcleo interior da madeira e diminuem na zona carbonizada do perfil. Verifica-se uma simetria da distribuição de tensões, função da acção do calor.

Com os resultados obtidos e para os casos de carga, representam-se nas figuras 32 e 33, as distribuições das tensões a meio vão dos perfis, para os casos em estudo de casquinha branca com exposição ao fogo em 4 lados.



**Figura 32** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 2.



**Figura 33** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3.

Para o caso de fogo nos 4 lados da secção, o núcleo resistente é interno, garantindo que a linha de eixo neutro não sofrerá qualquer alteração. As tensões de compressão e de tracção apresentam o mesmo valor. Têm tendência a aumentar com a redução da secção resistente do perfil.

## 7.1.2 Casquinha vermelha

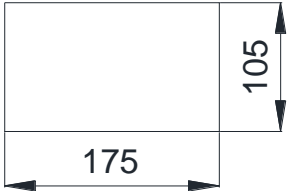
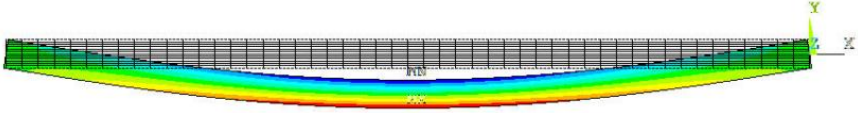
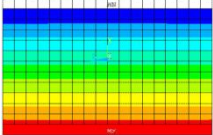
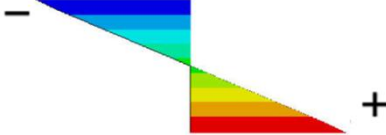
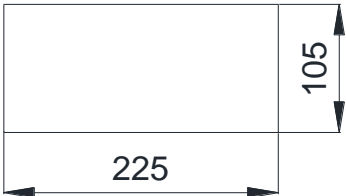
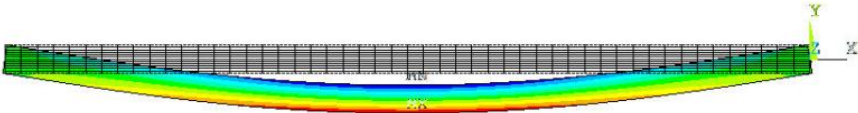
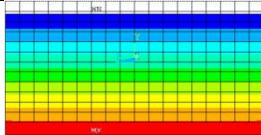
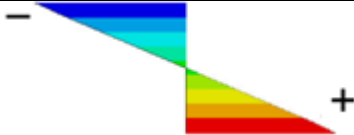
Neste capítulo vão ser analisadas as tensões obtidas para as duas secções em estudo de casquinha vermelha, sujeitas:

- iii. A uma carga linear uniformemente distribuída;
- iv. À exposição de incêndio durante vários intervalos de tempo e a uma carga mecânica.

### 7.1.2.1 Tensões função da carga mecânica

Na tabela 36 encontra-se a gama de tensões e a deformada provocada por uma carga mecânica uniformemente distribuída.

**Tabela 36** – Resultados numéricos para a casquinha vermelha.

Secção	Deformada
<p>Secção 3</p> 	 <p>Tensões a meio vão</p>  <p>Diagrama de tensões</p>  <p>Tensão máxima/mínima: <math>\pm 1686</math> [kPa]</p>
<p>Secção 5</p> 	 <p>Tensões a meio vão</p>  <p>Diagrama de tensões</p>  <p>Tensão máxima/mínima: <math>\pm 1310,8</math> [kPa]</p>

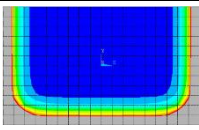
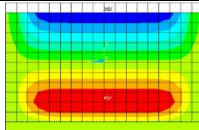
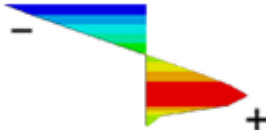
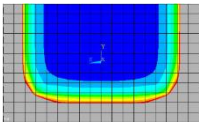
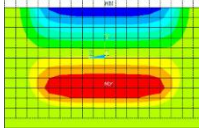
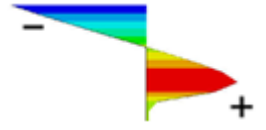
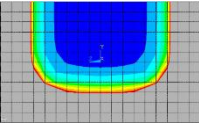
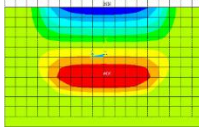
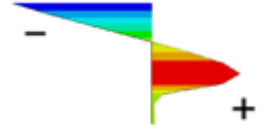
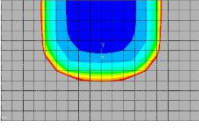
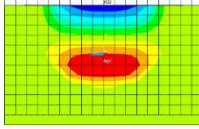
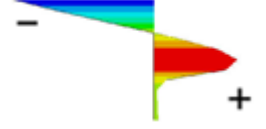
### 7.1.2.2 Tensões função da temperatura de incêndio e carga mecânica

No cálculo das tensões na viga sujeita à acção do fogo e à carga uniformemente distribuída pretende-se analisar a influência do aumento de temperaturas para os mesmos intervalos de tempo referidos anteriormente.

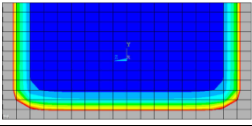
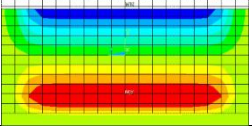
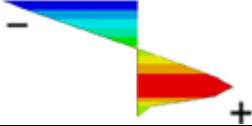
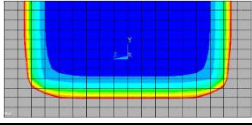
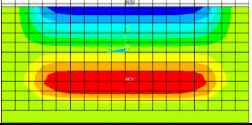
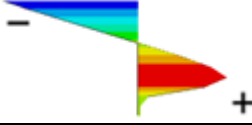
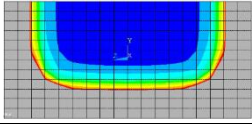
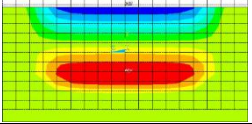
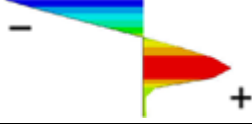
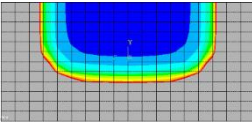
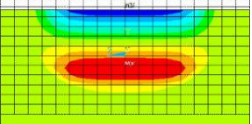
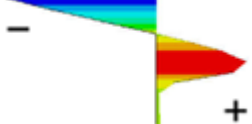
#### Sujeito a fogo em 3 lados

Nas tabelas 37 e 38 encontram-se os resultados, para as secções 3 e 5 respectivamente para a secção a meio vão, sob efeito térmico e mecânico para diferentes instantes de tempo.

**Tabela 37** – Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha vermelha, (fogo a 3 lados).

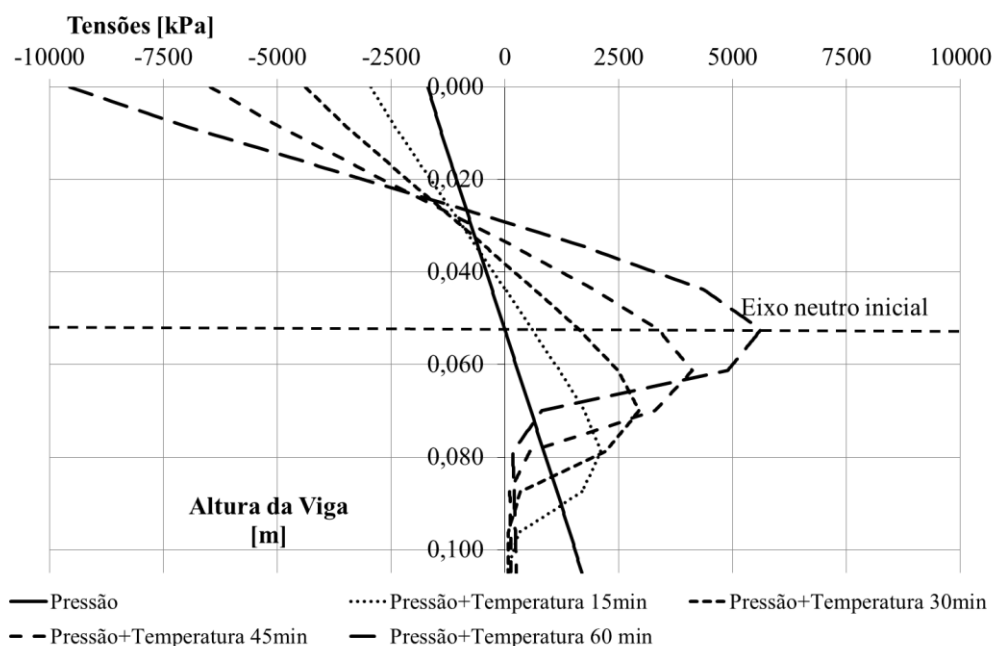
Duração do fogo 15 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -2941,60/+2110,50[kPa]	
Duração do fogo 30 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -4378,50/+2947,80[kPa]	
Duração do fogo 45 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -6466,60/+4115,30[kPa]	
Duração do fogo 60 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -9549,40/+5622,60[kPa]	

**Tabela 38** - Resultados numéricos para a secção 5 de casquinha vermelha, (fogo a 3 lados).

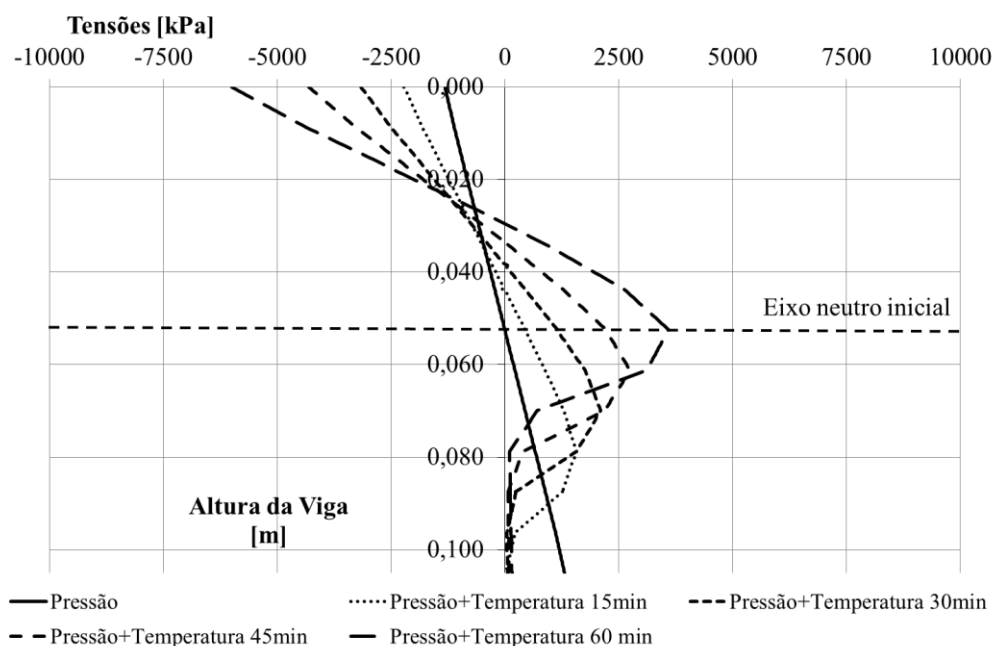
<b>Duração do fogo 15 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -2212,80/+1579,70[kPa]	
<b>Duração do fogo 30 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -3156,20/+2101,70[kPa]	
<b>Duração do fogo 45 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -4300,50/+2750,00[kPa]	
<b>Duração do fogo 60 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -5997,00/+3569,40[kPa]	

Também para a casquinha vermelha se verifica que as tensões são influenciadas pela direcção do fogo na secção. As tensões são máximas à compressão, sendo inferiores à tracção. Conforme a influência da acção térmica, há perda de resistência mecânica na estrutura.

Com os resultados obtidos, representam-se nas figuras 34 e 35 a distribuição de tensões para o carregamento mecânico e térmico de fogo a 3 lados da secção.



**Figura 34** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3.



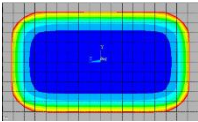
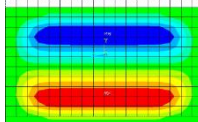
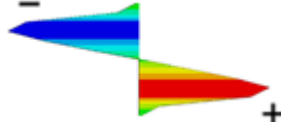
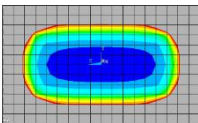
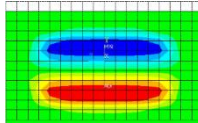
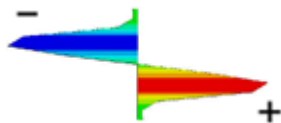
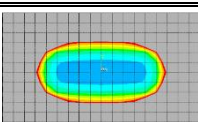
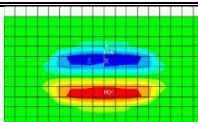
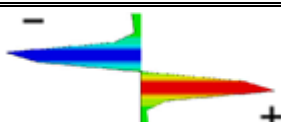
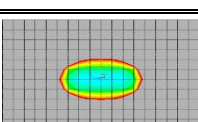
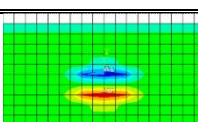
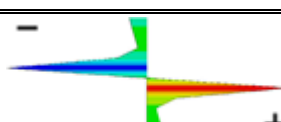
**Figura 35** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 5.

A linha neutra da secção é desviada cerca de metade da espessura carbonizada, quando actua em simultâneo a carga mecânica e o fogo. As tensões apresentadas têm um maior valor à compressão aumentando com a evolução do tempo de exposição ao fogo. A secção 3 apresenta maiores níveis de tensão, uma vez que tem menor resistência.

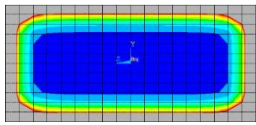
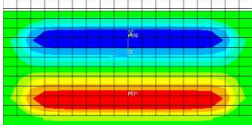
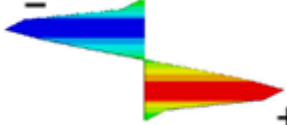
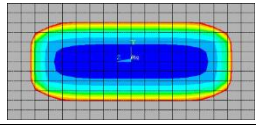
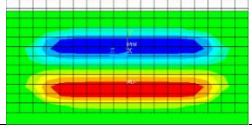
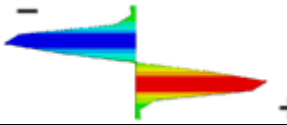
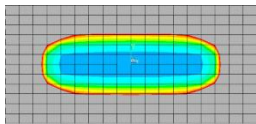
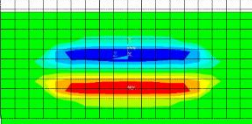
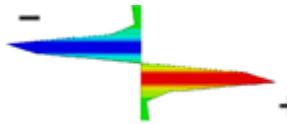
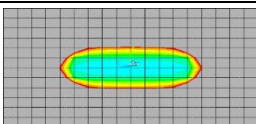
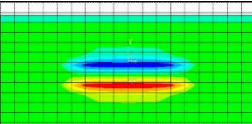
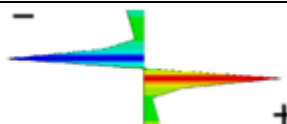
## Sujeito a fogo em 4 lados

Os resultados obtidos da análise do efeito térmico e mecânico para diferentes instantes de tempo, encontram-se apresentados nas tabelas 39 e 40, para a área a meio vão das secções 3 e 5 respectivamente.

**Tabela 39** – Resultados numéricos para a secção 3 de casquinha vermelha, (fogo a 4 lados).

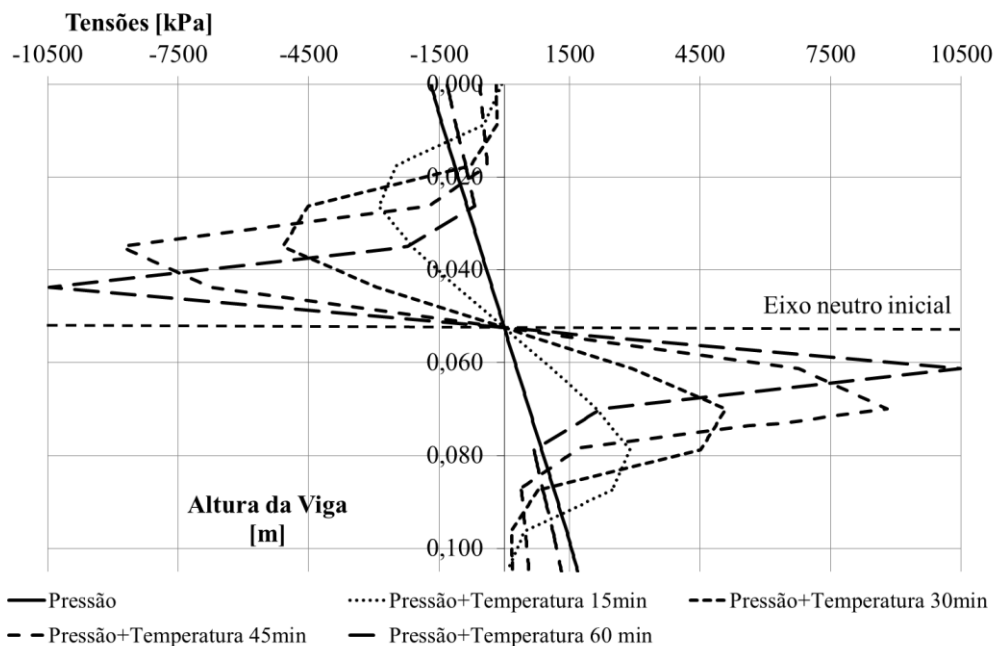
Duração do fogo 15 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -2887,00/+2888,70[kPa]	
Duração do fogo 30 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -5083,10/+5086,70[kPa]	
Duração do fogo 45 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -8797,20/+8800,00[kPa]	
Duração do fogo 60 [min]		Diagrama de tensões
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -10465,00/+10477,00[kPa]	

**Tabela 40** - Resultados numéricos para a secção 5 de casquinha vermelha, (fogo a 4 lados).

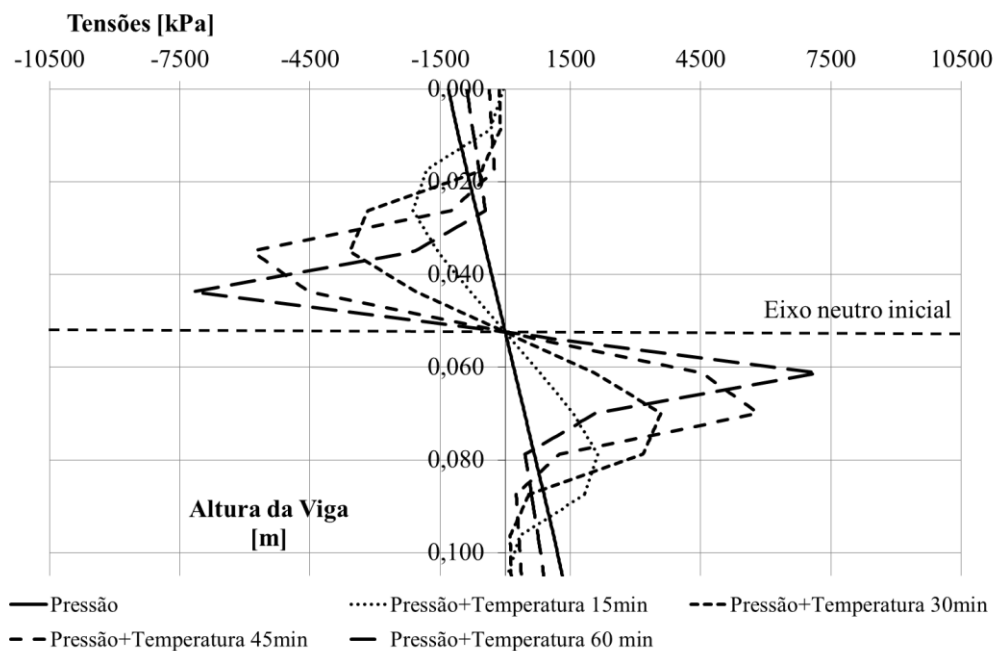
<b>Duração do fogo 15 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -2127,90/+2129,20[kPa]	
<b>Duração do fogo 30 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -3579,00/+3581,80[kPa]	
<b>Duração do fogo 45 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -5823,60/+5825,20[kPa]	
<b>Duração do fogo 60 [min]</b>		<b>Diagrama de tensões</b>
		
Secção resultante [20° a 300°]	Tensão máxima/mínima: -7202,50/+7210,30[kPa]	

As secções de casquinha vermelha em estudo, apresentam uma redução de secção muito significativa nos perfis referenciados. A partir dos 45 [min], o núcleo resistente é pouco considerável. A distribuição de tensões assume simetria em relação ao centro geométrico da secção.

As figuras 36 e 37, representam as tensões a meio vão dos perfis, para os casos em estudo de casquinha vermelha com exposição ao fogo em 4 lados.



**Figura 36** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 3.



**Figura 37** – Distribuição das tensões, função da temperatura, a meio vão da secção 5.

A distribuição linear das tensões na secção central do perfil permite concluir que existe estados de tensão elevados com o acto de exposição ao fogo, a linha do eixo neutro mantém-se inalterada.

## 7.2 Proposta de equações analíticas de projecto

O cálculo das máximas tensões devidas à flexão, provocada pela carga mecânica, é obtido através da equação analítica 41.

$$\sigma_{m\acute{a}x,x} = \frac{M_z \times \bar{y}}{I_z} = \frac{wL^2}{8} \times \frac{D}{2} \frac{1}{\frac{BD^3}{12}} [kPa] \quad (41)$$

Em que a tensão depende do momento  $M_z$  provocado pela carga uniformemente distribuída  $w$  [kN/m] e da inércia da secção,  $I_z$ .

Quando a viga se encontra sujeita ao fogo, os valores das dimensões das secções B e D são reduzidos, da espessura de carbonização efectiva (b e d), variando para a situação de fogo a 3 ou 4 lados, como mostram as equações 42 e 43, respectivamente.

$$\sigma_{m\acute{a}x,x} = \frac{\frac{wL^2}{8} \times \left(\frac{D}{2} - d\right)}{\frac{(B - 2b)(D - d)^3}{12}} [kPa] \quad (42)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x,x} = \frac{\frac{wL^2}{8} \times \left(\frac{D}{2} - d\right)}{\frac{(B - 2b)(D - 2d)^3}{12}} [kPa] \quad (43)$$

Com base na utilização da velocidade de carbonização previamente calculada, obtém-se facilmente o valor da espessura carbonizada. Assim, as expressões de cálculo propostas 42 e 43, podem ser utilizadas em projecto de estruturas sob acção do fogo, tornando-se por isso muito úteis.

### 7.3 Comparação dos resultados numéricos e analíticos.

As tabelas seguintes traduzem a comparação de valores para o cálculo de tensões, utilizando o modelo computacional e as equações analíticas de projecto propostas 41, 42 e 43. Na tabela 41, encontram-se os resultados da tensão máxima devido à carga mecânica.

**Tabela 41** – Resultados da tensão máxima devido à carga mecânica.

Espécie	Secção	Método	% Ar	$\sigma_{\text{máx}}$ [kPa]
<b>Casquinha Branca</b>	2	Numérico	100%	$\pm 110,97$
		Analítico	100%	$\pm 110,20$
	3	Numérico	100%	$\pm 91,67$
		Analítico	100%	$\pm 91,84$
<b>Casquinha Vermelha</b>	3	Numérico	100%	$\pm 1686,00$
		Analítico	100%	$\pm 1749,27$
	5	Numérico	100%	$\pm 1310,80$
		Analítico	100%	$\pm 1360,54$

**Tabela 42** – Resultados da tensão máxima devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 3 lados.

Espécie	Secção	Método	$\sigma_{\text{máx}}$ 3 Lados de exposição [kPa]			
			t=15 [min]	t=30[min]	t=45[min]	t=60[min]
<b>Casquinha branca</b>	2	Numérico	$\pm 166,50$	$\pm 183,51$	$\pm 220,25$	$\pm 265,94$
		Analítico	$\pm 136,70$	$\pm 164,00$	$\pm 191,08$	$\pm 223,34$
		%A <sub>r</sub>	90%	80%	71%	63%
	3	Numérico	$\pm 132,51$	$\pm 148,30$	$\pm 169,11$	$\pm 189,96$
		Analítico	$\pm 111,38$	$\pm 130,81$	$\pm 149,25$	$\pm 170,56$
		%A <sub>r</sub>	90%	82%	75%	68%
<b>Casquinha vermelha</b>	3	Numérico	$\pm 2941,60$	$\pm 4378,50$	$\pm 6466,60$	-
		Analítico	$\pm 2840,50$	$\pm 4390,37$	$\pm 6257,10$	-
		%A <sub>r</sub>	81%	64%	51%	40%
	5	Numérico	$\pm 2212,80$	$\pm 3156,20$	$\pm 4300,50$	-
		Analítico	$\pm 2116,62$	$\pm 3127,32$	$\pm 4264,40$	-
		%A <sub>r</sub>	84%	69%	57%	46%

Analisando os resultados apresentados anteriormente, verifica-se que o erro em relação à tensão máxima é de 4%. Nas tabelas 42 e 43 encontram-se os resultados da tensão máxima devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 3 lados e a 4 lados, respectivamente.

**Tabela 43** – Resultados da tensão máxima devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 4 lados.

Espécie	Secção	Método	$\sigma_{\text{máx}}$ 4 Lados de exposição [kPa]			
			t=15 [min]	t=30[min]	t=45[min]	t=60[min]
Casquinha branca	2	Numérico	±159,12	±175,12	±237,97	±282,26
		Analítico	±148,37	±195,60	±250,08	±346,33
		%A <sub>r</sub>	87%	75%	65%	55%
	3	Numérico	±129,41	±151,07	±167,92	±197,00
		Analítico	±120,98	±155,91	±194,01	±256,32
		%A <sub>r</sub>	88%	77%	67%	60%
Casquinha vermelha	3	Numérico	±2888,70	±5086,70	-	-
		Analítico	±2870,18	±6880,86	-	-
		%A <sub>r</sub>	73%	50%	31%	13%
	5	Numérico	±2129,20	±3581,50	-	-
		Analítico	±2131,97	±4845,10%	-	-
		%A <sub>r</sub>	75%	54%	35%	18%

Observando as tabelas anteriores, é possível verificar que as secções com área resistente inferior a 50%, não apresentam qualquer valor de tensão calculado. Estas secções não resistente portanto, a determinados tempos de exposição ao fogo. Em relação à comparação de valores obtidos entre o método numérico e a equação analítica de projecto proposta, existe uma concordância, para os diferentes instantes de tempo em que se admite resistência mecânica da secção.

É possível então concluir que as equações propostas (42 e 43) poderão ser utilizadas em problemas de análise de vigas simplesmente apoiadas, sob o efeito de carregamento mecânico e térmico.

## **Capítulo 8**

### Avaliação da Capacidade Resistente

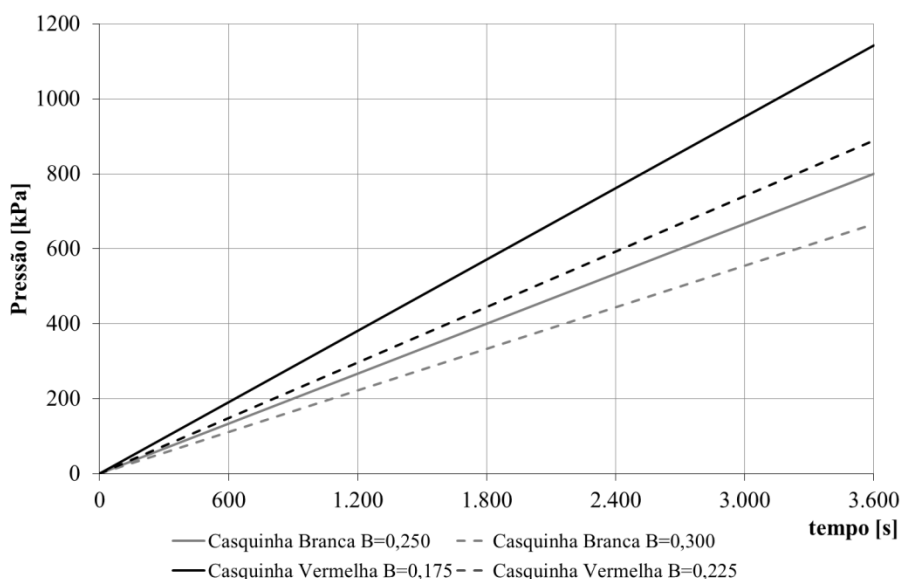
## 8. Avaliação da Capacidade Resistente

A capacidade resistente última, das vigas em estudo, foi obtida tendo como base a introdução das propriedades mecânicas não lineares (curvas de tensão-deformação), das espécies de madeira em estudo, função da temperatura. O valor da carga máxima foi calculado através de um processo de carga incremental mecânica, com imposição das temperaturas, calculadas anteriormente. Foi efectuada uma análise estrutural incremental por elementos finitos com o programa ANSYS®, conforme registo do código no Anexo 3. Para a determinação do valor máximo da carga a impor nas vigas em estudo, foram introduzidas curvas de carregamento linear. Estas curvas são definidas em função do tempo e depende da dimensão da vida, conforme tabela 44.

**Tabela 44** – Definição da curva de pressão.

Curva de pressão	
t [s]	P [kPa]
0	0
3600	200/B

Na figura 38 traduzem-se as diferentes curvas de carga mecânica que são utilizadas em 4 secções diferentes das vigas em estudo.



**Figura 38** – Curvas de pressão.

A determinação da capacidade de carga para as vigas em estudo será função da análise em simultâneo do efeito da acção térmica.

## 8.1 Casquinha branca

Nas tabelas 45 e 46, encontram-se os valores de carga máxima calculada para os intervalos de tempo 0, 15, 30, 45 e 60 [min], para secções sujeitas ao fogo a 3 e 4 lados, respectivamente. Apresenta-se ainda o valor do incremento (step) para o qual a carga última foi registada.

**Tabela 45** – Carga máxima com fogo a 3 lados.

Secção	Carga máxima sujeita a fogo de 3 Lados [kN/m]				
	t=0 [min]	t=15 [min]	t=30[min]	t=45[min]	t=60[min]
2	225,00	153,33	118,33	106,67	85,00
	(step = 3870)	(step = 2760)	(step = 2130)	(step = 1920)	(step =1530)
3	260,00	180,00	153,33	131,67	120,00
	(step = 4680)	(step = 3240)	(step = 2760)	(step = 2370)	(step =2160)

**Tabela 46** – Carga máxima com fogo a 4 lados.

Secção	Carga máxima sujeita a fogo de 4 Lados [kN/m]				
	t=0 [min]	t=15 [min]	t=30[min]	t=45[min]	t=60[min]
2	225,00	120,00	101,67	76,67	60,00
	(step = 3870)	(step = 2160)	(step = 1830)	(step = 1380)	(step =1080)
3	260,00	140,00	116,67	98,33	76,67
	(step = 4680)	(step = 2520)	(step = 2100)	(step = 1770)	(step =1380)

Da análise das tabelas anteriores, verifica-se que a carga máxima a que a secção 2 resiste é de 225,00 [kN/m]. Quando sujeita ao aumento de temperaturas devido à exposição ao fogo por 3 e 4 lados, essa carga máxima é reduzida para 85,00 e 60,00 [kN/m] respectivamente, ao fim de 60 [min].

A secção 3 consegue suportar uma carga máxima de 260,00 [kN/m]. Quando exposta à situação de incêndio, no instante de tempo de 60 [min], suporta 120,00 e 76,67 [kN/m] para 3 e 4 lados de exposição, respectivamente.

De modo a facilitar o dimensionamento de pequenos perfis, com base nestes resultados foram realizados dois ábacos, como mostram as figuras 39 e 40, para 3 e 4 lados de exposição ao fogo.

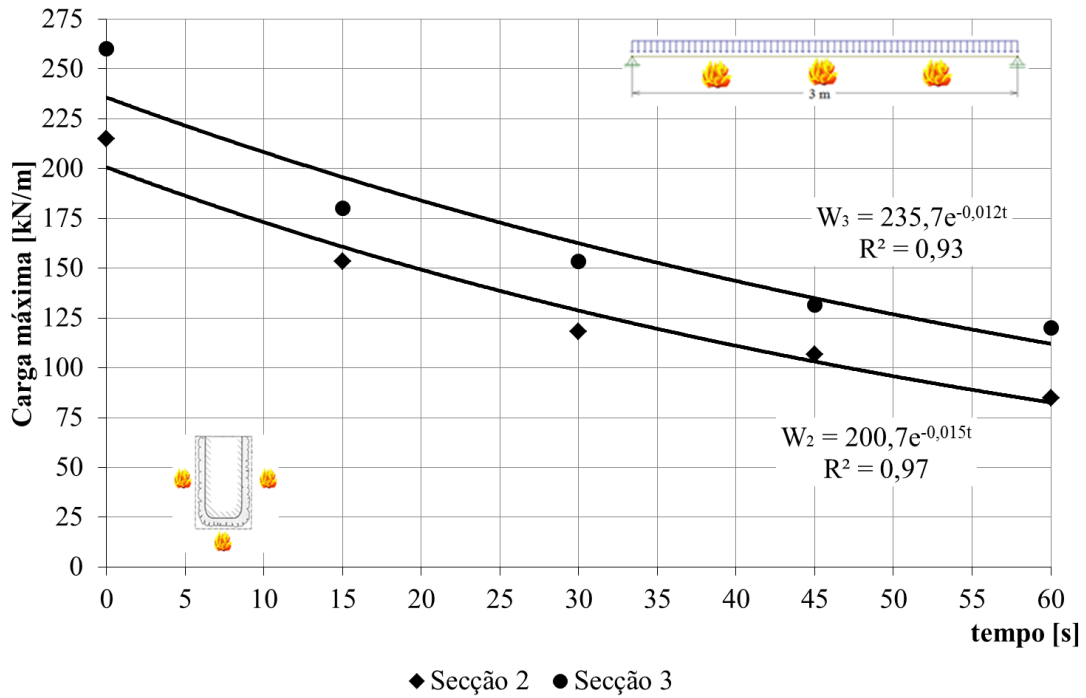


Figura 39 – Carga máxima para fogo a 3 lados.

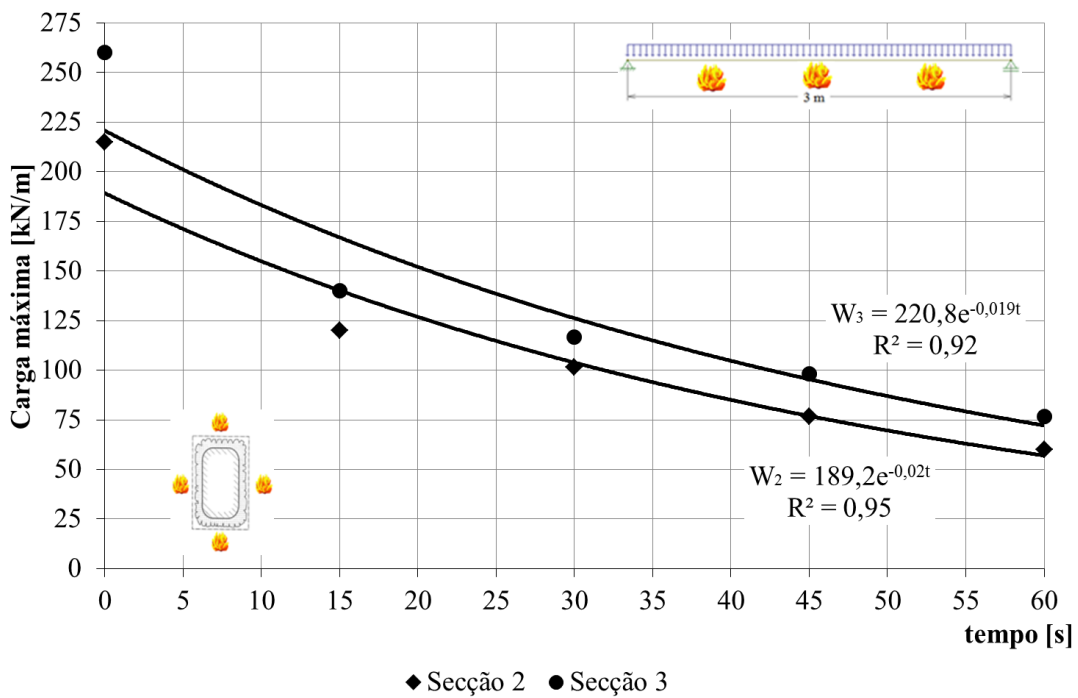
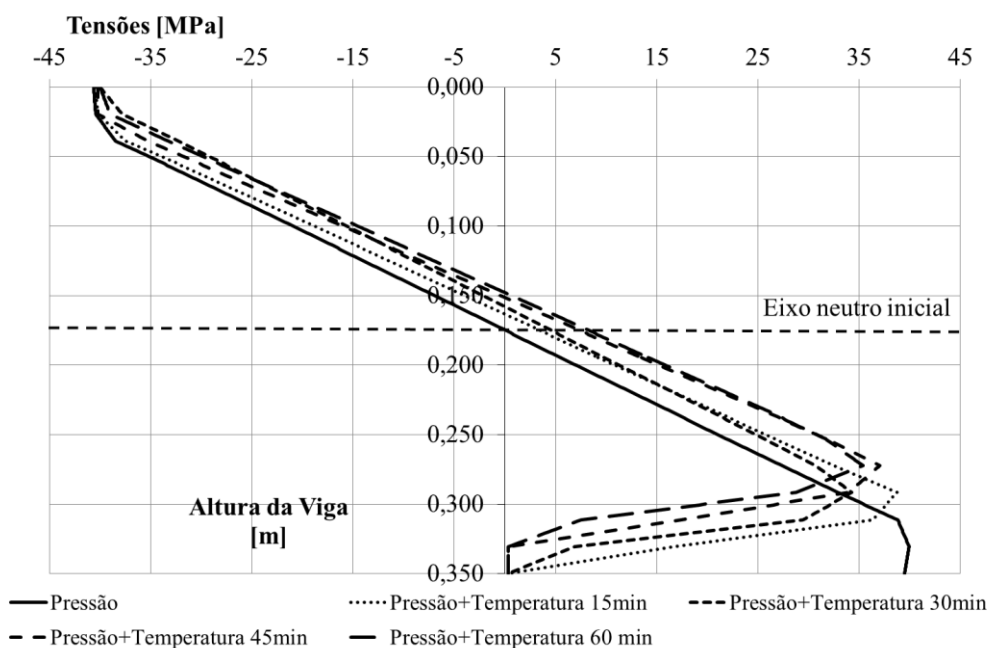


Figura 40 – Carga máxima para fogo a 4 lados.

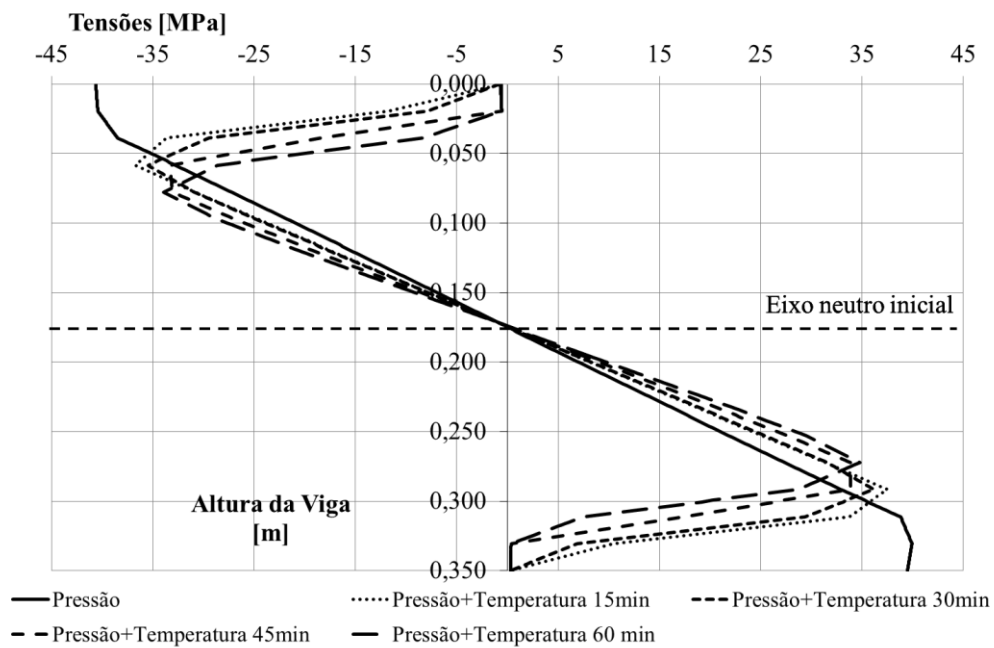
Analisando as curvas obtidas, figuras 39 e 40, verifica-se que a carga resistente máxima a impor na viga diminui em função do tempo de exposição ao fogo. Para cada curva é indicada uma equação polinomial, que permitirá obter valores da máxima carga resistente em função da acção do fogo no perfil.

Com estes ábacos, é possível realizar um pré dimensionamento de vigas de casquinha branca, sujeitas à exposição ao fogo de 3 e 4 lados, sendo apenas importante conhecer a relação entre as dimensões B e D. Após o conhecimento deste factor, basta realizar uma simples interpolação e é possível determinar a capacidade resistente da viga sujeita à solicitação mecânica e térmica, função do tempo de exposição ao fogo.

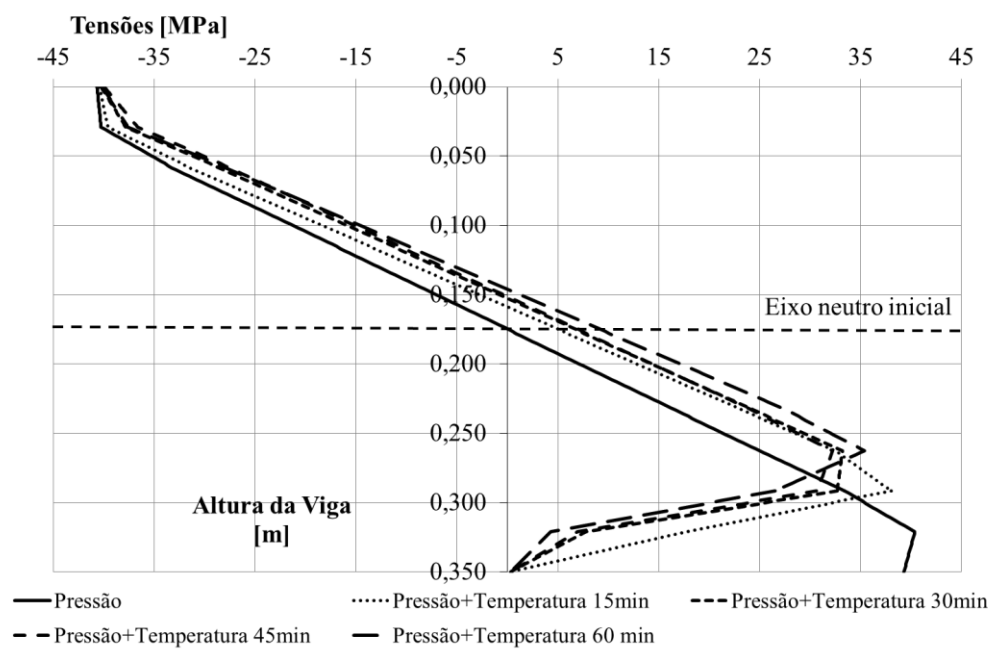
Um outro aspecto importante a analisar após verificada a carga máxima a que o perfil resiste, é a tensão que essa carga provoca na secção a meio vão, conforme figuras seguintes.



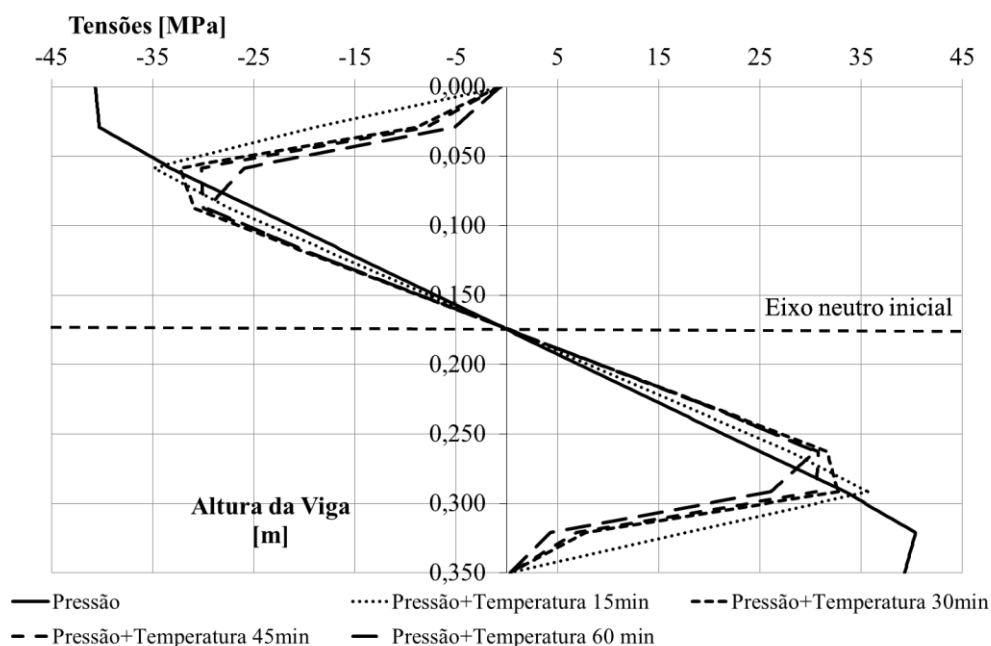
**Figura 41** – Diagrama de tensões para a secção 2 com exposição ao fogo de 3 lados.



**Figura 42** – Diagrama de tensões para a secção 2 com exposição ao fogo de 4 lados.



**Figura 43** – Diagrama de tensões para a secção 3 com exposição ao fogo de 3 lados.



**Figura 44** – Diagrama de tensões para a secção 3 com exposição ao fogo de 4 lados.

Como se verifica nas figuras 41 e 43, o eixo neutro desloca-se cerca de metade da espessura de carbonização, como anteriormente concluído. Nas figuras 42 e 44, o eixo neutro mantém-se inalterado, devido à degradação da secção ser muito semelhante na superfície superior e inferior.

As tensões de resistência máximas estão associadas à carga de solicitação e à exposição ao fogo, e são reduzidas de acordo com a redução da carga e a temperatura do núcleo resistente. Como o núcleo resistente tem temperaturas inferiores a 100 [°C], os valores obtidos são uma interpolação entre a curva de tensão a 20 [°C] e a 100 [°C]. Em todas as curvas sob efeito único da carga mecânica, é possível verificar-se que os valores máximos de tensão à compressão são atingidos pela cedência do material.

## 8.2 Casquinha vermelha

Para a casquinha vermelha e para as secções sujeitas ao fogo a 3 e 4 lados, foram calculados os máximos valores de carga nos intervalos de tempo de 0, 15, 30, 45 e 60 [min], conforme as tabelas 47 e 48, associado ao incremento numérico.

**Tabela 47** – Carga máxima com fogo a 3 lados.

Secção	Carga máxima sujeita a fogo de 3 Lados [kN/m]				
	t=0 [min]	t=15 [min]	t=30[min]	t=45[min]	t=60[min]
3	15,56	8,33	5,56	3,61	2,50
	(step = 280)	(step = 150)	(step = 100)	(step = 65)	(step = 45)
5	20,00	11,39	7,78	5,56	3,89
	(step = 360)	(step = 205)	(step = 140)	(step = 100)	(step =70)

**Tabela 48** – Carga máxima com fogo a 4 lados.

Secção	Carga máxima sujeita a fogo de 4 Lados [kN/m]				
	t=0 [min]	t=15 [min]	t=30[min]	t=45[min]	t=60[min]
3	15,56	5,83	2,5	1,11	0,28
	(step = 280)	(step = 105)	(step = 45)	(step = 20)	(step = 5)
5	20,00	8,06	3,61	1,94	0,56
	(step = 360)	(step = 145)	(step = 65)	(step = 35)	(step =10)

Analisando as tabelas anteriores, pode concluir-se que a carga máxima a impor para a secção 3 à temperatura ambiente é de 15,56 [kN/m]. Quando esta secção se encontra sujeita ao fogo a 3 lados e ao fim de 60 [min], a carga máxima resistente é de 2,50 [kN/m]. Na situação de exposição ao fogo em 4 lados, no instante 60 [min], o valor é de 0,28 [kN/m].

Para a secção 5, a carga máxima resistente à temperatura ambiente é de 20,00 [kN/m]. Quando exposta à situação de incêndio, no instante de tempo de 60 [min], suporta 3,89 e 0,56 [kN/m] para 3 e 4 lados de exposição, respectivamente.

Com os dados obtidos nas tabelas anteriores, é possível elaborar ábacos para utilização em situações futuras de dimensionamento, figuras 45 e 46, tal como referido anteriormente.

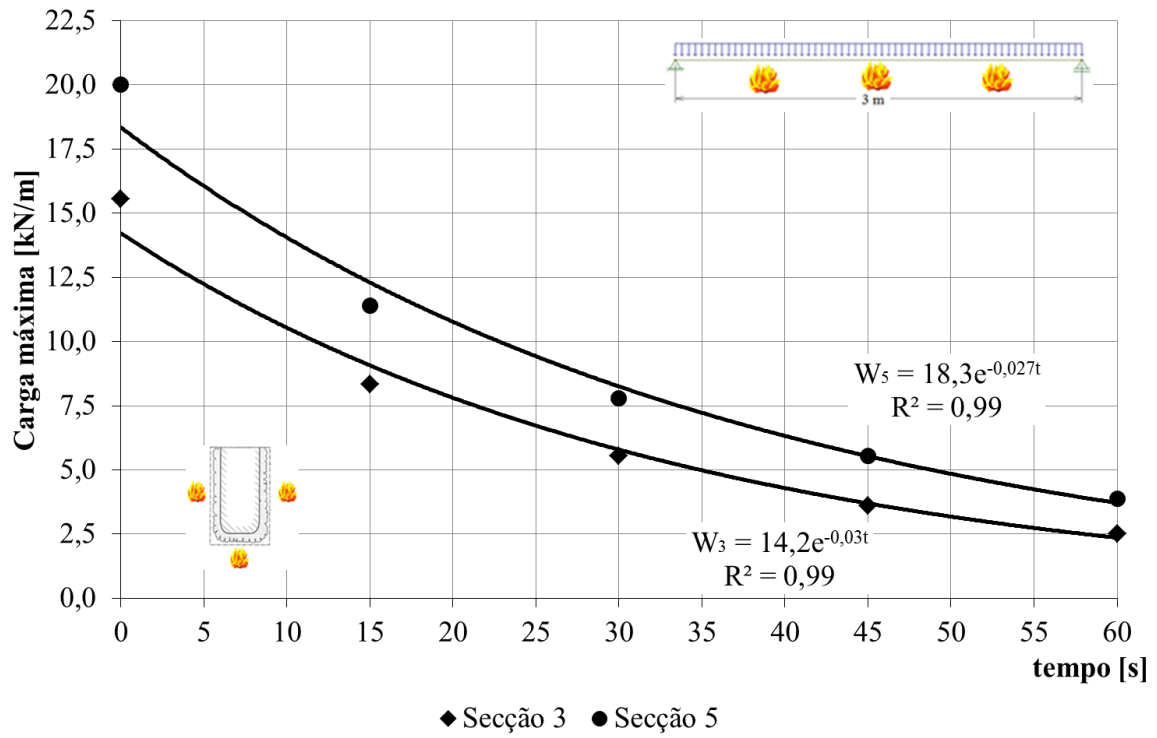


Figura 45 – Carga máxima para fogo a 3 lados.

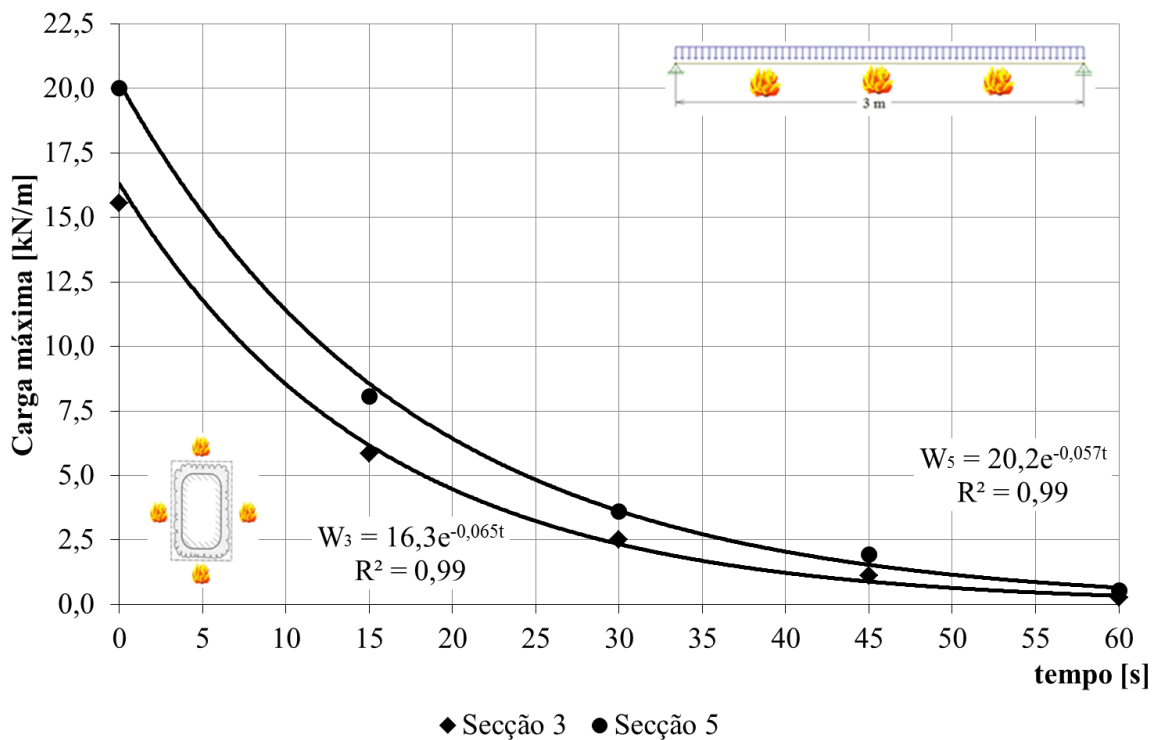


Figura 46 – Carga máxima para fogo a 4 lados.





O diagrama de tensões nas figuras 47 a 50, resultam do efeito da curva do material imposta a diferentes temperaturas. Atendendo aos diferentes instantes de tempo em análise, as curvas de material são interpoladas para diferentes valores de temperatura. Pelo que todas as tensões calculadas apresentam o máximo valor à superfície limite resistente da secção.

### 8.3 Equações analíticas de projecto e comparação dos resultados.

Tomando como base as equações 42 e 43 para o cálculo das tensões máximas, é possível colocá-las em ordem à carga máxima, de modo a obter a capacidade de carga última para as diversas secções e função da exposição de fogo em 3 e 4 lados, como mostram as equações 44 e 45 respectivamente.

$$w = \frac{8 \times \sigma_{máx,x} \times (B - 2b)(D - d)^3}{12 \times \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2}\right) \times L^2} \text{ [kN/m]} \quad (44)$$

$$w = \frac{8 \times \sigma_{máx,x} \times (B - 2b)(D - 2d)^3}{12 \times \left(\frac{D}{2} - d\right) \times L^2} \text{ [kN/m]} \quad (45)$$

Um parâmetro importante a considerar é a tensão resistente da secção, definida em função da temperatura, conforme enunciado na tabela 30. A escolha desse valor depende da temperatura calculada previamente, a que se encontra o interior da secção, para um determinado instante de tempo.

Como exemplo de aplicação, efectuaram-se cálculos com base na aplicação das equações 44 e 45, em vigas sob efeito de carga mecânica e térmica.

Assim na tabela 49, encontram-se resultados da capacidade de carga máxima para vigas sob exposição ao fogo a 3 lados e 4 lados, para duas das secções em estudo, e tempo de exposição ao fogo de 60min. Os valores de carga última obtidos são comparados com os valores numéricos já anteriormente obtidos.

Os valores obtidos com os dois métodos (numérico e analítico) são similares, para o instante de tempo ao fogo calculado. A utilização das equações 44 e 45 podem ser úteis em projecto de construção, sendo de aplicação fácil.

**Tabela 49** – Resultados da carga máxima devido à secção resultante e à exposição ao fogo a 3 lados e 4 lados.

Espécie	Secção	Método	$w_{\max}$ 3 e $w_{\max}$ 4 Lados de exposição [kN/m]	
			t=60[ <b>min</b> ]	t=60[ <b>min</b> ]
<b>Casquinha branca</b>	2	Numérico	85,00	60,00
		Analítico	84,55	57,75
	3	Numérico	120,00	76,67
		Analítico	117,26	78,03
<b>Casquinha vermelha</b>	3	Numérico	2,5	0,28
		Analítico	1,57	0,06
	5	Numérico	3,89	0,56
		Analítico	2,58	0,11

Apesar de não se apresentarem todos os cálculos efectuados em todas as secções em estudo, foi possível verificar que a carga distribuída máxima a impor na viga, diminuí com a diminuição da secção resistente do perfil sob efeito da acção térmica.

Na casquinha branca, e para as secções em estudo, haverá uma redução de cerca de 50% na imposição de carga mecânica, quando em presença de uma hora de exposição ao fogo.

Para a casquinha vermelha, o comportamento é mais crítico, uma vez que as secções em estudo praticamente não aguentam qualquer carga mecânica quando estão sob acção do fogo durante uma hora.



# **Capítulo 9**

## **Programa de Cálculo**

## 9. Programa de Cálculo

### 9.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se um código para o cálculo de tensões em vigas de madeira simplesmente apoiadas, submetidas a carregamento mecânico e ou térmico, para regime estático linear. O programa foi desenvolvido numa linguagem de programação (*Fortran*), com o objectivo de efectuar o estudo de vigas simplesmente apoiadas sujeitas a cargas concentradas e/ou uniformemente distribuídas, e considerando também a influência de temperaturas elevadas. O algoritmo elaborado conduz a um conjunto de regras e operações matemáticas com base em expressões da resistência dos materiais.

O programa de cálculo permite obter as reacções e os esforços internos ao longo de vigas com secção constante e sujeitos a carregamentos combinados, conhecendo as respectivas propriedades do material a utilizar. Está apto a calcular as tensões máximas, função dos máximos esforços obtidos, e ainda para qualquer secção de viga, efectuar o cálculo independente. Após compilado, o programa corre em ambiente DOS permitindo gerar um ficheiro de dados e um de resultados, podendo ser utilizado por qualquer utilizador.

### 9.2 Linguagem utilizada

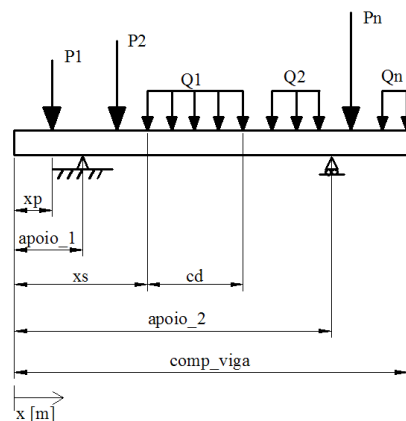
Existem muitas linguagens de programação de alto nível capazes de resolver os mais diversos problemas numéricos. O *Fortran* tem muitas aplicações e é a linguagem mais eficaz na resolução de problemas científicos e tecnológicos, sendo a primeira linguagem de programação científica, sendo a mais popular em todo o mundo. O *Fortran* conheceu várias versões ao longo dos tempos. As suas aplicações tecnológicas são as mais diversas, desde modelos computacionais para centrais de energia nuclear, aplicações em engenharia aeroespacial ou em sistemas de processamento de sinal sísmico. Um programa em *Fortran* poderá conter muitas linhas de instruções. Tem uma grande aplicação nas áreas de engenharia, ligadas à análise numérica e ao cálculo matemático. O nome *Fortran* deriva de *FORmula TRANslation*, tendo esta linguagem inicialmente o objectivo da tradução de equações científicas em linguagem máquina. A evolução do *Fortran* através das suas versões, tem

permitido a introdução de novas capacidades adequando esta linguagem aos novos “supercomputadores”.

Neste capítulo, pretende-se apresentar o conjunto de equações utilizadas no desenvolvimento do modelo computacional através de várias etapas de programação. O anexo 5 contém o conjunto de sub-rotinas desenvolvidas em linguagem Fortran que deram origem ao programa. No anexo 6 apresenta-se uma listagem das variáveis e simbologia utilizadas ao longo da elaboração dessas sub-rotinas.

### 9.3 Formulação matemática

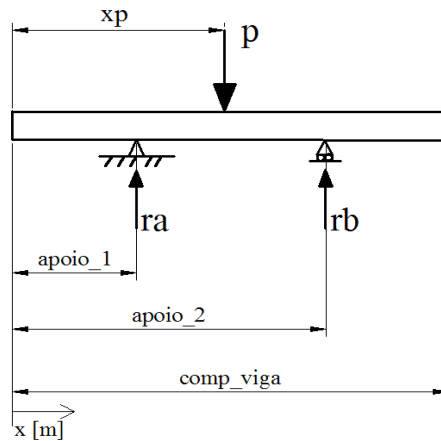
Este programa foi desenvolvido para situações de vigas simplesmente apoiadas, submetidas a cargas concentradas e/ou uniformemente distribuídas, e considerando ou não a presença de uma temperatura constante na viga, ver figura 51.



**Figura 51** - Estudo de viga simplesmente apoiada submetida a cargas concentradas e/ou distribuídas.

O modelo recorre a um conjunto de equações da resistência dos materiais, da estática e ao princípio da sobreposição de efeitos, por se tratar de estudos em regime linear elástico. Assim, o programa tem como base o estudo de uma carga concentrada que servirá de suporte ao estudo de todos os modelos. Por sobreposição dos efeitos é possível obter a situação de carga distribuída.

A primeira etapa da formulação baseia-se no cálculo das reacções. A figura 52 representa algumas das variáveis associadas ao cálculo das reacções para a viga simplesmente apoiada.

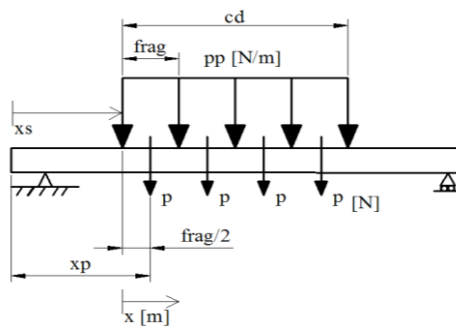


**Figura 52** – Diagrama para cálculo de reacções.

O método seguido para o cálculo das reacções e esforços consiste em calcular, para uma só carga, repetir o processo para as restantes cargas e calcular reacções e esforços finais por sobreposição.

Aquando da leitura de cargas distribuídas, estas são divididas em  $n$  cargas concentradas  $P$ , figura 53. Cada uma dessas cargas fica distante de outra carga  $P$  em função da distância

$$frag = \frac{cd}{ndiv} \text{ em que a localização da primeira carga será } xp = xs + \frac{frag}{2}.$$



**Figura 53** – Divisão de um carregamento distribuído em  $n$  cargas concentradas.

Tratando-se de vigas simplesmente apoiadas, deduziram-se as seguintes equações para o cálculo das reacções, com base nas leis da estática.

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ \sum M_0 = 0 \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} ra = p \left( 1 - \frac{xp - apoio_1}{apoio_2 - apoio_1} \right) \\ rb = p \left( \frac{xp - apoio_1}{apoio_2 - apoio_1} \right) \end{cases} \quad (46)$$

## 9.4 Cálculo de tensões

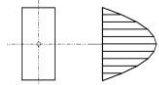
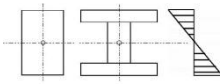
Para determinar as equações dos esforços (transverso e momento flector) para o cálculo de tensões, o procedimento adoptado a seguir é apresentado no anexo 4.

Estudaram-se três situações possíveis diferentes de carregamento, atendendo à posição de uma carga concentrada:

$$0 \leq xp \leq \text{apoio}_1; \text{apoio}_1 < xp \leq \text{apoio}_2; xp > \text{apoio}_2$$

Para o cálculo das tensões, utilizaram-se as equações expressas na tabela 50. O programa calcula as tensões normais e de corte máximas, de uma secção recta em qualquer ponto, para uma distância  $x$  do comprimento da viga em estudo.

**Tabela 50** – Equações para o cálculo de tensões.

Tensões Máximas	Perfil Rectangular	
$\tau_{máx}$ Tensão de Corte	$\tau = \frac{3v}{2A}$	
$\sigma_{máx}$ Tensão Normal	$\sigma = \frac{mf * y_{máx}}{I}, \quad I = \frac{BD^3}{12}$	

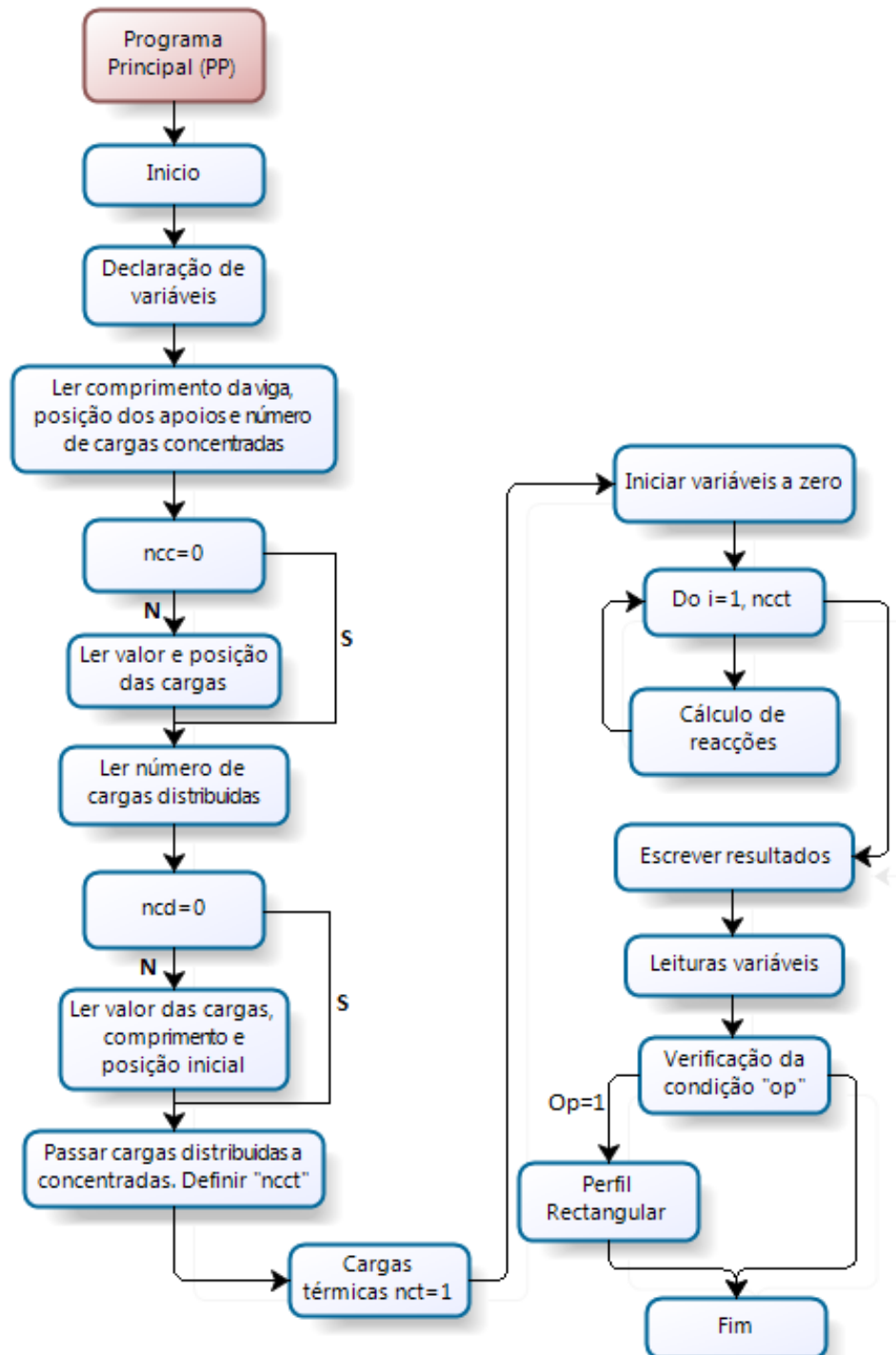
Para o cálculo das tensões de origem térmica, considera-se o cálculo da espessura carbonizada da secção do tipo de madeira previamente escolhido, função da presença de fogo em 3 ou 4 lados. A expressão que permite efectuar o cálculo da redução da secção resistente, tem a contribuição das diferentes velocidades de carbonização previamente determinadas, função da expressão:

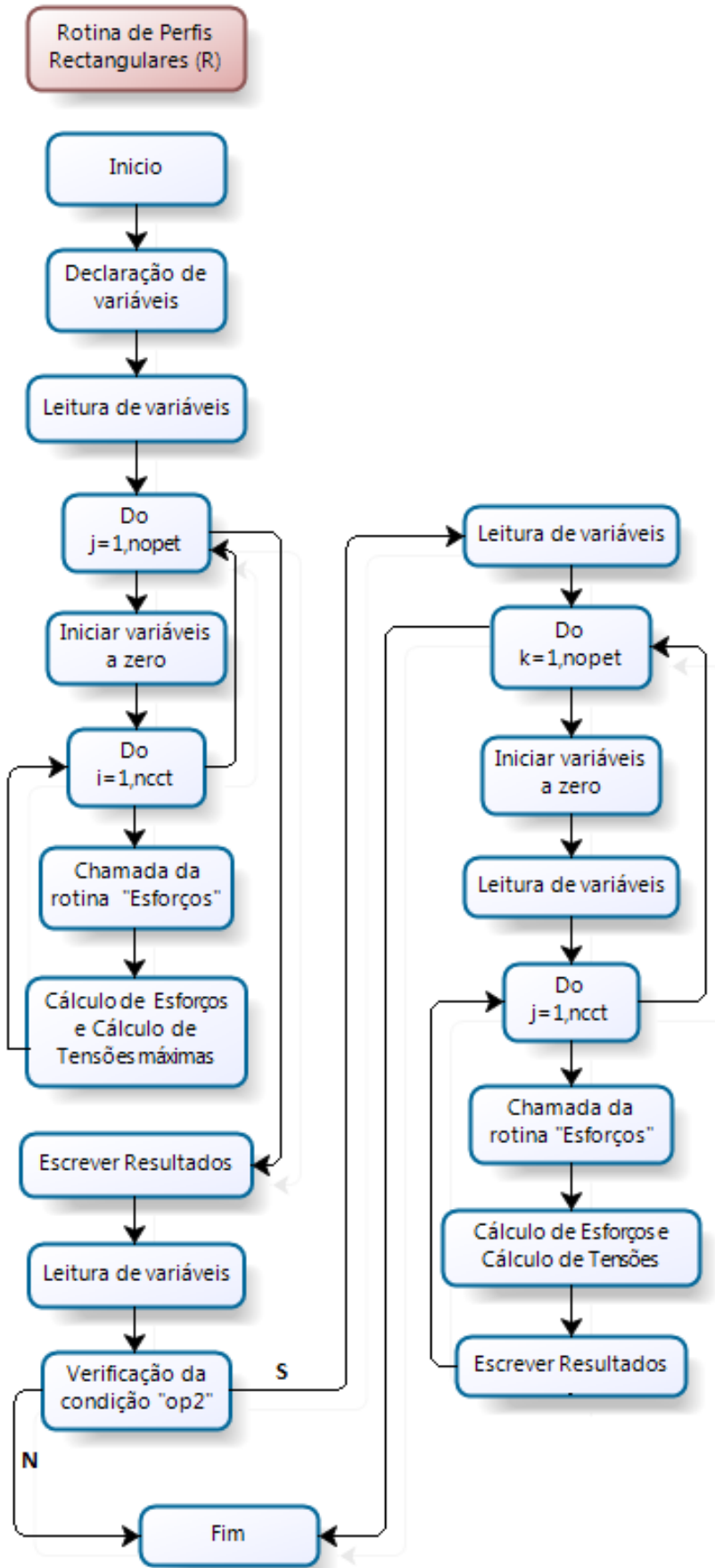
$$d_{ef} = \beta_n \times t + k_0 \times d_0 \quad (47)$$

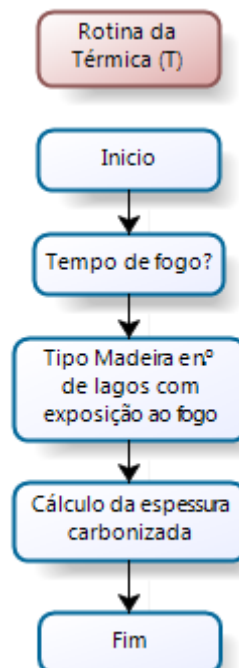
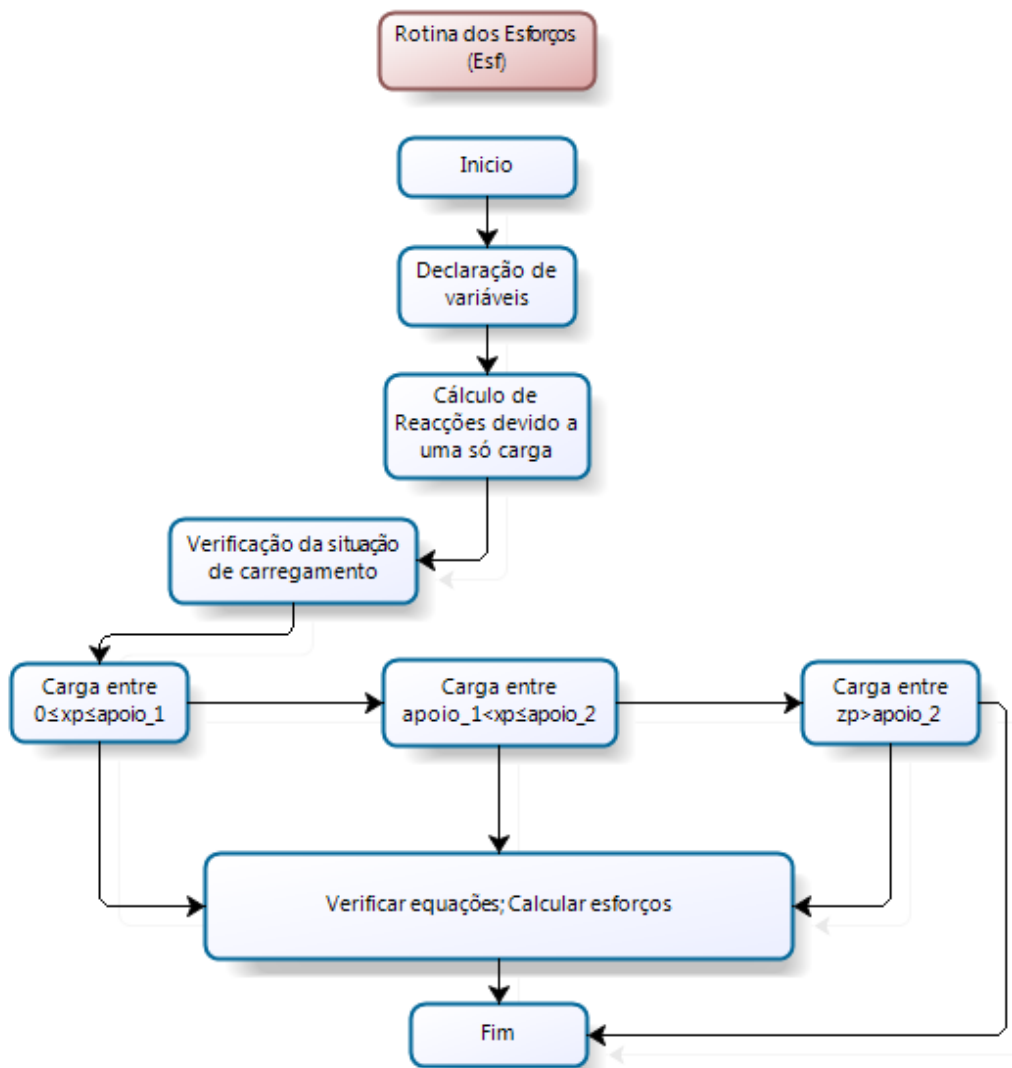
Esta expressão foi definida no capítulo 4.3 conforme enunciado pelo EC5. Após o cálculo da espessura carbonizada, é determinado o novo valor do momento de inércia da secção que contribui para a determinação das tensões de origem térmica. Nesta fase foram adoptadas as equações de projecto propostas no capítulo 7.

## 9.5 Fluxograma do programa

Para se compreender melhor o funcionamento do programa, construiu-se um fluxograma que se apresenta de seguida.







## 9.6 Comparação dos resultados através do método numérico, analítico e do programa de cálculo

Nas tabelas seguintes encontram-se os resultados obtidos através dos métodos numéricos (ANSYS<sup>®</sup>), analítico e pelo programa de cálculo. As condições a que a viga está sujeita são as mesmas que foram enunciadas no capítulo 7.

**Tabela 51** – Resultado das tensões devido à carga mecânica.

<b>Espécie</b>	<b>Secção</b>	<b>Método</b>	<b><math>\sigma_{\text{máx}}</math> [kPa]</b>
<b>Casquinha Branca</b>	2	Numérico	$\pm 110,97$
		Analítico	$\pm 110,20$
		Programa de cálculo	$\pm 110,20$
	3	Numérico	$\pm 91,67$
		Analítico	$\pm 91,84$
		Programa de cálculo	$\pm 91,84$
<b>Casquinha Vermelha</b>	3	Numérico	$\pm 1686,00$
		Analítico	$\pm 1749,27$
		Programa de cálculo	$\pm 1749,24$
	5	Numérico	$\pm 1310,80$
		Analítico	$\pm 1360,54$
		Programa de cálculo	$\pm 1360,52$

**Tabela 52** – Resultado das tensões devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 3 lados.

Espécie	Secção	Método	$\sigma_{\text{máx}}$ 3 Lados de exposição [kPa]			
			t=15 [min]	t=30[min]	t=45[ min]	t=60[ min]
Casquinha branca	2	Numérico	±166,50	±183,51	±220,25	±265,94
		Analítico	±136,70	±164,00	±191,08	±223,34
		Programa	±136,39	±162,90	±191,63	±228,49
	3	Numérico	±132,51	±148,30	±169,11	±189,96
		Analítico	±111,38	±130,81	±149,25	±170,56
		Programa	±111,16	±130,01	±149,68	±173,88
Casquinha vermelha	3	Numérico	±2941,60	±4378,50	±6466,60	-
		Analítico	±2840,50	±4390,37	±6257,10	-
		Programa	±2904,80	±4603,90	±7280,12	-
	5	Numérico	±2212,80	±3156,20	±4300,50	-
		Analítico	±2116,62	±3127,32	±4264,40	-
		Programa	±2157,68	±3256,15	±4864,69	-

**Tabela 53** – Resultado das tensões devido à carga mecânica e à exposição ao fogo a 4 lados.

Espécie	Secção	Método	$\sigma_{\text{máx}}$ 4 Lados de exposição [kPa]			
			t=15 [min]	t=30[ min]	t=45[ min]	t=60[ min]
Casquinha branca	2	Numérico	±159,12	±175,12	±237,97	±282,26
		Analítico	±148,37	±195,60	±250,08	±346,33
		Programa	±150,79	±197,00	±252,71	±332,00
	3	Numérico	±129,41	±151,07	±167,92	±197,00
		Analítico	±120,98	±155,91	±194,01	±256,32
		Programa	±122,80	±156,92	±196,73	±251,26
Casquinha vermelha	3	Numérico	±2888,70	±5086,70	-	-
		Analítico	±2870,18	±6880,86	-	-
		Programa	±4265,47	±11141,81	-	-
	5	Numérico	±2129,20	±3581,50	-	-
		Analítico	±2131,97	±4845,10	-	-
		Programa	±3166,69	±7868,66	-	-

Os resultados obtidos e apresentados na tabela 51, apresentam uma boa concordância.

Analisando as tabelas 52 e 53, podemos concluir que os valores obtidos através do programa de cálculo são semelhantes para a casquinha branca com exposição ao fogo a 3 e 4

lados, e para a casquinha vermelha com exposição ao fogo a 3 lados. Quando se trata da exposição a 4 lados para a casquinha vermelha, os valores revelam-se demasiado elevados. De referir que a velocidade de carbonização utilizada no programa de cálculo não considera o efeito diferenciado da direcção do fluxo de calor.

## **9.7 Conclusão**

O programa de cálculo apresentado, obedece aos objectivos definidos permitindo a obtenção de valores para todas as situações de estudo de vigas simplesmente apoiadas sujeitas a cargas concentradas e/ou uniformemente distribuídas e/ou térmicas.

Foi conseguido um programa de fácil utilização. Os resultados apresentados pelo programa apresentam boa concordância com os resultados numéricos. Propõe-se como trabalho e desenvolvimento futuro, a expansão deste programa para o estudo de vigas sob condições de apoio diferentes. Seria interessante a criação de uma biblioteca para os perfis mais utilizados e estudados.



## **Capítulo 10**

### **Conclusões e Futuros Desenvolvimentos**

## 10. Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

O modelo computacional para avaliação térmica, foi criado utilizando as características térmicas de duas espécies de casquinha em estudo, casquinha branca e vermelha, sujeitas à situação de incêndio. Este modelo revelou-se de grande importância na determinação da camada carbonizada. Para além do cálculo do perfil de temperaturas em regime transiente, foi possível registar e calcular a velocidade de crescimento da camada de carbonização. Em relação ao tamanho das secções, as maiores dimensões promovem uma superfície carbonizada considerada isolante no elemento estrutural em estudo. Através do presente estudo foi possível estabelecer equações de cálculo para a secção resultante, em função de um determinado cenário de fogo, tempo de exposição e secção recta inicial do material, úteis no projecto de elementos estruturais com estas características.

Utilizando as características térmicas e mecânicas das espécies referidas anteriormente, e admitindo a existência de carregamento mecânico uniforme, foi criado um modelo computacional. Este modelo permitiu analisar as tensões desenvolvidas numa viga simplesmente apoiada. Através deste estudo foi possível averiguar o comportamento do eixo neutro quando sujeito à situação de incêndio, e a linearidade da evolução das tensões no núcleo frio da secção. Com base em equações analíticas foi possível realizar a comparação de tensões com o modelo numérico.

Foi realizado um modelo computacional que permitiu conhecer a capacidade resistente das vigas em estudo, considerando a degradação das propriedades mecânicas da madeira em função do aumento da temperatura. Com os valores de carga máxima foi possível averiguar as tensões máximas que lhe estavam associadas. Estes valores de tensão máxima variam de acordo com a temperatura existente no núcleo frio. Com base nas equações referidas anteriormente foi possível realizar a comparação de carga máxima com o modelo numérico. Este modelo permitiu ainda a elaboração de ábacos de dimensionamento relacionando a capacidade de carga máxima que a secção pode resistir, quando exposta à situação de incêndio durante um intervalo inferior a 60 [min].

Com as propriedades do material, dimensões, condições de apoio, cargas térmicas/mecânicas associadas e as velocidades de carbonização médias obtidas pelo método numérico, foi desenvolvido um programa de cálculo para a determinação expedita de tensões máximas na secção.

Fazendo uso de todos os conhecimentos anteriores, é possível avaliar a segurança de estruturas em madeira afectadas por elevadas temperaturas e controlar na fase de projecto, o tempo de resistência dos elementos estruturais, que deve obedecer ao Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios.

## **10.1 Futuros desenvolvimentos**

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

- Realizar o mesmo estudo apresentado, mas de forma experimental, desde a validação das propriedades tabeladas, até à avaliação da capacidade resistente máxima, com vigas sujeitas à situação de incêndio;
- Realizar o mesmo estudo apresentado, para outro tipo de carregamento mecânico;
- Estudar o comportamento da madeira em secções tubulares submetidas à acção do fogo;
- Estudar o comportamento das ligações em peças de madeira submetidas à acção do fogo;
- Estudar o comportamento mecânico e termo-mecânico da madeira, com a introdução de novos materiais;
- Estudar o comportamento da madeira protegida com isolamento, submetida à acção do fogo;



## 11. Bibliografia

**ANSYS.** *Academic Research, release 12, Help System, Element reference.* s.l.: ANSYS.

**Barreira, Luísa e Fonseca, Elza. 2008.** *Cálculo da espessura carbonizada em estruturas de madeira quando submetidas à acção do fogo.* Aveiro: III Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica, 2008.

**Barreira, Luísa e Fonseca, Elza. 2009.** *Determinação da camada de carbonização na madeira de pinho quando submetida a elevadas temperaturas para diferentes direcções das fibras.* Bragança: III Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia, 2009.

**Barreira, Luísa Maria da Silva. 2008.** *Estudo Numérico do Comportamento Térmico e Mecânico de Estruturas em Madeira.* Bragança : IPB - Instituto Politécnico de Bragança, 2008.

**Cachim, Paulo Barreto. 2007.** *Construções em Madeira - A Madeira como Material de Construção.* Aveiro: Publindústria, 2007.

**Coelho, Diana Carina e Fonseca, Elza Maria. 2011.** *Avaliação estrutural de duas espécies de madeira submetidas à acção do fogo.* Maputo : 3º Congresso de Engenharia de Moçambique, 2011. Cap. XIX 547-548.

**Costa, T. M. S., Martinelli, J. R. e Matos, J. R. 2004.** *Análise térmica aplicada a estudos de ecoeficiência do bambu para processos de carbonização.* Porto Alegre : XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2004.

**Coutinho, Joana de Sousa. 1999.** *Madeiras.* Porto : FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.

**Demori, Luci Mercedes e Silva, Glauco Brentan. 2009.** *Madeira.* Maringá: Departamento de engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, 2009.

**DeWitt, David P., et al. 2006.** *Fundamentals Of Heat And Mass Transfer .* United States of America: JOHN WILEY & SONS INC, 2006. Vols. 6ª Edição ISBN: 978-0-478-05554-0.

**Duarte, António Carlos Ruivo. 2005.** *Resistência ao Fogo da Madeira e de Derivados de Madeira.* Leiria: Instituto Politécnico de Leiria - Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, 2005.

**Duarte, António. 2005.** *Resistência ao Fogo da Madeira e de Derivados de Madeira.* Leiria: Instituto Politécnico de Leiria, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria , 2005.

**EDEQ, Equipa do Departamento de Engenharia Química. 2007.** *Transferência de Calor.* Coimbra: Universidade de Coimbra, 2007.

- EN 1310. 1997.** *Round and sawn timber - Method of measurement of features.* Bruxelas : s.n., 1997.
- EN 14081-1. 2005.** *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements.* 2005.
- EN 14081-2. 2005.** *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 2: Machine grading: additional requirements for initial type testing.* 2005.
- EN 14081-3. 2005.** *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 3: Machine grading: additional requirements for factory production control.* 2005.
- EN 14081-4. 2005.** *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 4: Machine grading: settings for machine controlled systems.* 2005.
- EN 338. 1995.** *Structural timber - Strength classes.* 1995.
- EN 384. 2004.** *Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density.* 2004.
- EN 408. 1995.** *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.* 1995.
- EN1991-1-2. 2002.** *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire.* Brussels: CEN - Comité Européen de Normalisation, 2002.
- EN1995-1-1. 2004.** *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.* Brussels: CEN - Comité Européen de Normalisation, 2004.
- EN1995-1-2. 2003.** *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design.* Brussels : CEN - Comité Européen de Normalisation, 2003.
- Fonseca, Elza e Barreira, Luísa . 2009.** *Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures.* Italy: Safety and Security Engineering III, 2009.
- Fonseca, Elza Maria Morais. 1998.** *Modelação Numérica do Comportamento Termo-Mecânico de Perfis Metálicos Sujeitos à Acção do Fogo .* Dissertação para obtenção do Mestrado em Engenharia Mecânica, Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- Fonseca, Elza Maria Morais. 2003.** *Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Tubagens sob a Acção de Fortes Gradientes Térmico.* Dissertação para obtenção do Doutoramento em Engenharia Mecânica, Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

- Fonseca, José Manuel Rios. 2000.** *Fórmulário de Transferência de Calor*. Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- Franco, Sónia Isabel Saragoça. 2008.** *Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual In Situ*. Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- Gay, Rubén Regueira, López, Verónica López e Fernández, Manuel Guaita. 2011.** *Modelización por métodos numéricos de la degradación térmica de un elemento estructural de madera en situación de incendio*. Coimbra: CIMAD - 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção, 2011. Sessão 7: 103-104.
- Holman, J. P. 1999.** *Transferencia de Calor*. México: Compañia Editorial Continental, S.A., 1999. Vols. ISBN: 968-26-0649-7.
- Janssens, Marc L. 2004.** *Modeling of thermal degradation of structural wood members exposed to fire*. s.l.: Fire and materials, 2004. 28:199-207.
- Kern, Ronald Q. 1999.** *Procesos de Transferencia de Calor*. México : Compañia Editorial Continental, S.A., 1999. Vols. ISBN 968-26-1040-0.
- Kurian, Anil. 2000.** *Analytical modeling of glued laminated girded bridges using Ansys*. Ames, Iowa: s.n., 2000.
- Leal, Sandra Clara da Silva. 2010.** *Avaliação do comportamento mecânico de madeira antiga de carvalho proveniente de incêndio*. Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- Moreschi, João Carlos. 2010.** *Propriedades Tecnológicas da Madeira*. Paraná : Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2010. Vol. 3ª edição.
- NP 4305. 1995.** *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual*. 1995.
- NP EN 1912. 2003.** *Madeira para estruturas. Classes de resistencia. Atribuição de classes de qualidade e espécies*. s.l.: Instituto Português da Qualidade, 2003.
- NP-614. 1973.** *NP Madeiras - Determinação do teor em água*. Lisboa: LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1973.
- Pereira, Samuel Soares Camarinha. 2009.** *Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- Pinto, Edna Moura. 2004.** *A Madeira: um material construtivo resistente ao fogo*. s.l. : Revista Electrónica de Ciências, 2004. Número 27.

- Pinto, Edna Moura. 2005.** *Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para Eucalyptus citriodora E E. grandis.* São Carlos: Universidade de São Paulo, 2005.
- Pinto, Edna Moura e Junior, Carlito Calil. 2007.** *Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo.* s.l.: Pesquisa & Tecnologia Minerva, 2007. 3 (2): 131-140.
- Pinto, Edna Moura e Junior, Carlito Calil. 2004.** *Taxa de carbonização da madeira x resistência ao fogo.* s.l.: Técnica 92, 2004.
- Ramos, Albino Bruno da Silva. 2010.** *Avaliação do comportamento mecânico de madeira antiga.* Porto : FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- Real, Paulo Vila. 2003.** *Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural.* Amadora : Edições Orion, 2003. Vols. ISBN: 972-8620-04-7.
- Santos, José António dos. 2007.** *Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira.* Guimarães : Universidade do Minho, 2007.
- Silva, Glauco Brentan da. 2009.** *Madeira.* Maringá : Universidade Estadual de Maringá, 2009.
- Silva, V. Dias da. 2004.** *Mecânica e resistência dos materiais.* Coimbra: Zuari - Edição de livros técnicos lda., 2004. Vols. 3ª edição ISBN: 972-98155-1-8.
- Thermo-mechanical analysis of the fire performance of dowelled timber connection.*
- Racher, P., et al. 2010.** Londres : Elsevier - Engineering Structures, 2010, Vol. 32.
- Valle, Angela, et al. 2011.** *Análise térmica de vigas em madeira submetidas à situação de incêndio.* Coimbra : 2ªs Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos - Universidade de Coimbra, 2011.
- Vytenis Babrauskas, Ph. D. 2004.** *Wood Char Depth: Interpretation in fire investigations.* Moreton-in-Marsh, UK : International Symposium on Fire Investigation, Fire Service College, 2004.
- White, Robert H. e Dietenberger, Mark A. 1999.** *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material.* Madison, Wisconsin : USDA - United States Department of Agriculture, 1999.
- Winandy, Jerrold E. 1994.** *Wood Properties.* Orlando FL : Encyclopedia of Agricultural Science, 1994. Academic Press: 549-561; Vol. 4.

## **12. Anexos**

**Anexo 1 - Classes de resistência – valores característicos (EN 338)**

		Apenas choupo e resinosas									Apenas folhosas						
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Propriedades de resistência em N/mm <sup>2</sup>																	
Propriedades de resistência em flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40		30	35	40	50	60	70
Tracção axial	$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24		18	21	24	30	36	42
Tracção transversal	$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4		0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
Compressão axial	$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26		23	25	26	29	32	34
Compressão transversal	$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3		8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Corte	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8		3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Propriedade de rigidez em kN/mm <sup>2</sup>																	
Propriedade de rigidez em módulo médio elasticidade axial	$E_{0,mean}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14		10	10	11	14	17	20
Módulo de elasticidade axial (ao 5º percentil)	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4		8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Módulo médio de elasticidade transversal	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47		0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Módulo médio de corte	$G_{mean}$	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88		0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Massa volúmica em kg/m <sup>3</sup>																	
Massa volúmica	$\rho_k$	290	310	320	340	350	370	380	400	420		530	560	590	650	700	900
Massa volúmica média	$\rho_{mean}$	350	370	380	410	420	450	460	480	500		640	670	700	780	840	1080

## Anexo 2.1 – Ficha técnica de casquinha branca



### CASQUINHA BRANCA

**Nomes Científicos** *Picea abies*, Karst. *Picea excelsa*.

**Família** *Coniferas*

**Origens** (mais comuns) Norte da Europa

**Nomes** (mais comuns) Casquinha Branca

**Borne** Indiferenciado

**Cerne**  
Cor Branco amarelado

**Veio/Fio** -

**Grão** Fino

**Textura** Fina, lustrosa e com fibra recta

**Medula** -



Transformação		Características Tecnológicas	
<b>Acabamento</b>	Regular, convém eliminar resinas	<b>Peso em Verde (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	800
<b>Aparafusamento</b>	Regular, pré-furação aconselhada	<b>Peso a 12% (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	450
<b>Colagem</b>	Boa	<b>Retracção Linear Tangencial (T%)</b>	9
<b>Encurvamento</b>	-	<b>Retracção Linear Radial (R%)</b>	5
<b>Maquinação</b>	Boa	<b>Retracção Volumétrica para 1% de Humidade (V%)</b>	13,5
<b>Pregagem</b>	Regular	<b>Contração de Ruptura à Compressão Axial (C12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	45
<b>Secagem</b>	Rápida, riscos elevados de fendas e de desprendimento de nós	<b>Contração de Ruptura à Tracção Axial (C12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	84
<b>Serragem</b>	Regular	<b>Contração de Ruptura à Flexão Estática (F12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	73
<b>Folha</b>	-	<b>Módulo de Elasticidade em Flexão (E12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	11.146

Observações	
<b>Formas de Comercialização</b>	Prancha
<b>Durabilidade</b>	Durabilidade natural média
<b>Conservação</b>	Impregnabilidade do borne é fraca, o cerne não é impregnável. Resistência a fungos baixa, resistência a xilófagos e térmitas média.
<b>Outras Considerações</b>	-

Aplicações mais comuns		
Aduelas	Lambrins/Forros	Rodapés
Carpintaria de Interior	Mobiliário	
Escadas	Portas	
Instrumentos Musicais	Remos	

A amostra de madeira reproduzida nesta ficha é meramente exemplificativa, não podendo ser totalmente fiel à realidade da madeira, produto natural e variável no seu aspecto.  
Bibliografia: Guía de las principales Maderas y de su Secado (Ediciones Mundi-Prensa, 2003)

## Anexo 2.2 – Ficha técnica de casquinha vermelha



### CASQUINHA VERMELHA

<b>Nomes Científicos</b>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>L. Pinus rubra</i> , <i>Pinus borealis</i> .
<b>Família</b>	<i>Coníferas</i>
<b>Origens</b> (mais comuns)	Norte da Europa
<b>Nomes</b> (mais comuns)	Casquinha Vermelha
<b>Borne</b>	Amarelo pálido, diferenciado
<b>Cerne</b>	
Cor	Vermelho acastanhado
Veio/Fio	-
Grão	Fino a grosseiro
Textura	Média, uniforme com fibra recta
<b>Medula</b>	-



Transformação		Características Tecnológicas	
<b>Acabamento</b>	Bom	<b>Peso em Verde (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	800
<b>Aparafusamento</b>	Bom	<b>Peso a 12% (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	530
<b>Colagem</b>	Boa	<b>Retracção Linear Tangencial (T%)</b>	8
<b>Encurvamento</b>	-	<b>Retracção Linear Radial (R%)</b>	4,5
<b>Maquinação</b>	Boa	<b>Retracção Volumétrica para 1% de Humidade (V%)</b>	13,5
<b>Pregagem</b>	Boa	<b>Contração de Ruptura à Compressão Axial (C12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	48
<b>Secagem</b>	Fácil, não apresenta dificuldades excepto nós que se podem soltar	<b>Contração de Ruptura à Tracção Axial (C12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	96
<b>Serragem</b>	Boa	<b>Contração de Ruptura à Flexão Estática (F12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	101
<b>Folha</b>	-	<b>Módulo de Elasticidade em Flexão (E12) (N/mm<sup>2</sup>)</b>	11.146

#### Observações

<b>Formas de Comercialização</b>	Prancha
<b>Durabilidade</b>	Durabilidade natural média
<b>Conservação</b>	Impregnabilidade média do borne, o cerne não é impregnável. Resistência média a fungos, xilófagos e a térmitas
<b>Outras Considerações</b>	-

#### Aplicações mais comuns

Aduelas	Lambrins/Forros	Soalhos
Caixilharia	Mobiliário	
Carpintaria de Interior e Exterior	Portas	
Embalagens	Rodapés	

A amostra de madeira reproduzida nesta ficha é meramente exemplificativa, não podendo ser totalmente fiel à realidade da madeira, produto natural e variável no seu aspecto.  
Bibliografia: Guía de las principales Maderas y de su Secado (Ediciones Mundi-Prensa, 2003)

## Anexo 3 – Códigos do Ansys

### Anexo 3.1 – Propriedades térmicas de casquinha branca

```
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03
MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03
MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,DENS, 1, 1, 0.515200E+03, 0.515200E+03, 0.515200E+03, 0.460000E+03, 0.460000E+03
MPDATA,DENS, 1, 6, 0.460000E+03, 0.427800E+03, 0.349600E+03, 0.239200E+03, 0.174800E+03
MPDATA,DENS, 1, 11, 0.128800E+03, 0.119600E+03, 0.000000E+00,
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, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03
MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03
MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,C, 1, 1, 0.153000E+04, 0.177000E+04, 0.136000E+05, 0.135000E+05, 0.212000E+04
MPDATA,C, 1, 6, 0.200000E+04, 0.162000E+04, 0.710000E+03, 0.850000E+03, 0.100000E+04
MPDATA,C, 1, 11, 0.140000E+04, 0.165000E+04, 0.165000E+04,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.000000E+00,
MPDATA,EMIS, 1, 1, 0.800000E+00,
```

### Anexo 3.2 – Propriedades térmicas da casquinha vermelha

```
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03
MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03
MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,DENS, 1, 1, 0.582400E+03, 0.582400E+03, 0.582400E+03, 0.520000E+03, 0.520000E+03
MPDATA,DENS, 1, 6, 0.520000E+03, 0.483600E+03, 0.395200E+03, 0.270400E+03, 0.197600E+03
MPDATA,DENS, 1, 11, 0.145600E+03, 0.135200E+03, 0.000000E+00,
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, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03
MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03
MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,C, 1, 1, 0.153000E+04, 0.177000E+04, 0.136000E+05, 0.135000E+05, 0.212000E+04
MPDATA,C, 1, 6, 0.200000E+04, 0.162000E+04, 0.710000E+03, 0.850000E+03, 0.100000E+04
```

MPDATA,C , 1, 11, 0.1400000E+04, 0.1650000E+04, 0.1650000E+04,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,  
MPDATA,EMIS, 1, 1, 0.8000000E+00,

### Anexo 3.3 – Propriedades mecânicas da casquinha branca

MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,EX , 1, 1, 0.1030000E+05, 0.5150000E+04, 0.1030000E+03, 0.1030000E+03,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,EY , 1, 1, 0.1050600E+04, 0.5253000E+03, 0.1050000E+02, 0.1050000E+02,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,EZ , 1, 1, 0.4017000E+03, 0.2009000E+03, 0.4000000E+01, 0.4000000E+01,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,NUXY, 1, 1, 0.3478200E-01, 0.3478200E-01, 0.3476214E-01, 0.3476214E-01,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,NUYZ, 1, 1, 0.1670882E+00, 0.1671298E+00, 0.1664762E+00, 0.1664762E+00,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,NUXZ, 1, 1, 0.1294800E-01, 0.1295122E-01, 0.1289320E-01, 0.1289320E-01,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,GXY , 1, 1, 0.7210000E+03, 0.3605000E+03, 0.7200000E+01, 0.7200000E+01,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,GYZ , 1, 1, 0.6180000E+02, 0.3090000E+02, 0.6000000E+00, 0.6000000E+00,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.3000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,GXZ , 1, 1, 0.5974000E+03, 0.2987000E+03, 0.6000000E+01, 0.6000000E+01,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,  
MPDATA,ALPX, 1, 1, 0.3000000E-05,  
MPTEMP  
MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.9900000E+02, 0.1100000E+03, 0.1200000E+03, 0.1300000E+03  
MPTEMP, 6, 0.2000000E+03, 0.2500000E+03, 0.3000000E+03, 0.3500000E+03, 0.4000000E+03  
MPTEMP, 11, 0.6000000E+03, 0.8000000E+03, 0.1200000E+04,  
MPDATA,DENS, 1, 1, 0.5152000E+03, 0.5152000E+03, 0.5152000E+03, 0.4600000E+03, 0.4600000E+03  
MPDATA,DENS, 1, 6, 0.4600000E+03, 0.4278000E+03, 0.3496000E+03, 0.2392000E+03, 0.1748000E+03  
MPDATA,DENS, 1, 11, 0.1288000E+03, 0.1196000E+03, 0.0000000E+00,  
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, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03  
 MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03  
 MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,C , 1, 1, 0.153000E+04, 0.177000E+04, 0.136000E+05, 0.135000E+05, 0.212000E+04  
 MPDATA,C , 1, 6, 0.200000E+04, 0.162000E+04, 0.710000E+03, 0.850000E+03, 0.100000E+04  
 MPDATA,C , 1, 11, 0.140000E+04, 0.165000E+04, 0.165000E+04,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.000000E+00,  
 MPDATA,EMIS, 1, 1, 0.800000E+00,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,PRXY, 1, 1, 0.341000E+00, 0.341000E+00, 0.341000E+00, 0.341000E+00,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,PRYZ, 1, 1, 0.437000E+00, 0.437000E+00, 0.437000E+00, 0.437000E+00,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,PRXZ, 1, 1, 0.332000E+00, 0.332000E+00, 0.332000E+00, 0.332000E+00,

### Anexo 3.4 – Propriedades mecânicas da casquinha vermelha

MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,EX , 1, 1, 0.920000E+04, 0.460000E+04, 0.920000E+02, 0.920000E+02,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,EY , 1, 1, 0.800400E+03, 0.400200E+03, 0.800000E+01, 0.800000E+01,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,EZ , 1, 1, 0.818800E+03, 0.409400E+03, 0.820000E+01, 0.820000E+01,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,NUXY, 1, 1, 0.313200E-01, 0.313200E-01, 0.3130435E-01, 0.3130435E-01,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,NUYZ, 1, 1, 0.4091954E+00, 0.4091954E+00, 0.410000E+00, 0.410000E+00,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,NUXZ, 1, 1, 0.3079400E-01, 0.3079400E-01, 0.3083913E-01, 0.3083913E-01,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,GXY , 1, 1, 0.607200E+03, 0.303600E+03, 0.610000E+01, 0.610000E+01,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,GYZ , 1, 1, 0.101200E+03, 0.506000E+02, 0.100000E+01, 0.100000E+01,  
 MPTEMP  
 MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,  
 MPDATA,GXZ , 1, 1, 0.708400E+03, 0.954200E+03, 0.710000E+01, 0.710000E+01,

```

MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.000000E+00,
MPDATA,ALPX, 1, 1, 0.300000E-05,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03
MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03
MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,DENS, 1, 1, 0.582400E+03, 0.582400E+03, 0.582400E+03, 0.520000E+03, 0.520000E+03
MPDATA,DENS, 1, 6, 0.520000E+03, 0.483600E+03, 0.395200E+03, 0.270400E+03, 0.197600E+03
MPDATA,DENS, 1, 11, 0.145600E+03, 0.135200E+03, 0.000000E+00,
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, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03
MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03
MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,C, 1, 1, 0.153000E+04, 0.177000E+04, 0.136000E+05, 0.135000E+05, 0.212000E+04
MPDATA,C, 1, 6, 0.200000E+04, 0.162000E+04, 0.710000E+03, 0.850000E+03, 0.100000E+04
MPDATA,C, 1, 11, 0.140000E+04, 0.165000E+04, 0.165000E+04,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.000000E+00,
MPDATA,EMIS, 1, 1, 0.800000E+00,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,PRXY, 1, 1, 0.360000E+00, 0.360000E+00, 0.360000E+00, 0.360000E+00,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,PRYZ, 1, 1, 0.400000E+00, 0.400000E+00, 0.400000E+00, 0.400000E+00,
MPTEMP
MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.300000E+03, 0.120000E+04,
MPDATA,PRXZ, 1, 1, 0.346000E+00, 0.346000E+00, 0.346000E+00, 0.346000E+00,

```

### Anexo 3.5 – Modelo térmico (perfil com exposição ao fogo a 3 lados)

```

/BATCH
!/GRA,POWER
!/GST,ON
!/PLO,INFO,3
!/GRO,CURL,ON
!/CPLANE,1
!/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/CWD,'G:\tесе'
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0

```

```
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
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,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
!/COM,
!/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
!/COM, Structural
!/COM, Thermal
!*
/PREP7
!*
ET,1,SOLID70
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,350
MPTEMP,4,500
MPTEMP,5,800
MPTEMP,6,1200
MPDATA,KXX,1,,0.12
MPDATA,KXX,1,,0.15
MPDATA,KXX,1,,0.07
MPDATA,KXX,1,,0.09
MPDATA,KXX,1,,0.35
MPDATA,KXX,1,,1.5
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,110
MPTEMP,4,120
MPTEMP,5,130
MPTEMP,6,200
MPTEMP,7,250
MPTEMP,8,300
MPTEMP,9,350
MPTEMP,10,400
MPTEMP,11,600
MPTEMP,12,800
MPTEMP,13,1200
MPDATA,C,1,,1.53
```

MPDATA,C,1,,1.77  
MPDATA,C,1,,13.6  
MPDATA,C,1,,13.5  
MPDATA,C,1,,2.12  
MPDATA,C,1,,2  
MPDATA,C,1,,1.62  
MPDATA,C,1,,0.71  
MPDATA,C,1,,0.85  
MPDATA,C,1,,1  
MPDATA,C,1,,1.4  
MPDATA,C,1,,1.65  
MPDATA,C,1,,1.65  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,99  
MPTEMP,3,110  
MPTEMP,4,120  
MPTEMP,5,130  
MPTEMP,6,200  
MPTEMP,7,250  
MPTEMP,8,300  
MPTEMP,9,350  
MPTEMP,10,400  
MPTEMP,11,600  
MPTEMP,12,800  
MPTEMP,13,1200  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,427.8  
MPDATA,DENS,1,,349.6  
MPDATA,DENS,1,,239.2  
MPDATA,DENS,1,,174.80  
MPDATA,DENS,1,,128.8  
MPDATA,DENS,1,,119.6  
MPDATA,DENS,1,,0  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EMIS,1,,0.8  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,99  
MPTEMP,3,110  
MPTEMP,4,120  
MPTEMP,5,130  
MPTEMP,6,200  
MPTEMP,7,250  
MPTEMP,8,300

```

MPTEMP,9,350
MPTEMP,10,400
MPTEMP,11,600
MPTEMP,12,800
MPTEMP,13,1200
MPDE,C,1
MPDATA,C,1,,1.53e3
MPDATA,C,1,,1.77e3
MPDATA,C,1,,13.6e3
MPDATA,C,1,,13.5e3
MPDATA,C,1,,2.12e3
MPDATA,C,1,,2e3
MPDATA,C,1,,1.62e3
MPDATA,C,1,,0.71e3
MPDATA,C,1,,0.85e3
MPDATA,C,1,,1e3
MPDATA,C,1,,1.4e3
MPDATA,C,1,,1.65e3
MPDATA,C,1,,1.65e3
K,1,0,-.150,-.125,
K,2,0,0.15,-0.125,
K,3,0,0.15,0.125,
K,4,0,-0.15,0.125,
!/VIEW,1,1,1,1
!/ANG,1
!/REP,FAST
LSTR, 4, 3
LSTR, 3, 2
LSTR, 2, 1
LSTR, 1, 4
FLST,2,4,4
FITEM,2,2
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,4
AL,P51X
N,7000,1,1,1,,,,
!*
VOFFST,1,3, ,
!/AUTO,1
!/REP,FAST
FLST,5,12,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-12
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,12, , , ,1
!*

```

```

CM,_Y,VOLU
VSEL, , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
*DIM,FOGO,TABLE,121,1,1, , ,
*SET,FOGO(1,0,1) , 0
*SET,FOGO(1,1,1) , 20
*SET,FOGO(2,0,1) , 60
*SET,FOGO(2,1,1) , 349
*SET,FOGO(3,0,1) , 120
*SET,FOGO(3,1,1) , 445
*SET,FOGO(4,0,1) , 180
*SET,FOGO(4,1,1) , 502
*SET,FOGO(5,0,1) , 240
*SET,FOGO(5,1,1) , 544
*SET,FOGO(6,0,1) , 300
*SET,FOGO(6,1,1) , 576
*SET,FOGO(7,0,1) , 360
*SET,FOGO(7,1,1) , 603
*SET,FOGO(8,0,1) , 420
*SET,FOGO(8,1,1) , 626
*SET,FOGO(9,0,1) , 480
*SET,FOGO(9,1,1) , 645
*SET,FOGO(10,0,1) , 540
*SET,FOGO(10,1,1) , 663
*SET,FOGO(11,0,1) , 600
*SET,FOGO(11,1,1) , 678
*SET,FOGO(12,0,1) , 660
*SET,FOGO(12,1,1) , 693
*SET,FOGO(13,0,1) , 720
*SET,FOGO(13,1,1) , 705
*SET,FOGO(14,0,1) , 780
*SET,FOGO(14,1,1) , 717
*SET,FOGO(15,0,1) , 840
*SET,FOGO(15,1,1) , 728
*SET,FOGO(16,0,1) , 900
*SET,FOGO(16,1,1) , 739
*SET,FOGO(17,0,1) , 960
*SET,FOGO(17,1,1) , 748
*SET,FOGO(18,0,1) , 1020
*SET,FOGO(18,1,1) , 757
*SET,FOGO(19,0,1) , 1080
*SET,FOGO(19,1,1) , 766

```

\*SET,FOGO(20,0,1) , 1140  
\*SET,FOGO(20,1,1) , 774  
\*SET,FOGO(21,0,1) , 1200  
\*SET,FOGO(21,1,1) , 781  
\*SET,FOGO(22,0,1) , 1260  
\*SET,FOGO(22,1,1) , 789  
\*SET,FOGO(23,0,1) , 1320  
\*SET,FOGO(23,1,1) , 796  
\*SET,FOGO(24,0,1) , 1380  
\*SET,FOGO(24,1,1) , 802  
\*SET,FOGO(25,0,1) , 1440  
\*SET,FOGO(25,1,1) , 809  
\*SET,FOGO(26,0,1) , 1500  
\*SET,FOGO(26,1,1) , 815  
\*SET,FOGO(27,0,1) , 1560  
\*SET,FOGO(27,1,1) , 820  
\*SET,FOGO(28,0,1) , 1620  
\*SET,FOGO(28,1,1) , 826  
\*SET,FOGO(29,0,1) , 1680  
\*SET,FOGO(29,1,1) , 832  
\*SET,FOGO(30,0,1) , 1740  
\*SET,FOGO(30,1,1) , 837  
\*SET,FOGO(31,0,1) , 1800  
\*SET,FOGO(31,1,1) , 842  
\*SET,FOGO(32,0,1) , 1860  
\*SET,FOGO(32,1,1) , 847  
\*SET,FOGO(33,0,1) , 1920  
\*SET,FOGO(33,1,1) , 851  
\*SET,FOGO(34,0,1) , 1980  
\*SET,FOGO(34,1,1) , 856  
\*SET,FOGO(35,0,1) , 2040  
\*SET,FOGO(35,1,1) , 860  
\*SET,FOGO(36,0,1) , 2100  
\*SET,FOGO(36,1,1) , 865  
\*SET,FOGO(37,0,1) , 2160  
\*SET,FOGO(37,1,1) , 869  
\*SET,FOGO(38,0,1) , 2220  
\*SET,FOGO(38,1,1) , 873  
\*SET,FOGO(39,0,1) , 2280  
\*SET,FOGO(39,1,1) , 877  
\*SET,FOGO(40,0,1) , 2340  
\*SET,FOGO(40,1,1) , 881  
\*SET,FOGO(41,0,1) , 2400  
\*SET,FOGO(41,1,1) , 885  
\*SET,FOGO(42,0,1) , 2460  
\*SET,FOGO(42,1,1) , 888  
\*SET,FOGO(43,0,1) , 2520  
\*SET,FOGO(43,1,1) , 892  
\*SET,FOGO(44,0,1) , 2580  
\*SET,FOGO(44,1,1) , 896  
\*SET,FOGO(45,0,1) , 2640

\*SET,FOGO(45,1,1) , 899  
\*SET,FOGO(46,0,1) , 2700  
\*SET,FOGO(46,1,1) , 902  
\*SET,FOGO(47,0,1) , 2760  
\*SET,FOGO(47,1,1) , 906  
\*SET,FOGO(48,0,1) , 2820  
\*SET,FOGO(48,1,1) , 909  
\*SET,FOGO(49,0,1) , 2880  
\*SET,FOGO(49,1,1) , 912  
\*SET,FOGO(50,0,1) , 2940  
\*SET,FOGO(50,1,1) , 915  
\*SET,FOGO(51,0,1) , 3000  
\*SET,FOGO(51,1,1) , 918  
\*SET,FOGO(52,0,1) , 3060  
\*SET,FOGO(52,1,1) , 921  
\*SET,FOGO(53,0,1) , 3120  
\*SET,FOGO(53,1,1) , 924  
\*SET,FOGO(54,0,1) , 3180  
\*SET,FOGO(54,1,1) , 927  
\*SET,FOGO(55,0,1) , 3240  
\*SET,FOGO(55,1,1) , 930  
\*SET,FOGO(56,0,1) , 3300  
\*SET,FOGO(56,1,1) , 932  
\*SET,FOGO(57,0,1) , 3360  
\*SET,FOGO(57,1,1) , 935  
\*SET,FOGO(58,0,1) , 3420  
\*SET,FOGO(58,1,1) , 938  
\*SET,FOGO(59,0,1) , 3480  
\*SET,FOGO(59,1,1) , 940  
\*SET,FOGO(60,0,1) , 3540  
\*SET,FOGO(60,1,1) , 943  
\*SET,FOGO(61,0,1) , 3600  
\*SET,FOGO(61,1,1) , 945  
\*SET,FOGO(62,0,1) , 3660  
\*SET,FOGO(62,1,1) , 948  
\*SET,FOGO(63,0,1) , 3720  
\*SET,FOGO(63,1,1) , 950  
\*SET,FOGO(64,0,1) , 3780  
\*SET,FOGO(64,1,1) , 953  
\*SET,FOGO(65,0,1) , 3840  
\*SET,FOGO(65,1,1) , 955  
\*SET,FOGO(66,0,1) , 3900  
\*SET,FOGO(66,1,1) , 957  
\*SET,FOGO(67,0,1) , 3960  
\*SET,FOGO(67,1,1) , 960  
\*SET,FOGO(68,0,1) , 4020  
\*SET,FOGO(68,1,1) , 962  
\*SET,FOGO(69,0,1) , 4080  
\*SET,FOGO(69,1,1) , 964  
\*SET,FOGO(70,0,1) , 4140  
\*SET,FOGO(70,1,1) , 966

\*SET,FOGO(71,0,1) , 4200  
\*SET,FOGO(71,1,1) , 968  
\*SET,FOGO(72,0,1) , 4260  
\*SET,FOGO(72,1,1) , 971  
\*SET,FOGO(73,0,1) , 4320  
\*SET,FOGO(73,1,1) , 973  
\*SET,FOGO(74,0,1) , 4380  
\*SET,FOGO(74,1,1) , 975  
\*SET,FOGO(75,0,1) , 4440  
\*SET,FOGO(75,1,1) , 977  
\*SET,FOGO(76,0,1) , 4500  
\*SET,FOGO(76,1,1) , 979  
\*SET,FOGO(77,0,1) , 4560  
\*SET,FOGO(77,1,1) , 981  
\*SET,FOGO(78,0,1) , 4620  
\*SET,FOGO(78,1,1) , 983  
\*SET,FOGO(79,0,1) , 4680  
\*SET,FOGO(79,1,1) , 985  
\*SET,FOGO(80,0,1) , 4740  
\*SET,FOGO(80,1,1) , 986  
\*SET,FOGO(81,0,1) , 4800  
\*SET,FOGO(81,1,1) , 988  
\*SET,FOGO(82,0,1) , 4860  
\*SET,FOGO(82,1,1) , 990  
\*SET,FOGO(83,0,1) , 4920  
\*SET,FOGO(83,1,1) , 992  
\*SET,FOGO(84,0,1) , 4980  
\*SET,FOGO(84,1,1) , 994  
\*SET,FOGO(85,0,1) , 5040  
\*SET,FOGO(85,1,1) , 996  
\*SET,FOGO(86,0,1) , 5100  
\*SET,FOGO(86,1,1) , 997  
\*SET,FOGO(87,0,1) , 5160  
\*SET,FOGO(87,1,1) , 999  
\*SET,FOGO(88,0,1) , 5220  
\*SET,FOGO(88,1,1) , 1001  
\*SET,FOGO(89,0,1) , 5280  
\*SET,FOGO(89,1,1) , 1003  
\*SET,FOGO(90,0,1) , 5340  
\*SET,FOGO(90,1,1) , 1004  
\*SET,FOGO(91,0,1) , 5400  
\*SET,FOGO(91,1,1) , 1006  
\*SET,FOGO(92,0,1) , 5460  
\*SET,FOGO(92,1,1) , 1008  
\*SET,FOGO(93,0,1) , 5520  
\*SET,FOGO(93,1,1) , 1009  
\*SET,FOGO(94,0,1) , 5580  
\*SET,FOGO(94,1,1) , 1011  
\*SET,FOGO(95,0,1) , 5640  
\*SET,FOGO(95,1,1) , 1012  
\*SET,FOGO(96,0,1) , 5700

\*SET,FOGO(96,1,1) , 1014  
\*SET,FOGO(97,0,1) , 5760  
\*SET,FOGO(97,1,1) , 1016  
\*SET,FOGO(98,0,1) , 5820  
\*SET,FOGO(98,1,1) , 1017  
\*SET,FOGO(99,0,1) , 5880  
\*SET,FOGO(99,1,1) , 1019  
\*SET,FOGO(100,0,1) , 5940  
\*SET,FOGO(100,1,1) , 1020  
\*SET,FOGO(101,0,1) , 6000  
\*SET,FOGO(101,1,1) , 1022  
\*SET,FOGO(102,0,1) , 6060  
\*SET,FOGO(102,1,1) , 1023  
\*SET,FOGO(103,0,1) , 6120  
\*SET,FOGO(103,1,1) , 1025  
\*SET,FOGO(104,0,1) , 6180  
\*SET,FOGO(104,1,1) , 1026  
\*SET,FOGO(105,0,1) , 6240  
\*SET,FOGO(105,1,1) , 1028  
\*SET,FOGO(106,0,1) , 6300  
\*SET,FOGO(106,1,1) , 1029  
\*SET,FOGO(107,0,1) , 6360  
\*SET,FOGO(107,1,1) , 1030  
\*SET,FOGO(108,0,1) , 6420  
\*SET,FOGO(108,1,1) , 1032  
\*SET,FOGO(109,0,1) , 6480  
\*SET,FOGO(109,1,1) , 1033  
\*SET,FOGO(110,0,1) , 6540  
\*SET,FOGO(110,1,1) , 1035  
\*SET,FOGO(111,0,1) , 6600  
\*SET,FOGO(111,1,1) , 1036  
\*SET,FOGO(112,0,1) , 6660  
\*SET,FOGO(112,1,1) , 1037  
\*SET,FOGO(113,0,1) , 6720  
\*SET,FOGO(113,1,1) , 1039  
\*SET,FOGO(114,0,1) , 6780  
\*SET,FOGO(114,1,1) , 1040  
\*SET,FOGO(115,0,1) , 6840  
\*SET,FOGO(115,1,1) , 1041  
\*SET,FOGO(116,0,1) , 6900  
\*SET,FOGO(116,1,1) , 1043  
\*SET,FOGO(117,0,1) , 6960  
\*SET,FOGO(117,1,1) , 1044  
\*SET,FOGO(118,0,1) , 7020  
\*SET,FOGO(118,1,1) , 1045  
\*SET,FOGO(119,0,1) , 7080  
\*SET,FOGO(119,1,1) , 1047  
\*SET,FOGO(120,0,1) , 7140  
\*SET,FOGO(120,1,1) , 1048  
\*SET,FOGO(121,0,1) , 7200  
\*SET,FOGO(121,1,1) , 1049

```

!*
STEF,0.567E-07
TOFFST,273.15
RADOPT,0.10000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.10000000149,0.10000000149
SPCNOD,1,70000
!*
FLST,2,2198,1,ORDE,2
FITEM,2,7000
FITEM,2,-9197
IC,P51X,TEMP,20,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,7000
!*
!*
/GO
D,P51X, , %FOGO% , , , TEMP, , , ,
!*
STEF,0.567E-07
TOFFST,273.15
RADOPT,0.10000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.10000000149,0.10000000149
SPCNOD,1,7000
!*
! VPLOT
! /VIEW,1,1,1,1
! /ANG,1
! /REP,FAST
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,-6
/GO
SFA,P51X,1,CONV,25, %FOGO%
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,-6
SFA,P51X, ,RDSF,1,1,
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,1
NSUBST,5,0.1,5
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
NCNV,2,0,0,0,0
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,900
! /STATUS,SOLU
SOLVE

```

### Anexo 3.6 – Modelo mecânico (perfil com exposição ao fogo a 3 lados)

```
/BATCH
!/GRA,POWER
!/GST,ON
!/PLO,INFO,3
!/GRO,CURL,ON
!/CPLANE,1
!/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
/CWD,'G:\'
/CWD,'G:\tese\m'
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
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,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
ET,1,SOLID185
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,1,REFT,,
MPDATA,ALPX,1,,3e-3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,300
MPTEMP,4,1200
MPDE,NUXY,1
MPDE,NUYZ,1
MPDE,NUXZ,1
MPDE,PRXY,1
MPDE,PRYZ,1
MPDE,PRXZ,1
MPDATA,EX,1,,10300
MPDATA,EX,1,,5150
MPDATA,EX,1,,103
MPDATA,EX,1,,103
MPDATA,EY,1,,1050
MPDATA,EY,1,,525.3
MPDATA,EY,1,,10.51
```

MPDATA,EY,1,,10.51  
 MPDATA,EZ,1,,401.7  
 MPDATA,EZ,1,,200.85  
 MPDATA,EZ,1,,4.02  
 MPDATA,EZ,1,,4.02  
 MPDATA,PRXY,1,,0.332  
 MPDATA,PRXY,1,,0.332  
 MPDATA,PRXY,1,,0.332  
 MPDATA,PRXY,1,,0.332  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
 MPDATA,GXY,1,,597.40  
 MPDATA,GXY,1,,298.7  
 MPDATA,GXY,1,,5.97  
 MPDATA,GXY,1,,5.97  
 MPDATA,GYZ,1,,61.8  
 MPDATA,GYZ,1,,30.9  
 MPDATA,GYZ,1,,0.62  
 MPDATA,GYZ,1,,0.62  
 MPDATA,GXZ,1,,721  
 MPDATA,GXZ,1,,360.5  
 MPDATA,GXZ,1,,7.21  
 MPDATA,GXZ,1,,7.21  
 K,1,0,-.15,-.125,  
 K,2,0,0.15,-0.125,  
 K,3,0,0.15,0.125,  
 K,4,0,-0.15,0.125,  
 K,4,0,-0.15,0.125,  
 !/VIEW,1,1,1,1  
 !/ANG,1  
 !/REP,FAST  
 LSTR, 3, 2  
 LSTR, 2, 1  
 LSTR, 1, 4  
 LSTR, 4, 3  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,1  
 FITEM,2,2  
 FITEM,2,4  
 FITEM,2,3  
 AL,P51X  
 !\*  
 VOFFST,1,3, ,  
 FLST,5,12,4,ORDE,2  
 FITEM,5,1

```

FITEM,5,-12
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,12, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,2,13,1,ORDE,13
FITEM,2,284
FITEM,2,296
FITEM,2,307
FITEM,2,318
FITEM,2,329
FITEM,2,340
FITEM,2,351
FITEM,2,362
FITEM,2,373
FITEM,2,384
FITEM,2,395
FITEM,2,406
FITEM,2,417
!*
/GO
D,P51X, ,0, , , ,UX,UY,UZ, , ,
FLST,2,13,1,ORDE,13
FITEM,2,271
FITEM,2,452
FITEM,2,463
FITEM,2,474
FITEM,2,485
FITEM,2,496
FITEM,2,507
FITEM,2,518
FITEM,2,529
FITEM,2,540
FITEM,2,551
FITEM,2,562
FITEM,2,573
!*

```

```

/GO
D,P51X,,0,,UY,UZ,,,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,571.43
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0
!/STATUS,SOLU
SOLVE

```

### Anexo 3.7 – Modelo termo-mecânico (perfil com exposição ao fogo a 3 lados)

```

/BATCH
!/GRA,POWER
!/GST,ON
!/PLO,INFO,3
!/GRO,CURL,ON
!/CPLANE,1
!/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
!*
/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
!*
/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
/PREP7
!*
ET,1,PLANE77
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,350
MPTEMP,4,500
MPTEMP,5,800
MPTEMP,6,1200
MPDATA,KXX,1,,0.12
MPDATA,KXX,1,,0.15
MPDATA,KXX,1,,0.07
MPDATA,KXX,1,,0.09
MPDATA,KXX,1,,0.35
MPDATA,KXX,1,,1.50
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,110
MPTEMP,4,120
MPTEMP,5,130
MPTEMP,6,200
MPTEMP,7,250
MPTEMP,8,300
MPTEMP,9,350
MPTEMP,10,400
MPTEMP,11,600
MPTEMP,12,800
MPTEMP,13,1200
MPDATA,C,1,,1530
MPDATA,C,1,,1770
MPDATA,C,1,,13600
MPDATA,C,1,,13500
MPDATA,C,1,,2120
MPDATA,C,1,,2000
MPDATA,C,1,,1620
MPDATA,C,1,,710
MPDATA,C,1,,850
MPDATA,C,1,,1000
MPDATA,C,1,,1400
MPDATA,C,1,,1650
MPDATA,C,1,,1650
MPTEMP,,,,,,,,
```

MPTEMP,1,0  
MPDATA,EMIS,1,,0.8  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,99  
MPTEMP,3,110  
MPTEMP,4,120  
MPTEMP,5,130  
MPTEMP,6,200  
MPTEMP,7,250  
MPTEMP,8,300  
MPTEMP,9,350  
MPTEMP,10,400  
MPTEMP,11,600  
MPTEMP,12,800  
MPTEMP,13,1200  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,427.8  
MPDATA,DENS,1,,349.6  
MPDATA,DENS,1,,239.2  
MPDATA,DENS,1,,174.8  
MPDATA,DENS,1,,128.8  
MPDATA,DENS,1,,119.6  
MPDATA,DENS,1,,0  
N,70000,0.5,0.5,0,,,  
/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  
/NOPR  
/PMETH,OFF,0  
KEYW,PR\_SET,1  
KEYW,PR\_STRUC,1  
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,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
/PREP7
!*
ETDEL,1
!*
ET,1,SOLID70
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,1,REFT,,
MPDATA,ALPX,1,,3e-6
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,300
MPTEMP,4,1200
MPDE,NUXY,1
MPDE,NUYZ,1
MPDE,NUXZ,1
MPDE,PRXY,1
MPDE,PRYZ,1
MPDE,PRXZ,1
MPDATA,EX,1,,10300
MPDATA,EX,1,,5150
MPDATA,EX,1,,103
MPDATA,EX,1,,103
MPDATA,EY,1,,401.7
MPDATA,EY,1,,200.9
MPDATA,EY,1,,4
MPDATA,EY,1,,4
MPDATA,EZ,1,,1050.6
MPDATA,EZ,1,,525.3
MPDATA,EZ,1,,10.5
MPDATA,EZ,1,,10.5
MPDATA,PRXY,1,,0.332
MPDATA,PRXY,1,,0.332
MPDATA,PRXY,1,,0.332
MPDATA,PRXY,1,,0.332
MPDATA,PRYZ,1,,0.336
MPDATA,PRYZ,1,,0.336
MPDATA,PRYZ,1,,0.336
MPDATA,PRYZ,1,,0.336
MPDATA,PRXZ,1,,0.341
MPDATA,PRXZ,1,,0.341
MPDATA,PRXZ,1,,0.341
```

```

MPDATA,PRXZ,1,,0.341
MPDATA,GXY,1,,597.4
MPDATA,GXY,1,,298.7
MPDATA,GXY,1,,6
MPDATA,GXY,1,,6
MPDATA,GYZ,1,,61.8
MPDATA,GYZ,1,,30.9
MPDATA,GYZ,1,,0.6
MPDATA,GYZ,1,,0.6
MPDATA,GXZ,1,,721
MPDATA,GXZ,1,,360.5
MPDATA,GXZ,1,,7.2
MPDATA,GXZ,1,,7.2
!/EXIT,ALL
!/COM,ANSYS RELEASE 12.0.1 UP20090224 22:06:15 05/11/2011
/PREP7
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
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,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
K,1,0,,150,,175,
K,2,0,-0.15,0.175,
K,3,0,-0.15,-0.175,
K,4,0,0.15,-0.175,
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 1
! SAVE, file,db,
FLST,2,4,4
FITEM,2,2
FITEM,2,1
FITEM,2,4
FITEM,2,3
AL,P51X
!*
VOFFST,1,3, ,
! SAVE, file,db,
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2

```

```

FITEM,5,4
FITEM,5,-5
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,18, , , ,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,3
FITEM,5,6
FITEM,5,8
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,12, , , ,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, , ,50, , , ,1
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/PREP7
VCLEAR, 1
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
ADELE,P51X
VDELE, 1
FLST,2,6,5,ORDE,2

```

FITEM,2,1  
FITEM,2,-6  
ADELE,P51X  
FLST,2,12,4,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-12  
LDELE,P51X  
FLST,2,8,3,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-8  
KDELE,P51X  
!\*  
ETDEL,1  
!\*  
ET,1,SOLID70  
!\*  
!\*  
ET,2,SOLID70  
!\*  
ETDEL,2  
!\*  
!\*  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,200  
MPTEMP,3,350  
MPTEMP,4,500  
MPTEMP,5,800  
MPTEMP,6,1200  
MPDE,KXX,1  
MPDATA,KXX,1,,0.12  
MPDATA,KXX,1,,0.15  
MPDATA,KXX,1,,0.07  
MPDATA,KXX,1,,0.09  
MPDATA,KXX,1,,0.35  
MPDATA,KXX,1,,1.5  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,100  
MPTEMP,3,300  
MPTEMP,4,1200  
MPDE,NUXY,1  
MPDE,NUYZ,1  
MPDE,NUXZ,1  
MPDE,PRXY,1  
MPDE,PRYZ,1  
MPDE,PRXZ,1  
MPDE,EX,1  
MPDATA,EX,1,,10300  
MPDATA,EX,1,,5150  
MPDATA,EX,1,,103

```

MPDATA,EX,1,,103
MPDE,EY,1
MPDATA,EY,1,,1050.6
MPDATA,EY,1,,525.3
MPDATA,EY,1,,10.5
MPDATA,EY,1,,10.5
MPDE,EZ,1
MPDATA,EZ,1,,401.7
MPDATA,EZ,1,,200.9
MPDATA,EZ,1,,4
MPDATA,EZ,1,,4
MPDATA,PRXY,1,,0.341
MPDATA,PRXY,1,,0.341
MPDATA,PRXY,1,,0.341
MPDATA,PRXY,1,,0.341
MPDATA,PRYZ,1,,0.437
MPDATA,PRYZ,1,,0.437
MPDATA,PRYZ,1,,0.437
MPDATA,PRYZ,1,,0.437
MPDATA,PRXZ,1,,0.332
MPDATA,PRXZ,1,,0.332
MPDATA,PRXZ,1,,0.332
MPDATA,PRXZ,1,,0.332
MPDE,GXY,1
MPDATA,GXY,1,,721
MPDATA,GXY,1,,360.5
MPDATA,GXY,1,,7.2
MPDATA,GXY,1,,7.2
MPDE,GYZ,1
MPDATA,GYZ,1,,61.8
MPDATA,GYZ,1,,30.9
MPDATA,GYZ,1,,0.6
MPDATA,GYZ,1,,0.6
MPDE,GXZ,1
MPDATA,GXZ,1,,597.4
MPDATA,GXZ,1,,298.7
MPDATA,GXZ,1,,6
MPDATA,GXZ,1,,6
! SAVE, file,db,
! NPLOT
K,1,0,,175,,150,
K,2,0,-0.175,0.15,
K,3,0,-0.175,-0.15,
K,4,0,0.175,-0.15,
! /REPLOT,RESIZE
LSTR, 3, 2
LSTR, 2, 1
LSTR, 1, 4
LSTR, 4, 3
FLST,2,4,4
FITEM,2,1

```

```

FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,3
AL,P51X
!*
VOFFST,1,3, ,
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, , ,18, , , ,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, , ,12, , , ,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, , ,50, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

```

/REP7
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
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,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
!/COM,
!/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
!/COM, Structural
!/COM, Thermal
!*
ETCHG,TTS
FLST,2,19,1,ORDE,19
FITEM,2,71196
FITEM,2,71208
FITEM,2,71219
FITEM,2,71230
FITEM,2,71241
FITEM,2,71252
FITEM,2,71263
FITEM,2,71274
FITEM,2,71285
FITEM,2,71296
FITEM,2,71307
FITEM,2,71318
FITEM,2,71329
FITEM,2,71340
FITEM,2,71351
FITEM,2,71362
FITEM,2,71373
FITEM,2,71384
FITEM,2,71395
!*
/GO
D,P51X,,0,, ,UX,UY,UZ,, ,
FLST,2,19,1,ORDE,19
FITEM,2,71183
FITEM,2,71442
FITEM,2,71453
FITEM,2,71464

```

```

FITEM,2,71475
FITEM,2,71486
FITEM,2,71497
FITEM,2,71508
FITEM,2,71519
FITEM,2,71530
FITEM,2,71541
FITEM,2,71552
FITEM,2,71563
FITEM,2,71574
FITEM,2,71585
FITEM,2,71596
FITEM,2,71607
FITEM,2,71618
FITEM,2,71629
!*
/GO
D,P51X,,0,, ,UY,UZ, , ,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,5
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,1.6667
/PREP7
LDREAD,TEMP,,900,,'file','rth','..\..\..\termica\3 lados\15 min'
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0
TIME,1
!/STATUS,SOLU
SOLVE

```

**Anexo 3.8 – Modelo de avaliação de capacidade de carga (perfil com exposição ao fogo a 3 lados).**

```

/BATCH
!/COM,ANSYS RELEASE 12.0.1 UP20090224 20:34:29 03/15/2011
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
!/GRA,POWER
!/GST,ON
!/PLO,INFO,3
!/GRO,CURL,ON
!/CPLANE,1
!/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/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
/PREP7
/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
!*
/PREP7
!*
ET,1,PLANE77
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,350
MPTEMP,4,500
MPTEMP,5,800
MPTEMP,6,1200
MPDATA,KXX,1,,0.12
MPDATA,KXX,1,,0.15
MPDATA,KXX,1,,0.07
MPDATA,KXX,1,,0.09
MPDATA,KXX,1,,0.35
MPDATA,KXX,1,,1.50
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,110
MPTEMP,4,120
MPTEMP,5,130
MPTEMP,6,200
MPTEMP,7,250
```

MPTEMP,8,300  
MPTEMP,9,350  
MPTEMP,10,400  
MPTEMP,11,600  
MPTEMP,12,800  
MPTEMP,13,1200  
MPDATA,C,1,,1530  
MPDATA,C,1,,1770  
MPDATA,C,1,,13600  
MPDATA,C,1,,13500  
MPDATA,C,1,,2120  
MPDATA,C,1,,2000  
MPDATA,C,1,,1620  
MPDATA,C,1,,710  
MPDATA,C,1,,850  
MPDATA,C,1,,1000  
MPDATA,C,1,,1400  
MPDATA,C,1,,1650  
MPDATA,C,1,,1650  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EMIS,1,,0.8  
/PREP7  
!\*  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,99  
MPTEMP,3,110  
MPTEMP,4,120  
MPTEMP,5,130  
MPTEMP,6,200  
MPTEMP,7,250  
MPTEMP,8,300  
MPTEMP,9,350  
MPTEMP,10,400  
MPTEMP,11,600  
MPTEMP,12,800  
MPTEMP,13,1200  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,427.8  
MPDATA,DENS,1,,349.6  
MPDATA,DENS,1,,239.2  
MPDATA,DENS,1,,174.8  
MPDATA,DENS,1,,128.8  
MPDATA,DENS,1,,119.6  
MPDATA,DENS,1,,0

```

N,70000,0.5,0.5,0,.,.,.
/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
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
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,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
/PREP7
!*
ETDEL,1
!*
ET,1,SOLID70
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,1,REFT,,
MPDATA,ALPX,1,,3e-6
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,300
MPTEMP,4,1200
MPDE,NUXY,1
MPDE,NUYZ,1
MPDE,NUXZ,1
MPDE,PRXY,1
MPDE,PRYZ,1
MPDE,PRXZ,1
MPDATA,EX,1,,10300
MPDATA,EX,1,,5150

```

MPDATA,EX,1,,103  
MPDATA,EX,1,,103  
MPDATA,EY,1,,401.7  
MPDATA,EY,1,,200.9  
MPDATA,EY,1,,4  
MPDATA,EY,1,,4  
MPDATA,EZ,1,,1050.6  
MPDATA,EZ,1,,525.3  
MPDATA,EZ,1,,10.5  
MPDATA,EZ,1,,10.5  
MPDATA,PRXY,1,,0.332  
MPDATA,PRXY,1,,0.332  
MPDATA,PRXY,1,,0.332  
MPDATA,PRXY,1,,0.332  
MPDATA,PRYZ,1,,0.336  
MPDATA,PRYZ,1,,0.336  
MPDATA,PRYZ,1,,0.336  
MPDATA,PRYZ,1,,0.336  
MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
MPDATA,PRXZ,1,,0.341  
MPDATA,GXY,1,,597.4  
MPDATA,GXY,1,,298.7  
MPDATA,GXY,1,,6  
MPDATA,GXY,1,,6  
MPDATA,GYZ,1,,61.8  
MPDATA,GYZ,1,,30.9  
MPDATA,GYZ,1,,0.6  
MPDATA,GYZ,1,,0.6  
MPDATA,GXZ,1,,721  
MPDATA,GXZ,1,,360.5  
MPDATA,GXZ,1,,7.2  
MPDATA,GXZ,1,,7.2  
/NOPR  
/PMETH,OFF,0  
KEYW,PR\_SET,1  
KEYW,PR\_STRUC,1  
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,1  
KEYW,PR\_CFD,0  
/GO  
K,1,0,,150,,175,  
K,2,0,-0.15,0.175,  
K,3,0,-0.15,-0.175,

```

K,4,0,0.15,-0.175,
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 1
FLST,2,4,4
FITEM,2,2
FITEM,2,1
FITEM,2,4
FITEM,2,3
AL,P51X
VOFFST,1,3, ,
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,4
FITEM,5,-5
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,18, , , ,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,3
FITEM,5,6
FITEM,5,8
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,12, , , ,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, , ,50, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y

```

```

!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/PREP7
VCLEAR, 1
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
ADELE,P51X
VDELE, 1
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
ADELE,P51X
FLST,2,12,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-12
LDELE,P51X
FLST,2,8,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-8
KDELE,P51X
!*
ETDEL,1
!*
ET,1,SOLID70
!*
!*
ET,2,SOLID70
!*
ETDEL,2
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,350
MPTEMP,4,500
MPTEMP,5,800
MPTEMP,6,1200
MPDE,KXX,1
MPDATA,KXX,1,,0.12
MPDATA,KXX,1,,0.15
MPDATA,KXX,1,,0.07
MPDATA,KXX,1,,0.09
MPDATA,KXX,1,,0.35
MPDATA,KXX,1,,1.5

```

MPTEMP,,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,100  
MPTEMP,3,300  
MPTEMP,4,1200  
MPDE,NUXY,1  
MPDE,NUYZ,1  
MPDE,NUXZ,1  
MPDE,PRXY,1  
MPDE,PRYZ,1  
MPDE,PRXZ,1  
MPDE,EX,1  
MPDATA,EX,1,,10300  
MPDATA,EX,1,,5150  
MPDATA,EX,1,,103  
MPDATA,EX,1,,103  
MPDE,EY,1  
MPDATA,EY,1,,1050.6  
MPDATA,EY,1,,525.3  
MPDATA,EY,1,,10.5  
MPDATA,EY,1,,10.5  
MPDE,EZ,1  
MPDATA,EZ,1,,401.7  
MPDATA,EZ,1,,200.9  
MPDATA,EZ,1,,4  
MPDATA,EZ,1,,4  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDE,GXY,1  
MPDATA,GXY,1,,721  
MPDATA,GXY,1,,360.5  
MPDATA,GXY,1,,7.2  
MPDATA,GXY,1,,7.2  
MPDE,GYZ,1  
MPDATA,GYZ,1,,61.8  
MPDATA,GYZ,1,,30.9  
MPDATA,GYZ,1,,0.6  
MPDATA,GYZ,1,,0.6  
MPDE,GXZ,1  
MPDATA,GXZ,1,,597.4  
MPDATA,GXZ,1,,298.7

```

MPDATA,GXZ,1,,6
MPDATA,GXZ,1,,6
! SAVE, file.db,
! NPLOT
K,1,0,,175,,150,
K,2,0,-0.175,0.15,
K,3,0,-0.175,-0.15,
K,4,0,0.175,-0.15,
!/REPLOT,RESIZE
LSTR, 3, 2
LSTR, 2, 1
LSTR, 1, 4
LSTR, 4, 3
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,3
AL,P51X
!*
VOFFST,1,3, ,
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, , ,18, , , ,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, , ,12, , , ,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,,.50,,,,,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,,1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FINISH
!/EXIT,ALL
!/COM,ANSYS RELEASE 12.0.1 UP20090224 17:49:35 07/24/2011
/PREP7
VDELE,1
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
ADELE,P51X
VDELE,1,,1
VCLEAR,1
VDELE,1
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
ADELE,P51X
FLST,2,12,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-12
LDELE,P51X
FLST,2,8,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-8
KDELE,P51X
! NPLOT
! SAVE, file,db,
!/COM,ANSYS RELEASE 12.0.1 UP20090224 17:57:45 07/24/2011
K,1,0,0.125,0.175,
K,2,0,0.125,-0.175,
K,3,0,-0.125,-0.175,
K,4,0,-0.125,0.175,
LSTR,3,2
LSTR,2,1
LSTR,1,4
LSTR,4,3

```

```

FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,4
FITEM,2,3
FITEM,2,2
AL,P51X
!*
VOFFST,1,3, ,
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, , , ,18, , , , ,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, , , ,12, , , , ,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, , , ,50, , , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
/PREP7
VCLEAR, 1

```

VDELE, 1  
FLST,2,6,5,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-6  
ADELE,P51X  
FLST,2,12,4,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-12  
LDELE,P51X  
FLST,2,8,3,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-8  
KDELE,P51X  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,99  
MPTEMP,3,110  
MPTEMP,4,120  
MPTEMP,5,130  
MPTEMP,6,200  
MPTEMP,7,250  
MPTEMP,8,300  
MPTEMP,9,350  
MPTEMP,10,400  
MPTEMP,11,600  
MPTEMP,12,800  
MPTEMP,13,1200  
MPDE,DENS,1  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,515.2  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,460  
MPDATA,DENS,1,,427.8  
MPDATA,DENS,1,,349.6  
MPDATA,DENS,1,,239.2  
MPDATA,DENS,1,,174.8  
MPDATA,DENS,1,,128.8  
MPDATA,DENS,1,,119.6  
MPDATA,DENS,1,,0  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,99  
MPTEMP,3,110  
MPTEMP,4,120  
MPTEMP,5,130  
MPTEMP,6,200  
MPTEMP,7,250  
MPTEMP,8,300  
MPTEMP,9,350

MPTEMP,10,400  
MPTEMP,11,600  
MPTEMP,12,800  
MPTEMP,13,1200  
MPDE,C,1  
MPDATA,C,1,,1530  
MPDATA,C,1,,1770  
MPDATA,C,1,,13600  
MPDATA,C,1,,13500  
MPDATA,C,1,,2120  
MPDATA,C,1,,2000  
MPDATA,C,1,,1620  
MPDATA,C,1,,710  
MPDATA,C,1,,850  
MPDATA,C,1,,1000  
MPDATA,C,1,,1400  
MPDATA,C,1,,1650  
MPDATA,C,1,,1650  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDE,EMIS,1  
MPDATA,EMIS,1,,0.8  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,100  
MPTEMP,3,300  
MPTEMP,4,1200  
MPDE,NUXY,1  
MPDE,NUYZ,1  
MPDE,NUXZ,1  
MPDE,PRXY,1  
MPDE,PRYZ,1  
MPDE,PRXZ,1  
MPDE,EX,1  
MPDATA,EX,1,,10300  
MPDATA,EX,1,,5150  
MPDATA,EX,1,,103  
MPDATA,EX,1,,103  
MPDE,EY,1  
MPDATA,EY,1,,1050.6  
MPDATA,EY,1,,525.3  
MPDATA,EY,1,,10.5  
MPDATA,EY,1,,10.5  
MPDE,EZ,1  
MPDATA,EZ,1,,401.7  
MPDATA,EZ,1,,200.9  
MPDATA,EZ,1,,4  
MPDATA,EZ,1,,4  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341

MPDATA,PRXY,1,,0.341  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
 MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
 MPDE,GXY,1  
 MPDATA,GXY,1,,721  
 MPDATA,GXY,1,,360.5  
 MPDATA,GXY,1,,7.2  
 MPDATA,GXY,1,,7.2  
 MPDE,GYZ,1  
 MPDATA,GYZ,1,,61.8  
 MPDATA,GYZ,1,,30.9  
 MPDATA,GYZ,1,,0.6  
 MPDATA,GYZ,1,,0.6  
 MPDE,GXZ,1  
 MPDATA,GXZ,1,,597.4  
 MPDATA,GXZ,1,,298.7  
 MPDATA,GXZ,1,,6  
 MPDATA,GXZ,1,,6  
 K,1,0,0.175,0.125,  
 K,2,0,-0.175,0.125,  
 K,2,0,-0.175,-0.125,  
 KDELE, 2  
 KDELE, 1  
 K,1,0,0.175,0.125,  
 K,2,0,-0.175,0.125,  
 K,3,0,-0.175,-0.125,  
 K,4,0,0.175,-0.125,  
 !/VIEW,1,1,1,1  
 !/ANG,1  
 !/REP,FAST  
 LSTR, 1, 2  
 LSTR, 2, 3  
 LSTR, 3, 4  
 LSTR, 4, 1  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,4  
 FITEM,2,3  
 FITEM,2,1  
 FITEM,2,2  
 AL,P51X  
 !\*  
 VOFFST,1,-3, ,  
 FLST,5,4,4,ORDE,4  
 FITEM,5,1  
 FITEM,5,3

```

FITEM,5,6
FITEM,5,8
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,18, , , ,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,4
FITEM,5,-5
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,12, , , ,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, , ,50, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
/PREP7
ETCHG,TTS
FLST,2,13,1,ORDE,4
FITEM,2,71675
FITEM,2,73319
FITEM,2,-73329
FITEM,2,73426
!*
/GO

```

```

D,P51X, ,0, , , ,UX,UY,UZ, , ,
FLST,2,13,1,ORDE,13
FITEM,2,71692
FITEM,2,73035
FITEM,2,73052
FITEM,2,73069
FITEM,2,73086
FITEM,2,73103
FITEM,2,73120
FITEM,2,73137
FITEM,2,73154
FITEM,2,73171
FITEM,2,73188
FITEM,2,73205
FITEM,2,73222
!*
/GO
D,P51X, ,0, , , ,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,2
FINISH
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
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,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
/PREP7
ETCHG,TTS
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,300
MPTEMP,4,1200
MPDE,NUXY,1
MPDE,NUYZ,1
MPDE,NUXZ,1
MPDE,PRXY,1
MPDE,PRYZ,1
MPDE,PRXZ,1

```

MPDE,EX,1  
MPDATA,EX,1,,10300e3  
MPDATA,EX,1,,5150e3  
MPDATA,EX,1,,103e3  
MPDATA,EX,1,,103e3  
MPDE,EY,1  
MPDATA,EY,1,,1050.6e3  
MPDATA,EY,1,,525.3e3  
MPDATA,EY,1,,10.5e3  
MPDATA,EY,1,,10.5e3  
MPDE,EZ,1  
MPDATA,EZ,1,,401.7e3  
MPDATA,EZ,1,,200.9e3  
MPDATA,EZ,1,,4e3  
MPDATA,EZ,1,,4e3  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDE,GXY,1  
MPDATA,GXY,1,,721e3  
MPDATA,GXY,1,,360.5e3  
MPDATA,GXY,1,,7.2e3  
MPDATA,GXY,1,,7.2e3  
MPDE,GYZ,1  
MPDATA,GYZ,1,,61.8e3  
MPDATA,GYZ,1,,30.9e3  
MPDATA,GYZ,1,,0.6e3  
MPDATA,GYZ,1,,0.6e3  
MPDE,GXZ,1  
MPDATA,GXZ,1,,597.4e3  
MPDATA,GXZ,1,,298.7e3  
MPDATA,GXZ,1,,6e3  
MPDATA,GXZ,1,,6e3  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,100  
MPTEMP,3,300  
MPTEMP,4,1200  
MPDE,NUXY,1  
MPDE,NUYZ,1  
MPDE,NUXZ,1  
MPDE,PRXY,1

MPDE,PRYZ,1  
MPDE,PRXZ,1  
MPDE,EX,1  
MPDATA,EX,1,,1.03E+007  
MPDATA,EX,1,,5.15E+006  
MPDATA,EX,1,,1.03E+005  
MPDATA,EX,1,,1.03E+005  
MPDE,EY,1  
MPDATA,EY,1,,1.0506E+006  
MPDATA,EY,1,,5.253E+005  
MPDATA,EY,1,,10500  
MPDATA,EY,1,,10500  
MPDE,EZ,1  
MPDATA,EZ,1,,4.017E+005  
MPDATA,EZ,1,,2.009E+005  
MPDATA,EZ,1,,4000  
MPDATA,EZ,1,,4000  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRXY,1,,0.341  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRYZ,1,,0.437  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDATA,PRXZ,1,,0.332  
MPDE,GXY,1  
MPDATA,GXY,1,,7.21E+005  
MPDATA,GXY,1,,3.605E+005  
MPDATA,GXY,1,,7200  
MPDATA,GXY,1,,7200  
MPDE,GYZ,1  
MPDATA,GYZ,1,,61800  
MPDATA,GYZ,1,,30900  
MPDATA,GYZ,1,,600  
MPDATA,GYZ,1,,600  
MPDE,GXZ,1  
MPDATA,GXZ,1,,5.974E+005  
MPDATA,GXZ,1,,2.987E+005  
MPDATA,GXZ,1,,6000  
MPDATA,GXZ,1,,6000  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
UIMP,1,REFT,,  
MPDE,ALPX,1  
MPDATA,ALPX,1,,3E-006  
TB,CAST,1,1,1,1  
TBTEMP,0

```

TBDATA,,0.4,,,,
TB,UNIACOMP,1,4,2,COMP
TBTEMP,20
TBPT,,0.003883495,40e3
TBPT,,0.0042,40e3
TBTEMP,100
TBPT,,0.003883495,20e3
TBPT,,0.0042,20e3
TBTEMP,300
TBPT,,0.003883495,0.4e3
TBPT,,0.0042,0.4e3
TBTEMP,1200
TBPT,,0.003883495,0.4e3
TBPT,,0.0042,0.4e3
TB,UNIATENS,1,4,2,TENS
TBTEMP,20
TBPT,,0.006601942,68e3
TBPT,,0.0072,68e3
TBTEMP,100
TBPT,,0.006601942,34e3
TBPT,,0.0072,34e3
TBTEMP,300
TBPT,,0.006601942,0.68e3
TBPT,,0.0072,0.68e3
TBTEMP,1200
TBPT,,0.006601942,0.68e3
TBPT,,0.0072,0.68e3
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
SFADELE,P51X,1,PRES
*DIM,carga,TABLE,2,1,1, , ,
!*
*SET,CARGA(1,0,1) , 0
*SET,CARGA(2,0,1) , 3600
*SET,CARGA(2,1,1) , 800
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
/GO
!*
!*
SFA,P51X,1,PRES, %CARGA%
! SAVE, file,db,
FINISH
!/EXIT,ALL
!/COM,ANSYS RELEASE 12.0.1 UP20090224 17:02:00 09/04/2011
/PREP7
LDREAD,TEMP,,900, 'file','rth','..\..\termica\3 lados\15 min\'
LDREAD,TEMP,,900, 'file','rth','..\..\termica\3 lados\15 min\'
FINISH
/SOL
!*

```

```
CNVTOL,U, ,0.001,2, ,
!*
DELTIM,30,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,5
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,3600
!/STATUS,SOLU
SOLVE
```

## Anexo 4 – Equações de esforços

i) Para a primeira situação de carregamento (carga antes do primeiro apoio)

Se  $0 \leq x_p \leq \text{apoio\_1}$

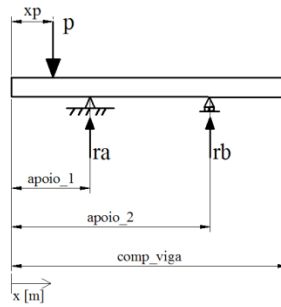


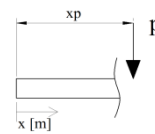
Figura 54 – Diagrama de corpo livre para a primeira situação de carregamento.

Para  $0 \leq x < x_p$

$$mf = 0$$

(2)

$$v = 0$$

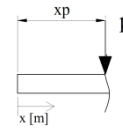


Para  $x = x_p$

$$mf = 0$$

(3)

$$v = -p$$

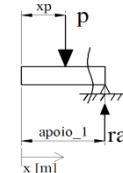


Para  $x_p \leq x < \text{apoio\_1}$

$$mf = -p(x - x_p)$$

(4)

$$v = -p$$

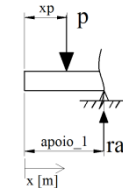


Para  $x = \text{apoio\_1}$

$$mf = -p(x - x_p)$$

(5)

$$v = -p + ra$$

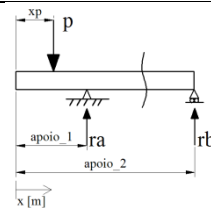


Para  $\text{apoio\_1} < x < \text{apoio\_2}$

$$mf = -p(x - x_p)$$

(6)

$$v = -p + ra$$

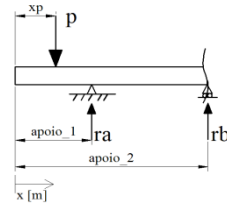


Para  $x = \text{apoio\_2}$

$$mf = 0$$

$$v = -p + ra$$

(7)

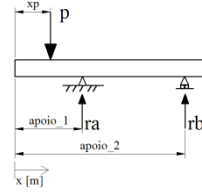


Para  $x > \text{apoio\_2}$

$$mf = 0$$

$$v = 0$$

(8)

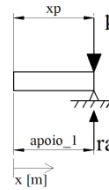


Para  $xp = \text{apoio\_1}$

$$mf = 0$$

$$v = 0$$

(9)



## ii) Para a segunda situação de carregamento (carga entre apoios)

Se  $\text{apoio\_1} \leq xp \leq \text{apoio\_2}$

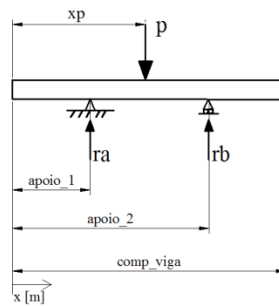


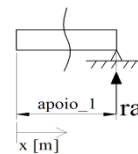
Figura 55 – Diagrama de corpo livre para a segunda situação de carregamento

Para  $0 \leq x < \text{apoio\_1}$

$$mf = 0$$

$$v = 0$$

(10)

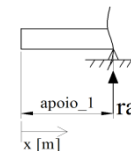


Para  $x = \text{apoio\_1}$

$$mf = 0$$

$$v = ra$$

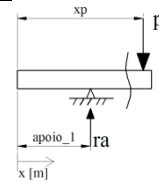
(11)



Para  $apoio\_1 < x < xp$

$$mf = ra(x - apoio\_1) \quad (12)$$

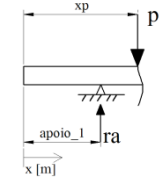
$$v = ra$$



Para  $x = xp$

$$mf = ra(x - apoio\_1) \quad (13)$$

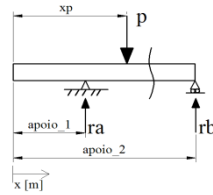
$$v = -p + ra$$



Para  $xp < x < apoio\_2$

$$mf = -p(x - xp) + ra(x - apoio\_1) \quad (14)$$

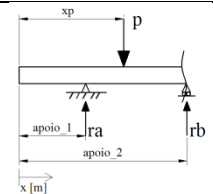
$$v = -p + ra$$



Para  $x = apoio\_2$

$$mf = 0 \quad (15)$$

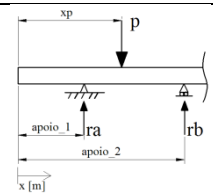
$$v = 0$$



Para  $x > apoio\_2$

$$mf = 0 \quad (16)$$

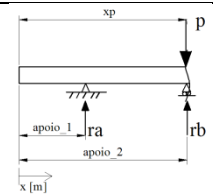
$$v = 0$$



Para  $xp = apoio\_2$

$$mf = 0 \quad (17)$$

$$v = 0$$



### iii) Para a terceira situação de carregamento (carga após o segundo apoio)

Se  $xp > apoio\_2$

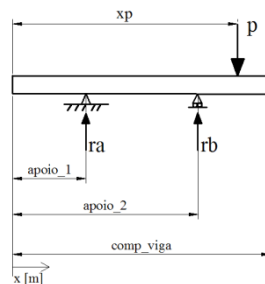


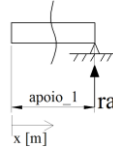
Figura 56 - Diagrama de corpo livre para a terceira situação de carregamento

---

Para  $0 \leq x < apoio\_1$

$$mf = 0 \quad (18)$$

$$v = 0$$

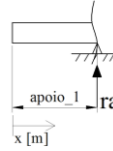


---

Para  $x = apoio\_1$

$$mf = 0 \quad (19)$$

$$v = ra$$

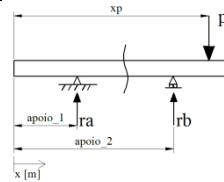


---

Para  $apoio\_1 < x < apoio\_2$

$$mf = ra(x - apoio\_1) \quad (20)$$

$$v = ra$$

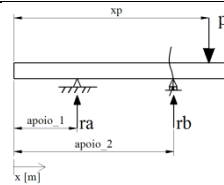


---

Para  $x = apoio\_2$

$$mf = ra(x - apoio\_1) \quad (21)$$

$$v = ra$$

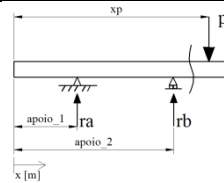


---

Para  $apoio\_2 < x \leq xp$

$$mf = ra(x - apoio\_1) + rb(x - apoio\_2) \quad (22)$$

$$v = ra + rb$$

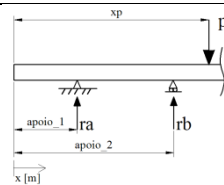


---

Para  $x > xp$

$$mf = 0 \quad (23)$$

$$v = 0$$





```

if(apoio_2>apoio_1 .and. apoio_2<=comp_viga)then
goto 130
else
write(*,*)" "
write(*,*)"opcao invalida"
goto 120
end if
else
write(*,*)" "
write(*,*)"opcao invalida"
goto 110
end if
130 write(*,*)" "
write(*,*)" "
write(*,*)" "

!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!!xxx leitura dos carregamentos termicos xxx
!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
write(*,*)"""
write(*,*)"Carregamentos Termicos ao longo de todo o comprimento da Viga, sim=1, nao=0"
read(*,*)nct

if(nct==0)then
goto 200
else
if(nct>=1)then
write(*,*)"Fogo=3 lados ou Fogo=4 lados"
read(*,*)nctf

write(*,*)"Tempo de Fogo, em min"
read(*,*)tempo

write(*,*)"Madeira Casquinha Branca=1 ou Vermelha=2"
read(*,*)mtype

end if
end if

!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!!xxx leitura dos carregamentos concentrados xxx
!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
200 write(*,*)"""
write(*,*)"Quantos Carregamentos Concentrados tem a Viga"
read(*,*)ncc

if(ncc==0)then
goto 210
else
if(ncc>=1)then
write(*,*)"Quais os valores e localizacoes desses Carregamentos"

```

```

do i=1,ncc
write(*,*)""
write(*,*)"carregamento [N]",i
read(*,*)p(i)
230 write(*,*)"localizacao [m]"
read(*,*)xp(i)
if(xp(i)<0. .or. xp(i)>comp_viga)then
write(*,*)""
write (*,*)"opcao invalida"
goto 230
else
end if
end do
end if
end if

!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!!xxx leitura dos carregamentos distribuidos xxx
!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
240 write(*,*)""
210 write(*,*)""
write(*,*)"Quantos Carregamentos Distribuidos tem a Viga"
read(*,*)ncd
if(ncc==0.and.ncd==0)then
write(*,*)""
write(*,*)" !!! Insira valores para os carregamentos !!! "
write(*,*)""
goto 200
else
if(ncc/=0.and.ncd==0)then
goto 220
else
if(ncd>=1)then
write(*,*)""
write(*,*)"Quais os valores e localizacoes desses Carregamentos"
do i=1,ncd
write(*,*)""
write(*,*)"carregamento [N/m]",i
read(*,*)pp(i)
250 write(*,*)"comprimento [m]"
read(*,*)cd(i)
if(cd(i)>comp_viga)then
write(*,*)""
write (*,*)"opcao invalida"
goto 250
end if
270 write(*,*)"com inicio em [m]"
read(*,*)xs(i)
if(xs(i)+cd(i)<=comp_viga)then
goto 260
else

```

```

        write(*,*)""
        write(*,*)"opcao invalida"
        goto 270
    end if
end do
end if
end if

!!xxx Escrita no ficheiro de dados xxx
260 write(*,*)""
220 write(*,*)""
write(1,*)""
write(1,*)"FICHEIRO DE DADOS"
write(1,*)""
write(1,*)""
write(1,1000)"Comprimento da Viga ",comp_viga," [m]"
write(1,1000)"Apoio A localizado a ",apoio_1," [m]"
write(1,1000)"Apoio B localizado a ",apoio_2," [m]"
write(1,*)""
write(1,*)""
write(1,3000)"Viga com",ncc+ncd," Carregamentos"
write(1,*)""
write(1,*)""
write(1,3000)"Carregamentos Concentrados ",ncc
do i=1,ncc
write(1,*)""
write(1,3000)"Carregamento Concentrado",i
write(1,1000)"P = ",p(i)," [N]"
write(1,1000)"Aplicado a",xp(i)," [m]"
end do
write(1,*)""
write(1,*)""
write(1,3000)"Carregamentos Distribuidos ",ncd
do i=1,ncd
write(1,*)""
write(1,3000)"Carregamento Distribuido",i
write(1,1000)"Q = ",pp(i)," [N/m]"
write(1,2000)"Aplicado de",xs(i)," [m] até",xs(i)+cd(i)," [m]"
end do

write(1,*)""
write(1,*)"Carga Termica, Sim=1, Nao=0",nct
write(1,*)""
write(1,*)"Tempo Fogo",tempo," [min]"
write(1,*)""
write(1,*)""

!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!!xxx passagem dos carregamentos distribuidos a concentrados xxx
!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

pos=ncc+1
ncct=ncc
do i=1,ncd
cdk=cd(i)
if(cd(i)<=1)then
ndiv=1000*cdk
else
ndiv=100*cdk
end if
frag=cd(i)/ndiv
ncct=ncct+ndiv
do j=pos,ncct
p(j)=(pp(i)*cd(i))/ndiv
xp(j)=xs(i)+frag/2
xs(i)=xs(i)+frag
pos=pos+1
end do
end do

!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!!xxx divisão da viga em N pontos xxx
!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
if(comp_viga>0.and.comp_viga<=1)then
nopet=200*comp_viga
else
if(comp_viga>1.and.comp_viga<=5)then
nopet=75*comp_viga
else
if(comp_viga>5.and.comp_viga<=10)then
nopet=50*comp_viga
else
if(comp_viga>10.and.comp_viga<=15)then
nopet=25*comp_viga
else
if(comp_viga>15.and.comp_viga<=20)then
nopet=20*comp_viga
else
if(comp_viga>20.and.comp_viga<=25)then
nopet=15*comp_viga
else
if(comp_viga>25)then
nopet=10*comp_viga
end if
end if
end if
end if
end if
end if
end if

frag2=comp_viga/nopet

```

```

nopet=nopet+1

!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!!xxx Cálculo das reacções xxx
!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
write(*,*)""
rat=0.0
rbt=0.0
do j=1,ncct
    ra=p(j)*(1-((xp(j)-apoio_1)/(apoio_2-apoio_1)))
    rb=p(j)*((xp(j)-apoio_1)/(apoio_2-apoio_1))
    rat=ra+rat
    rbt=rb+rbt
end do
write(*,*)""
write(*,*)"As Reaccoes sao:"
write(*,1000)" RA = ",rat," [N]"
write(*,1000)" RB = ",rbt," [N]"
write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""

!!xxx Escrita no ficheiro de resultados xxx

write(2,*)""
write(2,*)"FICHEIRO DE RESULTADOS"
write(2,*)""
write(2,*)""
write(2,*)""
write(2,*)"Reacções"
write(2,*)""
write(2,1000)"RA =",rat," [N]"
write(2,1000)"RB =",rbt," [N]"
write(2,*)""
write(*,*)"Perfil da Viga (seccao recta)"
write(*,*)""
write(1,*)"_____ "

call perfil_R(comp_viga,apoio_1,apoio_2,p,xp,ncct,nopet,frag2,nct,nctf,mtype,tempo)

!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!!xxx Formatações xxx
!!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
1000 format(a,f12.4,a)
2000 format(a,f10.4,a,f10.4,a)
3000 format(a,i3,a)
4000 format(a,i3,a,f6.4,a)
5000 format(f10.2)

```

```
6000 format(i5,f10.4,f10.4,f10.4)
read(*,*)
close(1)
close(2)
close(3)
close(5)
end
```

```

subroutine perfil_R(comp_viga,apoio_1,apoio_2,p,xp,ncct,nopet,frag2,nct,nctf,mtype,tempo)
implicit none

integer::i,j,k,nope,nct,nctf,mtype
integer,intent(in)::ncct,nopet
real,intent(in)::apoio_1,apoio_2,frag2,comp_viga
real,dimension(10000)::ponto,mfp,vp,sigma,tau,mft,vt,x
character::op2
real,intent(in),dimension(10000)::p,xp
real::t,h,sigma_max,tau_max,v,mf,mft_max,vt_max,iz,d,tempo,td,hd

write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""Caracteristicas da seccao recta""
write(*,*)""
write(*,*)"Altura [m]"
read(*,*)h
write(*,*)""
write(*,*)"Base [m]"
read(*,*)t
write(*,*)""

if(nct==0)goto 200

if(nct.gt.0)then
call Sub_termica(nctf,mtype,d,tempo)
end if

if(nctf.eq.3)then
td=t-2*d
hd=h-d
iz=(td*hd**3)/12.
end if

if(nctf.eq.4)then
td=t-2*d
hd=h-2*d
iz=(td*hd**3)/12.
end if

200 continue

if(nctf.eq.0)then
iz=(t*h**3)/12.
end if

x(1)=0
do i=2,nopet
x(i)=x(i-1)+frag2
end do

```

```

do j=1,nopet
mft(j)=0
vt(j)=0
      do i=1,ncct
      call Esforcos(apoio_1,apoio_2,p(i),xp(i),x(j),mf,v)
      mft(j)=mf+mft(j)
      vt(j)=v+vt(j)
      end do
end do
write(3,*)" ponto distancia V Mf"
write(5,*)" ponto distancia Sigma Tau"
do i=1,nopet

if(tempo.gt.0.and.nctf.eq.3)then
Sigma(i)=(mfp(i)*(h/2-d/2))/(iz)
Tau(i)=(6*vp(i)/(td*hd*hd))*(h/4-d/2)
end if

if(tempo.gt.0.and.nctf.eq.4)then
Sigma(i)=(mfp(i)*(h/2-d))/(iz)
Tau(i)=(6*vp(i)/(td*hd*hd))*(h/4-d)
end if

if(tempo.eq.0)then
Sigma(i)=(mfp(i)*(h/2))/(iz)
Tau(i)=(vp(i)/(t*h))*(3/2)
end if

write(3,*)i,x(i),vt(i),mft(i)
write(5,*)i,x(i),sigma(i),tau(i)
end do

mft_max=maxval(abs(mft))
vt_max=maxval(abs(vt))

if(tempo.gt.0.and.nctf.eq.3)then
Sigma_Max=((mft_max*(h/2-d/2))/iz)/10**6
Tau_Max=(6*vt_max/(td*hd*hd))*(h/4-d/2)
end if

if(tempo.gt.0.and.nctf.eq.4)then
Sigma_Max=((mft_max*(h/2-d))/iz)/10**6
Tau_Max=(6*vt_max/(td*hd*hd))*(h/4-d)
end if

if(tempo.eq.0)then
Sigma_Max=((mft_max*(h/2))/iz)/10**6
Tau_Max=(3./2)*(vt_max/(t*h))/10**6
end if

write(*,*)"Esforcos e Tensoes (Maximos)"

```

```

write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)"Momento Flector Maximo =",mft_max," [Nm]"
write(*,*)""
write(*,*)"Esforco Transverso Maximo =",vt_max," [N]"
write(*,*)""
write(*,*)"Tensao Normal Maxima =",Sigma_Max," [MPa]"
write(*,*)""
write(*,*)"Tensao de Corte Maxima =",Tau_Max," [MPa]"
write(*,*)""
write(*,*)""
write(*,*)""

```

!!xxx Escrita no ficheiro de dados xxx

```

write(1,*)""
write(1,*)""
write(1,*)"Caracteristicas do Perfil"
write(1,*)"_____ "
write(1,*)""
write(1,*)""
write(1,*)"Altura",h," [m]"
write(1,*)""
write(1,*)"Base",t," [m]"
write(1,*)""
write(1,*)""
write(1,*)""

```

!!xxx Escrita no ficheiro de resultados xxx

```

write(2,*)"Espessura Carbonizada"
write(2,*)"d =",d," [m]"
write(2,*)""
write(2,*)"Momento de Inercia"
write(2,*)"Iz =",iz," [m^4]"
write(2,*)""
write(2,*)""
write(2,*)"Esforcos e Tensoes (Máximos)"
write(2,*)"_____ "
write(2,*)""
write(2,*)"Mf_máx =",mft_max," [Nm]"
write(2,*)""
write(2,*)"V_máx =",vt_max," [m]"
write(2,*)""
write(2,*)"Tensao Normal_máx =",Sigma_Max," [MPa]"
write(2,*)""
write(2,*)"Tensao de Corte_máx =",Tau_Max," [MPa]"
write(2,*)""
write(2,*)""
write(2,*)""
write(*,*)"Pretende estudar mais algum ponto"

```

```

150 write(*,*)"S/N"
read(*,*)op2
if(op2=='s')then
write(*,*)"
write(*,*)"Quantos"
read(*,*)nope
write(*,*)"
write(*,*)"Introduza as cotas desses pontos"
write(2,*)"
write(2,*)"
write(2,*)"Pontos Particulares"
write(2,*)"
write(2,*)"Esforços e Tensões"
do k=1,nope
mfp(k)=0
vp(k)=0
write(*,*)"_____ "
write(*,*)"
520 write(*,*)" Ponto",k
read(*,*)ponto(k)
if(ponto(k)>comp_viga)then
write(*,*)"
write(*,*)"opcao invalida"
goto 520
else
end if
if(ponto(k).gt.0)then
ponto(k)=ponto(k)-0.00000001
end if
do j=1,ncct
call Esforços(apoio_1,apoio_2,p(j),xp(j),ponto(k),mf,v)
mfp(k)=mf+mfp(k)
vp(k)=v+vp(k)
end do

Sigma=(mfp(k)*(h/2.))/(iz)/10**6
Tau=(3./2)*(vp(k)/(t*h))/10**6
write(*,*)"
write(*,*)"
write(*,*)"Esforços e Tensões"
write(*,*)" Para um X=",ponto(k)," [m]"
write(*,*)"
write(*,*)" Mf = ",mfp(k)," [Nm]"
write(*,*)"
write(*,*)" V = ",vp(k)," [N]"
write(*,*)"
write(*,*)"Tensao Normal = ",sigma(k)," [MPa]"
write(*,*)"
write(*,*)"Tensao de Corte = ",tau(k)," [MPa]"
write(*,*)"

```

```

!!xxx Escrita no ficheiro de resultados xxx
write(2,*)"_____ "
write(2,*)""
write(2,4000)"Ponto",k," --> Para um X =",ponto(k)," m"
write(2,*)""
write(2,*)" Mf = ",mfp(k)," [Nm]"
write(2,*)""
write(2,*)" V = ",vp(k)," [N]"
write(2,*)""
write(2,*)"Tensao Normal = ",sigma(k)," [MPa]"
write(2,*)""
write(2,*)"Tensao de Corte = ",tau(k)," [MPa]"
write(2,*)""
end do

```

```

!!xxx Escrita no ficheiro de dados xxx
write(1,*)""
write(1,3000)"Número de pontos particulares a estudar"
write(1,*)"_____ "
write(1,*)""
write(1,*)nope," Pontos"
write(1,*)""
write(1,*)"Localização "
write(1,*)""
do k=1,nope
write(1,1000)" X = ",ponto(k)," m"
end do
else
if(op2=='n')then
write(*,*)""
write(*,*)""
else
write(*,*)"Opcao Invalida"
write(*,*)""
write(*,*)""
goto 150
end if
end if
1000 format(a,f8.4,a)
2000 format(a,f6.3,a,f6.3,a)
3000 format(a,i3,a)
4000 format(a,i3,a,f6.3,a)
5000 format(f10.2)
end subroutine

```

```
subroutine Esforcos (apoio_1,apoio_2,p,xp,x,mf,v)
```

```
implicit none
```

```
real,intent(in)::apoio_1,apoio_2,p,xp,x
```

```
real,intent(out)::mf,v
```

```
real::ra,rb
```

```
ra=p*(1-((xp-apoio_1)/(apoio_2-apoio_1)))
```

```
rb=p*((xp-apoio_1)/(apoio_2-apoio_1))
```

```
!secção 1 (carga aplicada entre 0 e o apoio_1)
```

```
if(xp>=0.and.xp<apoio_1)then
```

```
do
```

```
if(x>=0.and.x<xp)then
```

```
    Mf=0
```

```
    V=0
```

```
goto 200
```

```
else
```

```
if(x.eq.xp)then
```

```
    Mf=0
```

```
    V=-p
```

```
    goto 200
```

```
else
```

```
if(x>xp.and.x<apoio_1)then
```

```
    Mf=-p*(x-xp)
```

```
    V=-p
```

```
    goto 200
```

```
else
```

```
if(x.eq.apoio_1)then
```

```
    Mf=-p*(x-xp)
```

```
    V=-p+ra
```

```
    goto 200
```

```
else
```

```
if(x>apoio_1.and.x<apoio_2)then
```

```
    Mf=-p*(x-xp)+ra*(x-apoio_1)
```

```
    V=-p+ra
```

```
    goto 200
```

```
else
```

```
if(x.eq.apoio_2)then
```

```
    Mf=0
```

```
    V=-p+ra
```

```
    goto 200
```

```
else
```

```
if(x>apoio_2)then
```

```
    Mf=0
```

```
    V=0
```

```
    goto 200
```

```
end if
```

```
end if
```

```
end if
```

```
end if
```

```
end if
```

```
end if
```

```

        end if
    end do
end if
if(xp.eq.apoio_1)then
    Mf=0
    V=0
    goto 200
end if
!seção 2 (carga aplicada entre o apoio_1 e o apoio_2)
if(xp>apoio_1.and.xp<apoio_2)then
do
    if(x>=0.and.x<apoio_1)then
        Mf=0
        V=0
        goto 200
    else
        if(x.eq.apoio_1)then
            Mf=0
            V=ra
            goto 200
        else
            if(x>apoio_1.and.x<xp)then
                Mf=ra*(x-apoio_1)
                V=ra
                goto 200
            else
                if(x.eq.xp)then
                    Mf=ra*(x-apoio_1)
                    V=ra-p
                    goto 200
                else
                    if(x>xp.and.x<apoio_2)then
                        Mf=-p*(x-xp)+ra*(x-apoio_1)
                        V=-p+ra
                        goto 200
                    else
                        if(x.eq.apoio_2)then
                            Mf=0
                            V=-p+ra
                            goto 200
                        else
                            if(x>apoio_2)then
                                Mf=0
                                V=0
                                goto 200
                            end if
                        end if
                    end if
                end if
            end if
        end if
    end if
end if

```

```

        end if
        end do
    end if
    if(xp.eq.apoio_2)then
        Mf=0
        V=0
        goto 200
    end if
!secção 3 (carga aplicada depois do apoio_2)
    if(xp>apoio_2) then
    do
        if(x>=0.and.x<apoio_1)then
            Mf=0
            V=0
            goto 200
        else
            if(x.eq.apoio_1)then
                Mf=0
                V=ra
                goto 200
            else
                if(x>apoio_1.and.x<apoio_2)then
                    Mf=ra*(x-apoio_1)
                    V=ra
                    goto 200
                else
                    if(x.eq.apoio_2)then
                        Mf=ra*(x-apoio_1)
                        V=ra !!+rb
                        goto 200
                    else
                        if(x>apoio_2.and.x<=xp)then
                            Mf=ra*(x-apoio_1)+rb*(x-apoio_2)
                            V=ra+rb
                            goto 200
                        else
                            if(x>xp)then
                                Mf=0
                                V=0
                                goto 200
                            end if
                        end if
                    end if
                end if
            end if
        end do
    end if
end subroutine
200

```



## Anexo 6 – Lista de variáveis do programa

Lista de Variáveis do Programa

Variável	Designação da variável	Rotina(*)
i	Variável de ciclo	P, R
j	Variável de ciclo	P, R
k	Variável de ciclo	R
ncc	Nº de cargas concentradas	P
ncd	Nº de cargas distribuídas	P
ncct	Nº de cargas totais	P, R
nope	Nº de pontos (em particular) a estudar	R
nopet	Nº de pontos totais a estudar	P, R
comp_viga	Comprimento da viga	P
apoio_1	Localização de primeiro apoio	P, R, Esf
apoio_2	Localização do segundo apoio	P, R, Esf
p	Valor da carga concentrada	P, R, Esf
xp	Localização da carga	P, R, Esf
pp	Valor da carga distribuída	P
cd	Comprimento da carga distribuída	P
cdk	Valor real do comprimento da carga distribuída	P
xs	Ponto inicial da carga	P
ponto	Localização do ponto (em particular) em estudo	R
x	Localização de todos os n pontos da viga	R, Esf
ra	Reacção no primeiro apoio devido a uma só carga	P, Esf
rat	Reacção total no primeiro apoio	P
rb	Reacção no segundo apoio devido a uma só carga	P, Esf
rbt	Reacção total no segundo apoio	P
pos	Posição ocupada pela carga no array	P
ndiv	Nº de divisões da carga distribuída	P
frag	Distancia entre as várias parcelas da carga distribuída	P
frag2	Distancia entre os vários pontos da viga	P, R
op	Variável de selecção	P
op2	Variável de selecção	R
vt_max	Esforço transverso máximo	R
mft_max	Momento flector máximo	R
sigma_max	Tensão normal máxima	R
tau_max	Tensão de corte máxima	R
v	Esforço transverso devido a uma só carga	R
vt	Esforço transverso total para todos os pontos da viga	R
vp	Esforço transverso para um ponto x em particular	R
mf	Momento flector devido a uma só carga	R
mft	Momento flector total para todos os pontos da viga	R
mfp	Momento flector para um ponto x em particular	R
sigma	Tensão normal	R
tau	Tensão de corte	R
t	Espessura do perfil rectangular	R
h	Altura do perfil rectangular	R
iz	Momento de inércia	R, Esf
nct	Cargas térmicas na viga toda (sim=1, não=0)	T
nctf	Cargas térmicas (Fogo 3 lados=3, Fogo 4 lados=4)	T
mtype	Madeira: casquinha branca=1, casquinha vermelha=2	T
tempo	Tempo de fogo (min)	T
d	Espessura carbonizada, função da velocidade carbonização	T
k0	Constante do EC5	T
td	Espessura do perfil rectangular aquecida	T
hd	Altura do perfil rectangular aquecida	T

(\*) P- programa principal, R- subrotina para secções rectangulares, Esf- subrotina para cálculo esforços, T- subrotina da térmica.

### Símbolos Utilizados

$\sum M_0$	Somatório dos momentos
$\sum F_y$	Somatório das forças segundo o eixo dos yy
$ra$	Reacção normal no 1º apoio
$rb$	Reacção normal no 2º apoio
$P$	Carregamento
$x_p$	Distância da origem ao carregamento
$apoio\_1$	Posição do 1º apoio
$apoio\_2$	Posição do 2º apoio
$x_s$	Distância do início da viga ao início do carregamento distribuído
$frag$	Distância entre as várias parcelas de um carregamento distribuído
$cd$	Comprimento do carregamento distribuído
$cdk$	Valor real do comprimento do carregamento distribuída
$ndiv$	Número de divisões de uma carga distribuída
$pp$	Carga distribuída
$mf$	Momento flector
$v$	Esforço transversal
$I$	Momento de inércia da secção
$x$	Distância
$A$	Área
$y_{máx}$	Distância do centro de massa à base da secção do perfil
$\sigma_x$	Tensão normal
$\tau_{xy}$	Tensão de corte