

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS DE BETÃO COM UM MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

DANIEL FERREIRA SOARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues
Gonçalves

SETEMBRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais e Avós

AGRADECIMENTOS

Após a conclusão deste trabalho expresso aqui o meu muito obrigado a todos aqueles que me apoiaram e permitiram a sua conclusão, em particular:

- Ao Prof. Doutor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues Gonçalves pelo apoio incondicional e pela forma entusiasta como encarou a execução deste trabalho, a ele, deixo aqui o meu sincero muito obrigado;
- Aos meus Pais pelo carinho e motivação demonstrada ao longo da elaboração do trabalho;
- À Liliana pelo apoio, incentivo e carinho demonstrado ao longo de todo o trabalho.

RESUMO

O trabalho desenvolvido consiste na avaliação da resistência ao fogo de estruturas de betão armado, em particular de vigas, sujeitas à acção do incêndio, através de métodos simplificados de cálculo.

Desenvolveu-se um método simplificado de análise térmica de secções de vigas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834, designado por “TS2”, e que conjugado com o modelo de análise mecânica designado por “SimFirb”, desenvolvido por Miguel Chichorro Gonçalves na FEUP [1], permite efectuar a avaliação da capacidade resistente de vigas sujeitas a incêndio.

O método desenvolvido é mais simples que os métodos avançados de cálculo na avaliação da análise térmica das secções. De facto, o modelo “TS2” tira partido da análise térmica de uma secção designada de referência, “0”, previamente calculada com o modelo avançado de cálculo SAFIR, desenvolvido por Jean-Marc Franssen em Liège, Bélgica [3].

De modo a testar o método desenvolvido ao longo deste trabalho procedeu-se à obtenção dos momentos resistentes para um conjunto de secções definidas neste estudo. Validaram-se os resultados da análise térmica efectuada com o método desenvolvido (simplificado) utilizando igualmente os resultados da análise térmica obtidos com o SAFIR (avançado). Esta validação foi realizada de forma indirecta com a posterior aplicação do modelo mecânico “SimFirb” a ambas as análises térmicas (ou seja, através dos valores dos momentos flectores resistentes obtidos por estas duas vias).

Os resultados obtidos mostraram que o método simplificado desenvolvido para a obtenção da análise térmica de vigas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834, conjugado com o método simplificado “SimFirb” apresenta resultados muito próximos daqueles que resultam de uma aplicação com o método avançado de cálculo (SAFIR na análise térmica).

PALAVRAS-CHAVE: método simplificado de cálculo, resistência ao fogo, momentos resistentes de vigas, SAFIR, incêndio padrão ISO 834.

ABSTRACT

The developed work consists on the evaluation of reinforced concrete structures' fire resistance, particularly beams, subjected to fire effects, through simplified calculation methods.

It has been developed a simplified method of thermal analysis of beams sections submitted to the standard fire ISO 834, designated by "TS2", and that coupled with the mechanical analysis model called "SimFirb", developed by Miguel Chichorro Gonçalves on FEUP, [1], allows the evaluation of beams' resistance capability to fire.

The developed method is simpler than the more advanced calculation methods on the sections thermal analysis evaluation. Actually, the "TS2" model takes advantage of the thermal analysis of a section designated of reference, "0", previously calculated with the advanced calculation model SAFIR, developed by Jean-Marc Franssen at Liège, Belgium [3].

In the way to test the method developed throughout this work, it has been obtained the resistance moments of a number of sections specified in this study. It has been validated the results of the thermal analysis performed with the developed (simplified) method, also using the thermal analysis results obtained with the SAFIR (advanced). This validation was made by an indirect way with a subsequent application of the mechanical SimFirb model to both the thermal analysis (i.e. through the values of the resistance bending moments obtained by these two methods).

The obtained results confirmed that the simplified method developed for the obtaining of thermal analysis of beams submitted to the standard fire ISO 834, coupled with the simplified method SimFirb shows results very similar to those that occur from the application of the advanced calculation method (SAFIR) on thermal analysis.

KEY-WORDS: simplified calculation method, fire resistance, beams' resistance moments, SAFIR, standard fire ISO 834.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	1

2. PROPRIEDADES DOS MATERIAS BETÃO E AÇO A ALTAS TEMPERATURAS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. BETÃO	3
2.2.1. MATERIAIS CONSTITUINTES DO BETÃO	3
2.2.1.1. ÁGUA	3
2.2.1.2. AGREGADOS	4
2.2.1.3. CIMENTO	4
2.2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS	5
2.2.2.1. CALOR ESPECÍFICO	5
2.2.2.2. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA	5
2.2.2.3. EXTENSÃO TÉRMICA	6
2.2.2.4. DENSIDADE	6
2.2.2.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	6
2.2.2.6. RELAÇÃO TENSÃO-EXTENSÃO	7
2.3. AÇO	7
2.3.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS	8
2.3.1.1. CALOR ESPECÍFICO	8
2.3.1.2. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA	8
2.3.1.3. EXTENSÃO TÉRMICA	8
2.3.1.4. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO	9
2.3.1.5. RELAÇÃO TENSÃO-EXTENSÃO	10

3. MÉTODOS DE ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO	13
3.1. PROCESSOS FÍSICOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR	13
3.1.1. CONVECÇÃO	13
3.1.2. CONDUÇÃO	14
3.1.3. RADIAÇÃO	14
3.2. EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO COMPARTIMENTO DE INCÊNDIO	15
3.3. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	16
3.3. MÉTODOS DE ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO FOGO	18
3.3.1. MÉTODO DOS VALORES TABELADOS	18
3.3.1.1. PILARES	20
3.3.1.2. PAREDES	20
3.3.1.3. VIGAS	21
3.3.1.4. LAJES	21
3.3.2. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO	21
3.3.2.1. MÉTODO DA ISOTÉRMICA DOS 500°C	21
3.3.2.2. MÉTODO DE ZONA	23
3.3.3. MÉTODOS AVANÇADOS DE CÁLCULO	25
3.3.3.1. SAFIR	26
3.3.3.2. SIMFIRB	26
4. ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO EM VIGAS	29
4.1. MÉTODO DESENVOLVIDO PARA A ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO EM VIGAS	29
4.1.1. ESTRUTURA DO MÉTODO DESENVOLVIDO	29
4.2. CASOS DE ESTUDO	36
4.3. RESULTADOS	38
4.3.1. ANÁLISE QUALITATIVA	38
4.3.2. ANÁLISE QUANTITATIVA	42
4.4. CONCLUSÕES	45
5. CONCLUSÕES	47

6. BIBLIOGRAFIA 49

7. ANEXOS

ANEXO 1 – PROGRAMA “TS2”

ANEXO 2 – EXEMPLO DO FICHEIRO “0.in”

ANEXO 3 – EXEMPLO DO FICHEIRO “d1.ind”

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Variação da extensão do betão com a temperatura.....	4
Figura 2 – Variação do calor específico do betão, c_p , com a temperatura e humidade.	5
Figura 3 – Variação da condutibilidade térmica, λ_c , com a temperatura.....	5
Figura 4 – Coeficiente $K_c(\theta)$ do betão para altas temperaturas.....	6
Figura 5 – Variação da tensão-extensão do betão sujeito a elevadas temperaturas.....	7
Figura 6 – Variação do calor específico do aço em função da temperatura.	8
Figura 7 – Variação da condutibilidade térmica do aço e betão em função da temperatura.	8
Figura 8 - Variação da extensão do aço com a temperatura.....	9
Figura 9 - Coeficientes de redução do aço em função da temperatura - $k_s(\theta)$	9
Figura 10 - Variação da tensão-extensão do aço sujeito a elevadas temperaturas.....	10
Figura 11 – Curvas de incêndio nominais.....	16
Figura 12 – Curvas de incêndio paramétricas.	16
Figura 13 – Variação do factor de redução.....	18
Figura 14 – Símbolos utilizados nas tabelas do Método dos Valores Tabelados	19
Figura 15 – Exemplo de uma secção com armaduras em várias camadas e varões com diferentes diâmetros.....	20
Figura 16 – Redução da área das secções pela Isotérmica dos 500°C	22
Figura 17 – Secção reduzida de secções expostas ao fogo: a) Parede; b) Extremo da Parede; c) Laje; d) Parede espessa; e) Pilar; f) Viga.	24
Figura 18 – Parede Equivalente - divisão da parede exposta ao incêndio em ambas as faces em zonas para o cálculo da redução da resistência e a_z	24
Figura 19 – Organigrama de funcionamento do SimFIRb	27
Figura 20 – Organigrama de cálculo da capacidade resistente de uma secção de betão armado.....	27
Figura 21 – Organigrama do método desenvolvido “TS2”.....	30
Figura 22 - Secção em estudo.	32
Figura 23 - Discretização pretendida.	32
Figura 24 - Ficheiro com extensão *.ind da secção em estudo.	32
Figura 25 – Gráficos das funções $N_1(x_1, x_2)$ para um elemento de dimensões $L_1 \times L_2 = 2 \times 2$	33
Figura 26 – Estrutura do SimFIRb.	35
Figura 27 – Casos de estudo – Vigas D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14.....	37
Figura 28 - Momentos resistentes nas secções D1, D2, D3 e D4.....	38
Figura 29 - Momentos resistentes nas secções D5, D6, D7 e D8.	39

Figura 30 - Momentos resistentes nas secções D1e D5.....	40
Figura 31 - Momentos resistentes nas secções D9, D10 e D11.....	41
Figura 32 - Momentos resistentes nas secções D12, D13 e D14.....	42
Figura 33 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D1, secção D2, secção D3 e secção D4.....	43
Figura 34 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D5, secção D6, secção D7 e secção D8.....	44
Figura 35 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D9, secção D10 e secção D11.....	44
Figura 36 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D12, secção D13 e secção D14.....	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão dos aços correntes de Classe N e Classe X sujeitos a elevadas temperaturas.	11
Tabela 2 – Largura mínima das secções em função da resistência ao fogo para exposições ao incêndio padrão ISO 834.....	20
Tabela 3 – Largura mínima das secções em função da resistência ao fogo para exposições a incêndios paramétricos.	20

INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de um incêndio numa estrutura (edifício habitacional, armazém, etc.) conduz a um clima de insegurança por parte dos seus utilizadores, sendo que a primeira e imediata reacção dos utilizadores é conseguir “escapar” aos efeitos do fogo. Para isso, é necessário que estejam implementadas todas as medidas de emergência bem como, e fundamentalmente, a estrutura tenha sido devidamente estudada/dimensionada para evitar o seu colapso enquanto os seus utilizadores são evacuados ou os bombeiros actuam sobre o incêndio.

Deste modo e na sequência de vários acontecimentos que envolveram a acção do fogo e que implicaram inúmeras mortes e estragos materiais, o estudo da acção do fogo em estruturas de betão armado tem assumido nos últimos anos uma preocupação crescente por parte dos investigadores.

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

A realização deste trabalho tem como principal objectivo avaliar o comportamento ao fogo de estruturas de betão armado sujeitas a incêndio através de um modelo numérico mais simples que os métodos avançados de cálculo de modo a permitir a sua fácil aplicação na verificação da resistência ao fogo de vigas de betão armado.

Ao mesmo tempo e na sequência da análise efectuada permitiu envolver o autor com o tema que envolve o comportamento de estruturas de betão armado sujeitas à acção de incêndio.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Na sequência dos objectivos traçados para a elaboração do trabalho, a sua organização implicou a realização de cinco capítulos nos quais se abordam os seguintes temas:

Capítulo 1 – Neste capítulo faz-se uma pequena introdução ao trabalho.

Capítulo 2 – Neste capítulo definem-se as propriedades dos materiais, betão e aço quando expostos a elevadas temperaturas.

Capítulo 3 – Neste capítulo apresentam-se os processos de transferência de calor e as curvas de incêndio que reflectem a evolução das temperaturas no compartimento de incêndio. Faz-se ainda uma breve apresentação dos métodos de análise da resistência ao fogo (o método dos valores tabelados, os métodos simplificados e os métodos avançados de cálculo).

Capítulo 4 – Neste capítulo apresenta-se o método desenvolvido para a análise térmica de vigas que permite posteriormente efectuar a análise da resistência ao fogo em vigas, bem como a análise dos diversos casos de estudo propostos, através da comparação entre os resultados obtidos pelo método desenvolvido e por um modelo avançado de cálculo.

Capítulo 5 – Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido e as perspectivas de desenvolvimento.

2

PROPRIEDADES DOS MATERIAS BETÃO E AÇO A ALTAS TEMPERATURAS

2.1. INTRODUÇÃO

Os materiais, betão e aço, quando expostos ao incêndio alteram as suas propriedades físicas (perda de humidade, destacamento explosivo do betão), mecânicas (tensão de tracção e compressão, módulo de elasticidade, relação tensão-extensão e dilatação térmica) e térmicas (densidade, calor específico e condutibilidade).

Neste capítulo proceder-se-á à apresentação das variações das propriedades térmicas e mecânicas do betão e do aço.

2.2. BETÃO

O betão é um material que apresenta bom comportamento ao fogo uma vez que é mau condutor de calor e quando exposto a elevadas temperaturas não arde. Assim, durante um incêndio consegue manter durante algum tempo as suas propriedades à temperatura ambiente. Contudo, conforme vai aumentando o tempo de exposição a elevadas temperaturas as suas propriedades térmicas e mecânicas vão-se alterando. Para além daquelas variações surgem por vezes fissuras e eventualmente o destacamento explosivo de betão.

O betão é constituído por uma mistura, essencialmente de três materiais, água, agregados e cimento em que cada um deles apresenta uma forma diferente de reacção ao calor.

Desta forma, vamos começar por referir a reacção de cada material constituinte do betão quando exposto a elevadas temperaturas e consequentemente as suas propriedades térmicas e mecânicas.

2.2.1. MATERIAIS CONSTITUINTES DO BETÃO

2.2.1.1. ÁGUA

Quando o betão é exposto a elevadas temperaturas a água no seu interior vai aquecendo até atingir o estado gasoso, isto para temperaturas na ordem dos 100 °C a 140 °C. Após a transformação em vapor de água, este vai deslocando-se pelos poros do betão até atingir a sua superfície, onde é libertado, deste modo o fluxo da água e depois o vapor de água retarda o aumento da temperatura no betão.

Em resultado do movimento agora descrito da água, ou melhor vapor de água, acontece por vezes um fenómeno designado por “spalling”, que se caracteriza pelo destacamento explosivo do betão.

Este fenómeno caracteriza-se pelo destacamento de betão que é originado pela retenção de vapor de água e gases que não se conseguem deslocar pela malha porosa do betão, provocando assim um aumento de pressão no seu interior e consequentemente o seu destacamento.

Este fenómeno resulta da retenção de vapor de água e gases no interior do betão, originados pela inexistência de interligação da malha porosa até à superfície, o que provoca um aumento de pressão no seu interior e consequentemente o destacamento do betão.

2.2.1.2. AGREGADOS

Os agregados constituintes do betão dividem-se essencialmente em dois grandes grupos, os siliciosos e os calcários, constituídos por granitos e calcários, respectivamente. Contudo os agregados siliciosos serão os que vão ser abordados ao longo de todo o trabalho.

Quando expostos a elevadas temperaturas provocam a diminuição das características mecânicas do betão, uma vez que aumentam de tamanho e consequentemente originam a sua fissuração, facilitando assim o aumento da temperatura no seu interior. Contudo, o comportamento de agregados siliciosos e calcários é distinto, sendo que os siliciosos expandem para temperaturas na ordem dos 700°C enquanto os calcários expandem para temperaturas na ordem dos 800°C. Este facto pode ser comprovado indirectamente pela Figura 1, do Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2], evidenciando assim as diferenças entre betões siliciosos e calcários.

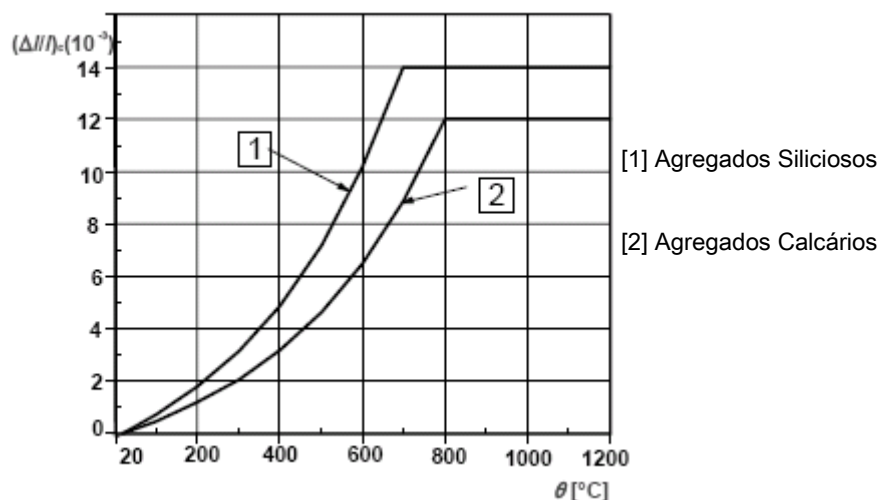


Figura 1- Variação da extensão do betão com a temperatura.

2.2.1.3. CIMENTO

Sendo o cimento o principal responsável pela ligação dos elementos constituintes do betão, quando sujeito a elevadas temperaturas e ao contrário dos agregados, retrai devido essencialmente à evaporação da água.

Deste modo, provoca o aparecimento de fissuração e consequentemente a diminuição das características mecânicas do betão.

2.2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS

2.2.2.1. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico do betão, c_p , representa a capacidade para armazenar calor. O calor específico do betão de uma maneira geral varia ligeiramente com o aumento da temperatura, isto para betões com índice de humidade de 0%. Enquanto para betões com índices de humidades superiores, este apresenta um acréscimo significativo até temperaturas na ordem dos 100°C, altura em que ocorre a evaporação da água livre. Contudo, a partir desse instante sofre uma diminuição brusca, conforme se pode observar na Figura 2.

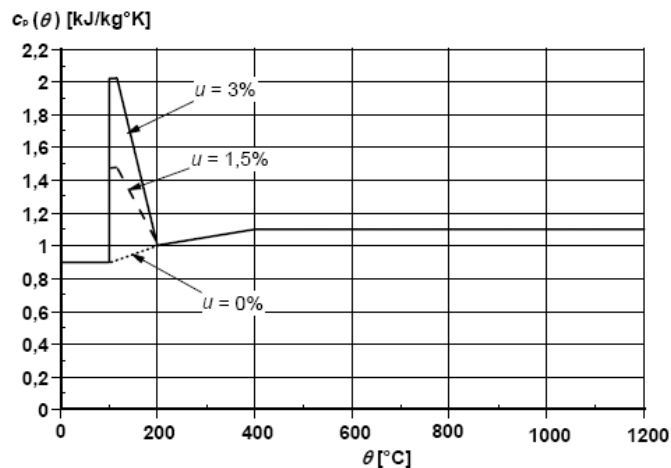


Figura 2 – Variação do calor específico do betão, c_p , com a temperatura e humidade.

2.2.2.2. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

A condutibilidade térmica do betão, λ_c , decresce com a temperatura como se pode observar na Figura 3, apresentando-se a quantidade de água livre e a natureza dos agregados como os principais responsáveis pela existência de um limite superior e inferior da variação daquela propriedade com a temperatura.

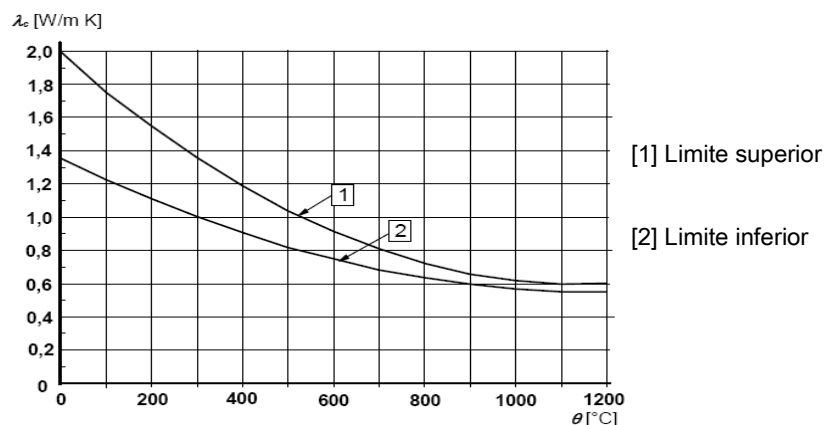


Figura 3 – Variação da condutibilidade térmica, λ_c , com a temperatura.

2.2.2.3. EXTENSÃO TÉRMICA

A extensão térmica do betão, $(\Delta l/l)_c$, aumenta com a temperatura até atingir determinada temperatura crítica, a partir da qual se mantém constante, conforme se pode observar na Figura 1. Esta variação, deve-se essencialmente à natureza dos agregados constituintes do betão, uma vez que as extensões provocadas nos agregados pelo aumento da temperatura são assim reflectidas no betão.

2.2.2.4. DENSIDADE

O betão quando sujeito a elevadas temperaturas sofre uma ligeira diminuição da sua densidade. Esta alteração deve-se essencialmente à evaporação da água livre mas também ao aumento do volume devido à extensão térmica.

Através de vários estudos, concluiu-se que a variação da densidade para um aumento de temperatura de 100°C é inferior a 5%.

2.2.2.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão do betão é afectada essencialmente por dois factores, a diminuição do teor em água e pela decomposição do betão.

A diminuição do teor em água origina um aumento inicial da resistência à compressão, pois como é sabido os betões mais secos têm maiores resistências, como tal até aos 200°C o betão não apresenta redução da sua resistência. A partir dos 200°C verifica-se um aumento das extensões do betão e consequentemente a sua decomposição o que implica a diminuição da sua resistência.

A resistência à compressão do betão é das propriedades mecânicas mais importantes, uma vez que permite quantificar a resistência da secção em estudo.

Apresenta-se na Figura 4 o gráfico apresentado no Eurocódigo 2 Parte 1-2 que permite a avaliação do valor característico da resistência de compressão do betão função da temperatura, $f_{ck,\theta}$, definida através do coeficiente $k_c(\theta)$.

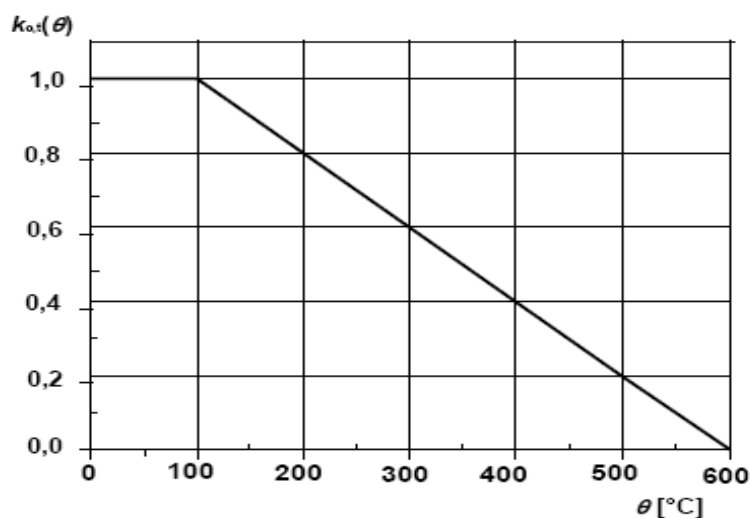


Figura 4 – Coeficiente $K_c(\theta)$ do betão para alta temperaturas.

A resistência à compressão do betão pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$f_{ck,\theta} = k_c(\theta) \times f_{ck,20^\circ} \quad (2.1)$$

Em que,

$k_s(\theta)$ – coeficiente de redução da tensão de compressão em função da temperatura

$f_{ck,20^\circ}$ – resistência do betão a 20°C

2.2.2.6. RELAÇÃO TENSÃO-EXTENSÃO

As relações tensão-extensão para os betões em função da temperatura têm a sua representação esquemática na Figura 5, definidas em função dos parâmetros tensão de compressão, $f_{c,\theta}$, e a correspondente extensão, $\epsilon_{c1,\theta}$, e ainda a extensão de rotura, $\epsilon_{cu1,\theta}$. Os valores destes parâmetros estão definidos no Eurocódigo Parte 1-2 [2].

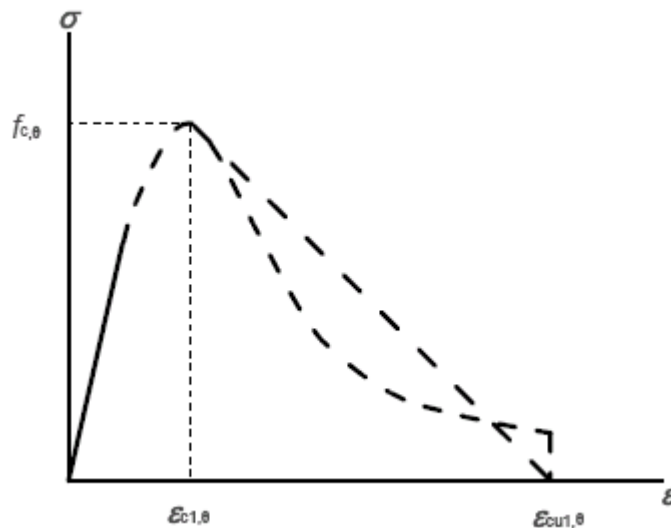


Figura 5 – Variação da tensão-extensão do betão sujeito a elevadas temperaturas.

2.3. AÇO

O aço é normalmente utilizado em estruturas de betão de forma a compensar a fraca resistência à tracção do betão.

Ao contrário do betão o aço apresenta um mau comportamento ao fogo uma vez que é um bom condutor térmico.

A variação das suas características mecânicas com a temperatura é muito importante na avaliação da capacidade resistente do betão armado porque normalmente é aplicado nos limites das secções de betão, ficando mais exposto às elevadas temperaturas.

2.3.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS

2.3.1.1. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico do aço, c_a , varia significativamente com a variação da temperatura tal como se mostra na Figura 6.

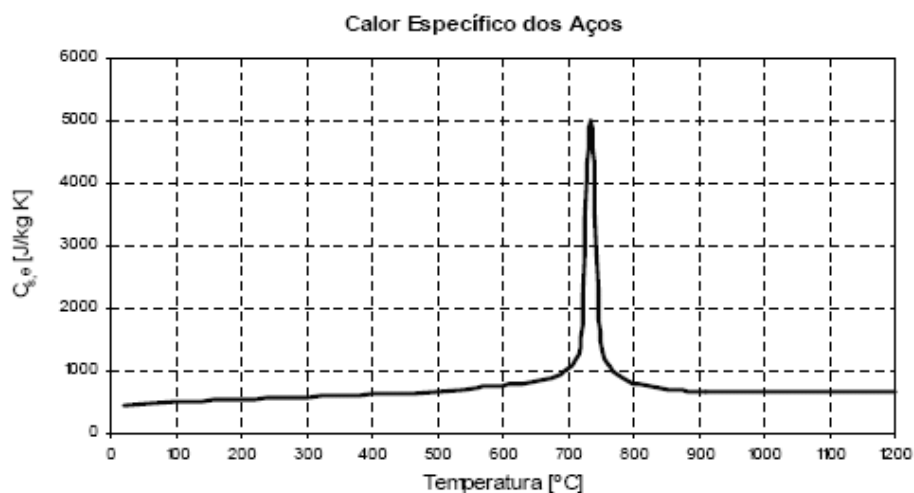


Figura 6 – Variação do calor específico do aço em função da temperatura.

2.3.1.2. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica do aço, λ_a , é muito superior à do betão, contudo, tal como aquela decresce com a temperatura da forma como se mostra na Figura 7.

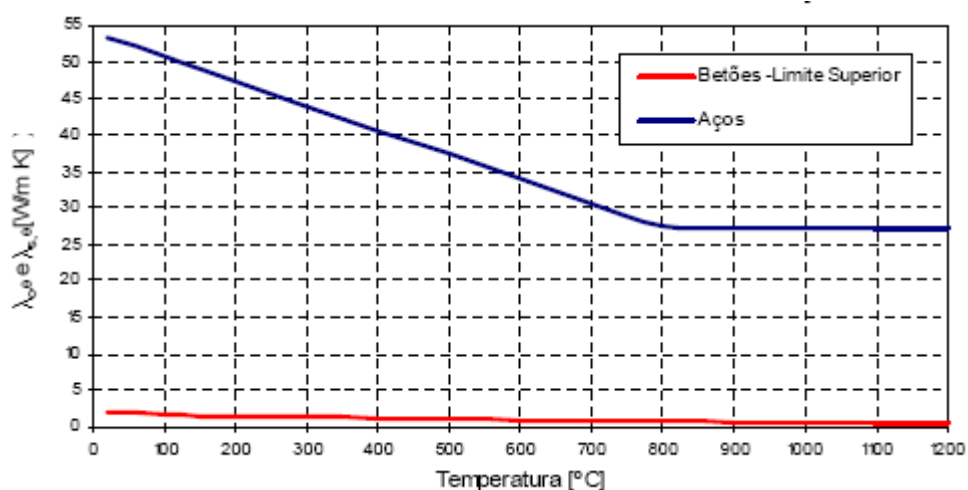


Figura 7 – Variação da condutibilidade térmica do aço e betão em função da temperatura.

2.3.1.3. EXTENSÃO TÉRMICA

A extensão térmica do aço, $(\Delta l/l)_s$, aumenta significativamente com a temperatura, o que pode ser observado através da figura 8.

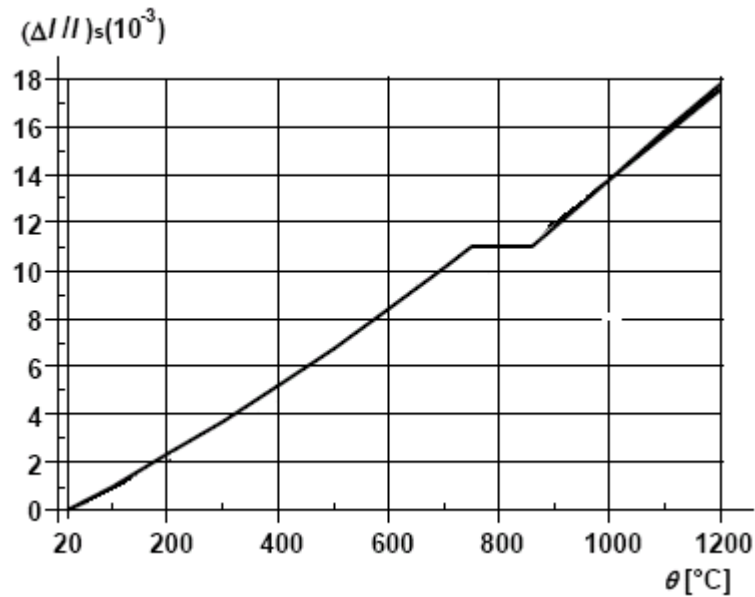


Figura 8 - Variação da extensão do aço com a temperatura

2.3.1.4. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

A resistência à tracção do aço é afectada pela variação da temperatura. Contudo, aquela começa a diminuir significativamente apenas a partir dos 400°C.

A redução do valor característico da resistência de tracção do aço, função da temperatura é definida à custa do coeficiente $k_s(\theta)$,

$$f_{sy,\theta} = k_s(\theta) \times f_{yk20^\circ} \quad (2.2)$$

em que,

$k_s(\theta)$ – coeficiente de redução da tensão do aço em função da temperatura

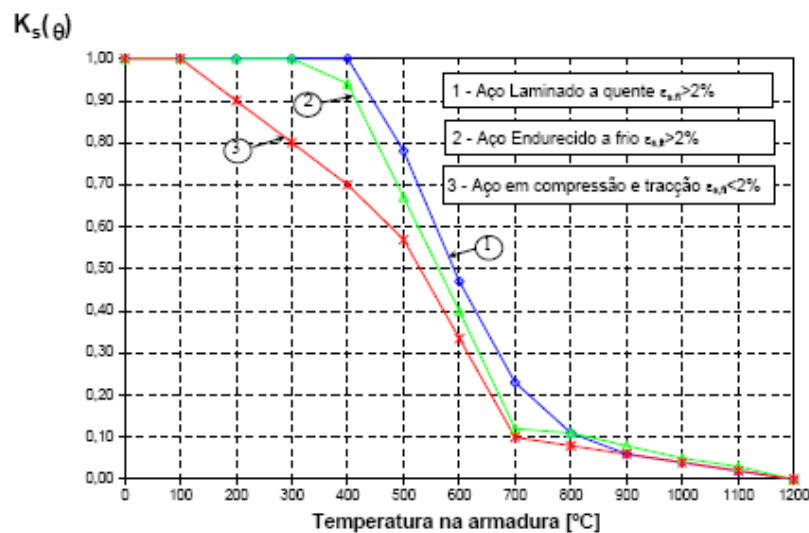
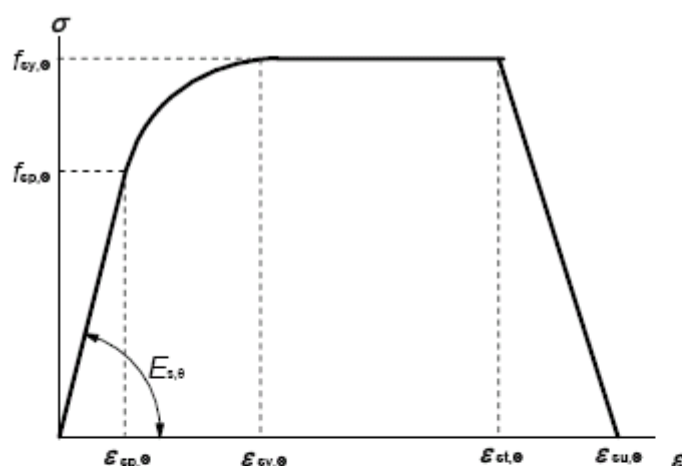


Figura 9 – Coeficientes de redução do aço em função da temperatura - $k_s(\theta)$

$f_{yk\ 20^\circ}$ – resistência do aço a 20°C

2.3.1.5. RELAÇÃO TENSÃO-EXTENSÃO

Mostra-se na Figura 9, retirada do Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2], o esquema simplificado que traduz a variação da tensão-extensão do aço para elevadas temperaturas.



Intervalo	Tensão	Módulo Tangente	
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$	
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - C + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sp,\theta})^2]^{0,5}}$	
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0	
$\varepsilon_{st,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$	-	
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	-	
Parâmetros	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ Class A $\varepsilon_{st,\theta} = 0,05$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,10$		
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + C/E_{s,\theta})$ $b^2 = C (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} + C^2$ $C = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$		

Figura 10 - Variação da tensão-extensão do aço sujeito a elevadas temperaturas.

Assim, através da análise da figura 9 pode-se dividir o comportamento do aço sujeito a elevadas temperaturas em quatro zonas:

- 1.ª Zona – O aço apresenta um comportamento linear, sendo válida a Lei de Hooke;
- 2.ª Zona – O aço apresenta um comportamento não linear, em que atinge a extensão de cedência;
- 3.ª Zona – O aço entra em patamar de cedência, apresentando um comportamento constante;

- 4.^a Zona – O aço apresenta um comportamento linear, mas em sentido descendente, uma vez que atinge a rotura.

Tabela 1 – Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão dos aços correntes de Classe N e Classe X sujeitos a elevadas temperaturas.

Classe do aço	Classe N							Classe X			
Temperatura do Betão [°C]	$f_{sy,s}/f_{yk}$			$f_{sp,s}/f_{yk}$		$E_{s,s}/E_s$		$f_{sy,s}/f_{yk}$		$f_{sp,s}/f_{yk}$	$E_{s,s}/E_s$
	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente e Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente e Endurecido a frio	Laminado a quente e Endurecido a frio	Laminado a quente e Endurecido a frio	Laminado a quente e Endurecido a frio
	$\varepsilon_{s,s} > 2\%$	$\varepsilon_{s,s} > 2\%$	$\varepsilon_{s,s} < 2\%$					$\varepsilon_{s,s} > 2\%$	$\varepsilon_{s,s} < 2\%$		
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87	1,00	1,00	0,87	0,95
300	1,00	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72	1,00	1,00	0,74	0,90
400	1,00	0,94	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56	0,90	0,90	0,70	0,75
500	0,78	0,67	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40	0,70	0,70	0,51	0,60
600	0,47	0,40	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24	0,47	0,47	0,18	0,31
700	0,23	0,12	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08	0,23	0,23	0,07	0,13
800	0,11	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06	0,11	0,11	0,05	0,09
900	0,06	0,08	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05	0,06	0,06	0,04	0,07
1000	0,04	0,05	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04
1100	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-

3

MÉTODOS DE ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO

3.1. PROCESSOS FÍSICOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

A quantificação do gradiente de temperaturas nos elementos estruturais de betão sujeitos a incêndio é fundamental uma vez que permite perceber a variação das suas propriedades face às condições iniciais e consequentemente quantificar a sua resistência.

A transmissão de calor entre dois corpos ocorre sempre que se estabelece um gradiente de temperaturas entre estes, dando-se uma transferência de energia, sob a forma de calor de um para o outro. Esta transferência de calor, faz-se sempre no sentido do elemento com temperatura mais elevada para o de temperatura mais baixa e com conservação de energia, isto é, a quantidade de calor que o elemento mais quente cede é igual à quantidade que o outro elemento recebe.

O processo de transmissão de calor integra três processos distintos convecção, condução, e radiação, que podem coexistir conjuntamente e são os responsáveis pelo fluxo de calor (quantidade de calor transmitida por unidade de área e por unidade de tempo) entre os diferentes corpos.

3.1.1. CONVECÇÃO

A transmissão de calor por convecção caracteriza-se pela transmissão de calor através do movimento de um fluido (líquido ou gasoso), quer no seu interior quer devido ao contacto com partes sólidas devido ao gradiente térmico.

A convecção pode ainda ser natural ou forçada dependendo da acção que lhe dá origem. Assim, teremos convecção natural, quando o movimento é originado pela acção térmica do próprio fluido e convecção forçada quando movimento do fluido se deve a uma acção mecânica externa (p.e. ventilador, bomba, vento, etc.).

Estes dois tipos de convecção podem ocorrer simultaneamente na propagação de um incêndio no interior de um compartimento.

A equação geral que descreve este fenómeno foi estabelecida por Newton no século XVIII e mostra que o fluxo de calor transmitido por convecção entre uma superfície e um fluido é proporcional à área considerada e à diferença de temperaturas estabelecidas, assim tem-se:

$$Q = h \times S \times (T_s - T_f) \quad (3.1)$$

Em que,

Q – Quantidade de calor transmitida entre a superfície S e o fluido por unidade de tempo

h – Coeficiente de transmissão de calor por convecção

T_s – Temperatura do elemento

T_f – Temperatura do fluido

3.1.2. CONDUÇÃO

A transmissão de calor por condução dá-se internamente a um corpo, estando esta forma de transmissão associada à energia interna da matéria, isto é, resulta da transferência de energia entre moléculas.

A condução é uma forma típica de transmissão de calor nos corpos sólidos, contudo também sucede em líquidos e gases e ocorre devido à existência de um gradiente de temperaturas entre duas partes do corpo sendo regida pela Lei de Fourier, que estabelece que o fluxo de calor que atravessa uma dada superfície é proporcional ao produto da área atravessada pelo gradiente de temperaturas existente, ou seja:

$$Q = -\lambda \times S \times \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (3.2)$$

Em que,

Q – Quantidade de calor que atravessa a área S por unidade de tempo

λ – Condutibilidade térmica do material

$\frac{\partial T_s}{\partial n}$ - Derivada normal da temperatura

O sinal menos significa que o calor se propaga no sentido oposto do gradiente.

3.1.3. RADIAÇÃO

A transmissão de calor por radiação, ao contrário da condução e convecção, não necessita de qualquer suporte material e ocorre entre todos os materiais.

Todos os corpos emitem e/ou recebem radiação, sendo que a quantidade de energia emitida depende da sua temperatura absoluta e do estado da sua superfície.

A quantificação da energia radiada por um corpo pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$Q = h_r \times S \times (T^4 - T_{s1}^4) \quad (3.3)$$

Em que,

Q – Quantidade de calor radiada por unidade de tempo

h_r – Coeficiente de transmissão de calor por radiação

S – Superfície S

T – Temperatura absoluta da superfície S

T_s – Temperatura da superfície S1

Apesar da possível separação dos vários processos responsáveis pela transmissão de calor, na realidade todos os processos se manifestam simultaneamente e interactivam uns com os outros.

3.2. EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO COMPARTIMENTO DE INCÊNDIO

A evolução das temperaturas no compartimento de incêndio pode ser calculada através de curvas nominais e curvas paramétricas, as quais possibilitam a verificação da segurança das estruturas em relação ao fogo.

Relativamente às curvas nominais de incêndio existem três tipos de curvas, a curva de hidrocarbonetos, a curva de incêndio normalizado ISO 834 e a curva de incêndio exterior, as quais aparecem representadas na Figura 11. Todavia, estas podem ser obtidas através das seguintes expressões:

- Curva de incêndio de hidrocarbonetos

$$\theta(t) = 20 + 1080(1 - 0,325 \times e^{(-0,167t)} - 0,675 \times e^{(-2,5t)}) \quad (3.4)$$

- Curva de incêndio normalizado ISO 834

$$\theta(t) = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (3.5)$$

- Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores

$$\theta(t) = 20 + 660(1 - 0,687 \times e^{(-0,32t)} - 0,313 \times e^{(-3,8t)}) \quad (3.6)$$

Em que θ é a temperatura em °C para cada instante t (minutos).

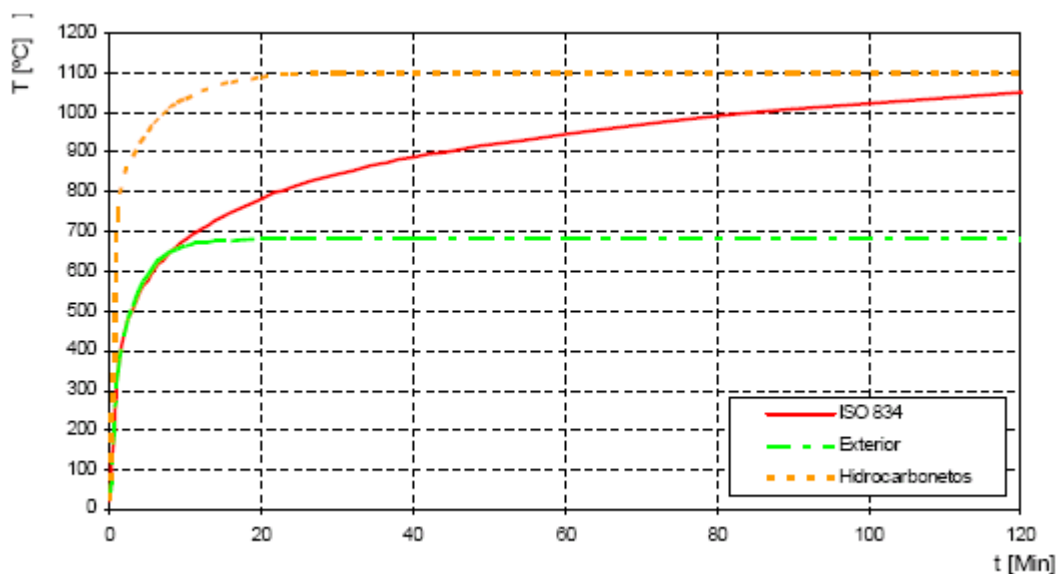


Figura 11 – Curvas de incêndio nominais.

As curvas de incêndio paramétricas são curvas que se ajustam melhor à realidade, uma vez que são determinadas com base em modelos de incêndio e entram em linha de conta com vários parâmetros físicos, nomeadamente as condições de ventilação, as propriedades dos elementos envolventes do compartimento e a densidade de carga do incêndio. Na Figura 12 podem-se observar alguns exemplos de curvas paramétricas.

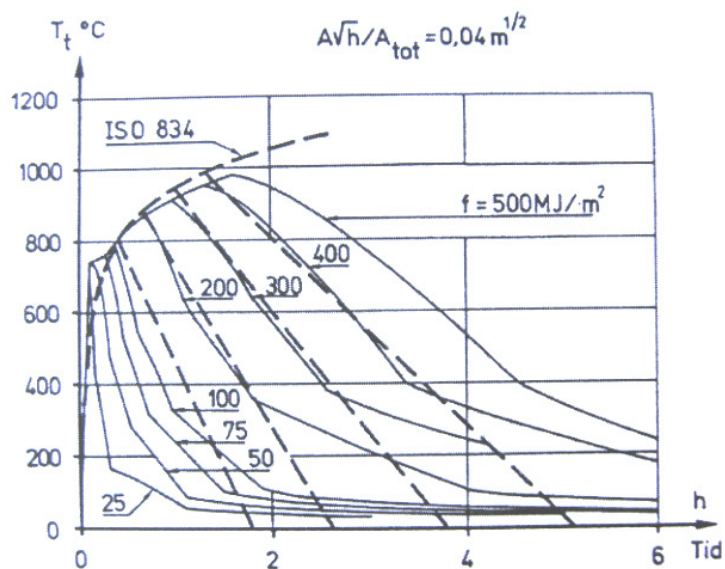


Figura 12 – Curvas de incêndio paramétricas.

3.3. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A verificação de segurança em estruturas sujeitas a incêndio consiste em verificar se o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, é inferior ou igual à resistência de cálculo em situação de incêndio, $R_{d,fi}$, ou seja:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (3.7)$$

O valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$E_{d,fi} = \sum \gamma_{GA} \cdot G_K + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{K,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{K,i} \quad (3.8)$$

em que,

G_K – Valor característico das acções permanentes

$\psi_{1,1}$ e $\psi_{2,i}$ – Coeficientes de combinação

$Q_{K,1}$ – Valor característico da acção variável principal

$Q_{K,i}$ – Valor característico das restantes acções variáveis

A_d – Valor de cálculo da acção accidental, neste caso, representa o valor de cálculo das acções térmicas indirectas devido a incêndio

γ_{GA} – Coeficiente parcial de segurança para as acções permanentes em situação de incêndio

A expressão (3.8) pode ser simplificada uma vez que o valor de cálculo da acção accidental em situação de incêndio pode não ser considerado numa análise de elementos estruturais simples como aquela que é realizada neste trabalho através de um método simplificado de cálculo.

Assim, tendo-se $A_d=0$ e tomando o coeficiente parcial de segurança para as acções permanentes em situação de incêndio igual a 1, fica,

$$E_{d,fi} = \sum G_K + \psi_{1,1} \cdot Q_{K,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{K,i} \quad (3.9)$$

De acordo com o Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2] os efeitos das acções em situação de incêndio podem ser calculados de forma simplificada, assim teremos,

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \times E_d \quad (3.10)$$

em que,

E_d – valor dos efeitos das acções da combinação de estado limite último à temperatura ambiente (valor calculado em fase de dimensionamento)

η_{fi} – factor de redução

O factor de redução, η_{fi} , pode ser obtido através da expressão (3.11) ou simplificadamente pode ser considerado igual a 0,70.

$$\eta_{fi} = \frac{G_K + \psi_{fi} \times Q_{K,1}}{\gamma_G \times G_K + \gamma_{Q,1} \times Q_{K,1}} \quad (3.11)$$

A Figura 12 representa a variação do factor de redução, η_{fi} , em função da relação de cargas, $\xi=Q_{K,1}/G_K$, (relaciona a acção variável de base com as acções permanentes) para diferentes coeficientes de combinação, $\psi_{1,1}$.

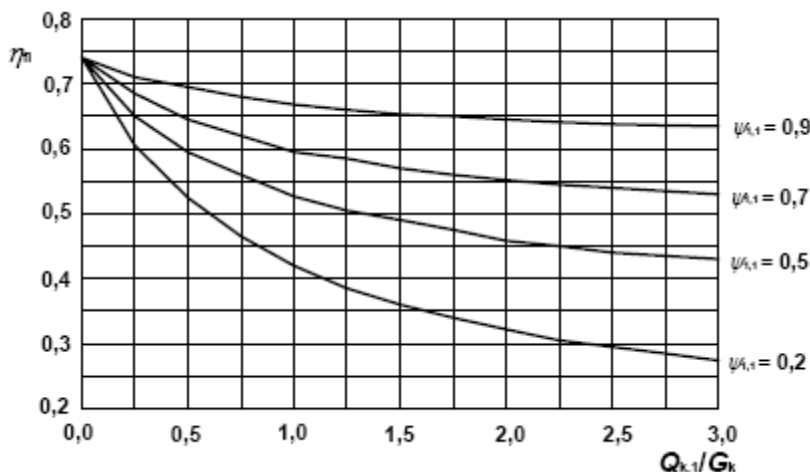


Figura 13 – Variação do factor de redução.

3.3. MÉTODOS DE ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO FOGO

A análise da resistência das estruturas ao fogo permite avaliar a resposta de uma determinada estrutura quando submetida à acção de um incêndio, ou seja, possibilita perceber até que ponto a estrutura consegue manter as suas funções de estabilidade para a quais foi projectada e concebida.

Existem vários métodos através dos quais é possível analisar a resistência das estruturas ao fogo, nomeadamente:

- Método dos Valores Tabelados;
- Métodos Simplificados de Cálculo;
- Métodos Avançados de Cálculo.

Os dois primeiros métodos aparecem expostos no Eurocódigo 2 Parte 1-2 e tal como o próprio nome sugere são métodos de fácil aplicação e correntemente utilizados pelos projectistas na análise das suas estruturas. Os métodos avançados de cálculo são métodos mais complexos permitindo uma análise mais realista das estruturas quando sujeitas a incêndios, mas devido à sua complexidade são normalmente mais utilizados em fases de investigação ou em edifícios de importância acrescida pela sua complexidade ou valor económico.

Enquanto os métodos simplificados e avançados utilizam a curva de incêndio normalizado ISO 834 e as curvas paramétricas para análise do comportamento das estruturas em situação de incêndio, o método dos valores tabelados baseia-se apenas na curva de incêndio normalizado ISO 834.

3.3.1. MÉTODO DOS VALORES TABELADOS

O método dos valores tabelados como referido anteriormente é um método de fácil aplicação e consiste na verificação das dimensões mínimas a nível das secções e das distâncias mínimas das faces das secções aos eixos das armaduras longitudinais capazes de satisfazer determinada resistência ao fogo.

Este método é apresentado no Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2] como um conjunto de tabelas através das quais são definidas as dimensões mínimas para diferentes elementos estruturais e valores do recobrimento das armaduras para satisfazer um determinado valor da resistência ao fogo do elemento

estrutural em causa. Contudo na aplicação deste método devem ser tidas em conta os seguintes aspectos:

- O método baseia-se na curva de incêndio normalizado ISO 834;
- É um método bastante conservativo;
- As tabelas foram concebidas com base em análises experimentais e avaliações teóricas;
- As tabelas são baseadas num nível de carregamento de referência de $\eta_{fi} = 0,7$ e para uma temperatura crítica das armaduras de 500°C , exceptuando casos particulares, também eles abordados na apresentação do método no Eurocódigo;
- As tabelas aplicam-se a elementos de betão de densidade normal (2000 a 2600Kg/m^3) constituído por agregados siliciosos, podendo os valores serem reduzidos em 10% para betões constituídos por agregados calcários;
- Não é necessário efectuar a verificação ao esforço transversal e à torção nem ao fenómeno de spalling;
- O requisito de compartimentação (estanquidade às chamas e gases quentes e isolamento térmico) para paredes e lajes está automaticamente contemplado nos valores tabelados;
- Para situações intermédias podem ser efectuadas interpolações lineares;
- Os símbolos usados nas tabelas são os apresentados na figura 14, em que, 'a' representa a distância da face exterior ao eixo das armaduras, 'b' a menor dimensão da secção e 'h' a altura da viga;

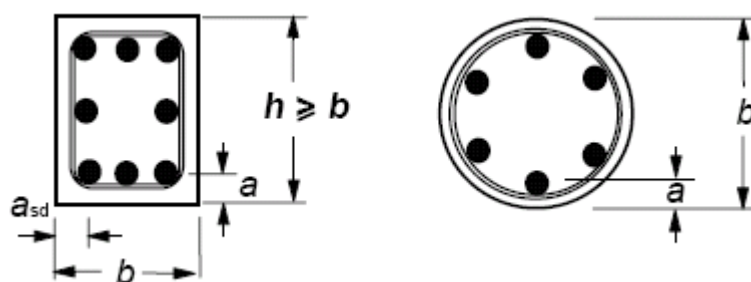


Figura 14 – Símbolos utilizados nas tabelas do Método dos Valores Tabelados

- Para secções com armaduras dispostas em várias camadas, com diferentes diâmetros e diferentes classes de aço, como indicado na figura 15, a distância da face exterior ao eixo deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$a = \frac{\sum_i A_{si} \cdot f_{yki} \cdot a_i}{\sum_i A_{si} \cdot f_{yki}} \quad (3.12)$$

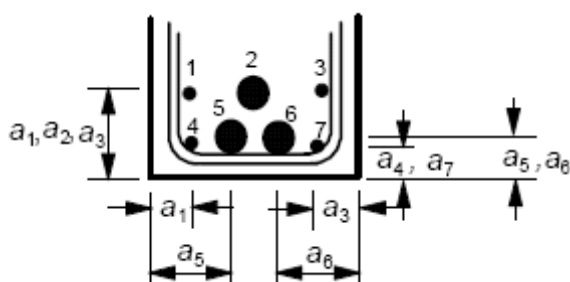


Figura 15 – Exemplo de uma seção com armaduras em várias camadas e varões com diferentes diâmetros

- Em todo o caso a distância da face exterior ao eixo das armaduras deverá sempre respeitar o disposto no Eurocódigo 2 Parte 1-1 [2];

Além das considerações expostas devem ser tidas em consideração alguns parâmetros na análise das tabelas apresentadas para os diferentes elementos estruturais. Assim, descrever-se-á para os pilares, paredes, vigas e lajes os diferentes parâmetros que permitem aplicação das tabelas apresentadas no Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2].

3.3.1.1. PILARES

A análise da resistência o fogo através do método dos valores tabelados em pilares pode ser dividido em dois métodos. O método A diz respeito a pilares sujeitos à acção de esforço axial enquanto o método B se refere a pilares sujeitos a momento flector e esforço axial.

Para a utilização do Método A em pilares, estes devem estar sujeitos a cargas axiais e devem respeitar os seguintes parâmetros:

- Comprimento efectivo do pilar em situação de incêndio deve ser menor que 3,00 metros;
- A excentricidade em situação de incêndio deve respeitar: $e = M_{0Ed,fi} / N_{0Ed,fi} \leq e_{max}$;
- A quantidade de armadura deve respeitar: $A_s \leq 0,04.A_c$;

O Método B utilizado em pilares sujeitos a momento flector e esforço axial, devendo os pilares respeitar as seguintes condições:

- Nível de carregamento: $n = \frac{N_{0Ed,fi}}{0,7.(A_c.f_{cd} + A_s.f_{yd})}$;
- Excentricidade: $e / b \leq 0,25$ e $e_{max} = 100mm$;
- Esbelteza: $\lambda_{fi} \leq 30$.

3.3.1.2. PAREDES

O Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2] refere-se apenas a paredes maciças de betão e que desempenham funções estruturais e de compartimentação.

As tabelas fornecidas permitem obter as espessuras mínimas de acordo com a função desempenhada pela parede na estrutura geral.

3.3.1.3. VIGAS

As tabelas apresentadas no Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2] referem-se a vigas que tenham apenas três faces expostas ao fogo, sendo que a outra face, a face superior se encontra protegida pelo pavimento. Para vigas com as quatro faces expostas ao fogo podem-se aplicar as mesmas tabelas, contudo deve respeitar certas condições,

- Altura da viga $\geq b_{\min}$ da classe de resistência pretendida;
 - Área da viga (A_c) $\geq 2.b_{\min}^2$
- em que $b_{\min}$ é a menor largura mínima da viga fornecida pelas tabelas.

As tabelas diferenciam ainda as vigas contínuas das vigas simplesmente apoiadas.

3.3.1.4. LAJES

As tabelas apresentadas para as lajes consideram que é a face inferior que está exposta ao fogo e a espessura mínima, h_s , aí apresentada garante para além da resistência estrutural para um determinado período de tempo também a função de compartimentação (Critério E e I).

3.3.2. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO

Os métodos simplificados tal como o próprio nome sugere são métodos de simples aplicação que permitem avaliar a resistência de elementos estruturais em situação de incêndio, baseando-se essencialmente na redução da área da secção devida aos efeitos do incêndio e/ou à redução de algumas características materiais que a constitui.

Deste modo, o Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2] apresenta o Método da Isotérmica dos 500°C e o Método de Zona como métodos que se baseiam na secção reduzida do elemento estrutural para o cálculo da sua resistência.

Na aplicação destes métodos assume-se que acima dos 500°C o betão perde a sua resistência e que abaixo desta mantém a sua resistência igual à resistência à temperatura ambiente.

O Capítulo 2 é essencial na aplicação destes métodos, uma vez que apresenta as propriedades térmicas e mecânicas do betão e aço necessárias ao cálculo da resistência dos elementos estruturais.

3.3.2.1. MÉTODO DA ISOTÉRMICA DOS 500°C

O método da isotérmica dos 500°C baseia-se na curva de incêndio padrão ISO 834 ou em qualquer outra curva que apresente um campo de temperaturas semelhante, isto é, as curvas de incêndio paramétricas.

Este método só poderá ser aplicado se forem respeitados os valores mínimos das secções para determinada resistência ao fogo apresentados nas seguintes tabelas, sendo que a Tabela 2 diz respeito a secções expostas ao incêndio padrão ISO 834 e a Tabela 3 a secções expostas a incêndios paramétricos.

Tabela 2 – Largura mínima das secções em função da resistência ao fogo para exposições ao incêndio padrão ISO 834.

Resistência ao Fogo	R60	R90	R120	R180	R240
Largura mínima da secção (mm)	90	120	160	200	280

Tabela 3 – Largura mínima das secções em função da resistência ao fogo para exposições a incêndios paramétricos.

Densidade de carga de incêndio (MJ/m^2)	200	300	400	600	800
Largura mínima da secção (mm)	100	140	160	200	240

Este método simplificado considera a redução da área da secção devido à zona afectada pelo incêndio que é desprezada.

A espessura da zona afectada é determinada através da profundidade da isotérmica dos 500°C na secção. Esta zona não é considerada no cálculo da resistência do elemento, uma vez que atingiu temperaturas superiores a 500°C , enquanto a restante secção mantém a resistência e módulo de elasticidade iniciais à temperatura ambiente. Relativamente às armaduras, mesmo que estas se encontrem fora da secção reduzida, deverão ser consideradas no cálculo da resistência da secção, no entanto as suas propriedades devem ser reduzidas de acordo com a temperatura a que estão expostas.

Apresenta-se na Figura 16 três secções nas quais são consideradas a redução da área pela isotérmica dos 500°C e pela secção rectangular que se lhe equivale em termos de área.



Figura 16 – Redução da área das secções pela Isotérmica dos 500°C

O cálculo da capacidade resistente do elemento estrutural em situação de incêndio através do método da isotérmica dos 500°C de uma forma simplificada resume-se ao seguinte procedimento:

- Determinação da isotérmica dos 500°C para determinado tempo de exposição ao fogo através da curva de incêndio padrão ou curvas paramétricas;
- Determinação da nova largura, b_{fi} , e da nova altura efectiva, h_{fi} , da secção de betão, excluindo o betão com temperatura superior a 500°C;
- Determinação da temperatura das armaduras na zona de tracção e compressão da secção. As armaduras situadas fora da secção reduzida deverão ser igualmente consideradas no cálculo da resistência da secção;
- Determinação do coeficiente de redução das armaduras em função da temperatura a que se encontram;
- Cálculo da capacidade resistente da secção reduzida à temperatura ambiente, através de métodos convencionais, assumindo as propriedades mecânicas reduzidas pelo efeito da temperatura do incêndio.

3.3.2.2. MÉTODO DE ZONA

O método de zona baseia-se apenas na curva de incêndio padrão ISO 834 e trata-se de um método mais trabalhoso que o método da isotérmica dos 500°C, porém apresenta resultados mais rigorosos, nomeadamente para pilares.

Este método tal como o método anterior considera a redução da área da secção devido à zona afectada pelo incêndio. A metodologia consiste na divisão da secção em 3 ou mais zonas paralelas e de equivalente espessura (subsecções rectangulares) para as quais é calculada a temperatura e capacidade resistente para o seu centro de gravidade. Após a avaliação da redução da resistência de cada zona é calculada uma espessura, a_z , da secção que será desprezada no cálculo da capacidade resistente da secção. Esta espessura apresenta-se sempre junto aos bordos da secção, uma vez que é nesses locais que os efeitos do incêndio são mais intensos.

A divisão da parede exposta ao incêndio em ambas as faces em zonas para o cálculo da redução da resistência e a_z define a “parede equivalente”.

A figura 17 apresenta vários tipos de secções correspondente a cada tipo de elemento estrutural onde são definidas a espessura, a_z , e a largura, w , para vários tipos de secções expostas ao fogo. A largura, w , para secções expostas ao fogo apenas numa face é igual à largura da secção, enquanto para secções expostas ao fogo em faces opostas é igual a $2w$.

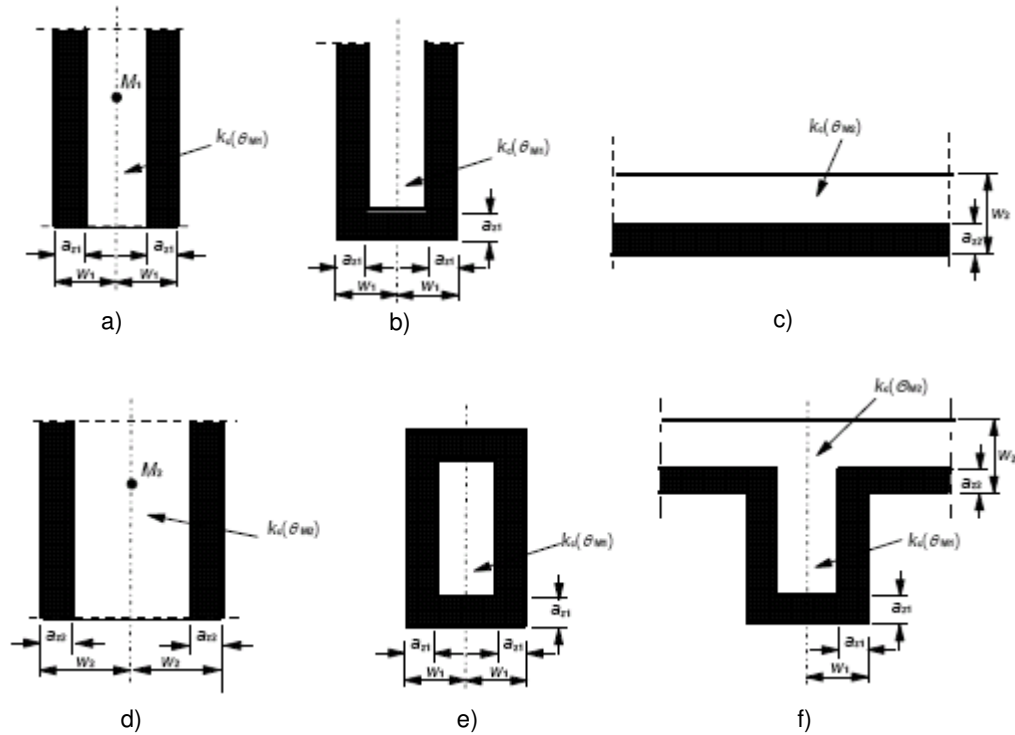


Figura 17 – Secção reduzida de secções expostas ao fogo: a) Parede; b) Extremo da Parede; c) Laje; d) Parede espessa; e) Pilar; f) Viga.

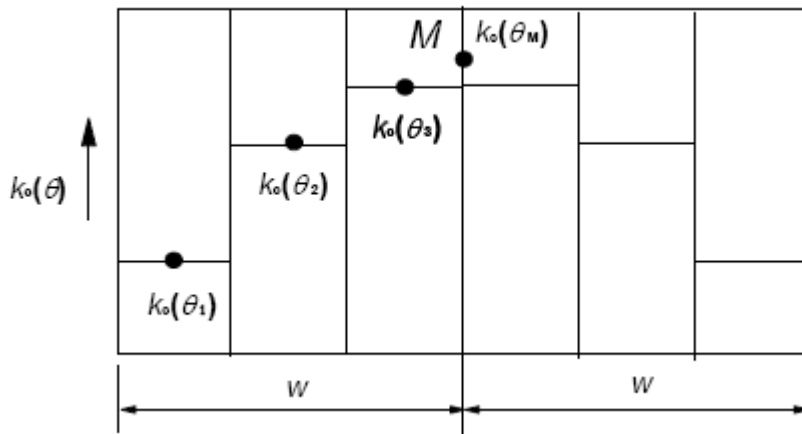


Figura 18 – Parede Equivalente - divisão da parede exposta ao incêndio em ambas as faces em zonas para o cálculo da redução da resistência e a_z .

A aplicação do método de zona para o cálculo da capacidade resistente do elemento estrutural em situação de incêndio deve seguir o seguinte procedimento:

- Dividir a espessura w do elemento em n zonas iguais, no mínimo de 3 (ver Figura 18);
- Determinação da temperatura no centro de gravidade de cada zona e para o ponto médio, M ;

- Determinação do coeficiente de redução da resistência do betão, $k_c(\theta_i)$, para o centro de gravidade de cada zona e para o ponto médio M, $k_c(\theta_M)$. O coeficiente médio de redução da resistência do betão pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{n} \times \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad n \geq 3 \quad (3.13)$$

- Determinação da espessura, a_z , para vigas e lajes:

$$a_z = w \times \left(1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right) \quad (3.14)$$

- Determinação da espessura, a_z , para paredes e pilares, em que se considerado o efeitos de segunda ordem:

$$a_z = w \times \left(1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right) \quad (3.15)$$

- Determinação da nova largura, b_{fi} , e da nova altura efectiva, h_{fi} , em função da largura desprezada, a_z , da secção de betão;
- Determinação da temperatura das armaduras na zona de tracção e compressão da secção. As armaduras situadas fora da secção reduzida deverão ser igualmente consideradas no cálculo da resistência da secção;
- Determinação do coeficiente de redução das armaduras em função da temperatura a que se encontram;
- Cálculo da capacidade resistente da secção reduzida à temperatura ambiente, através de métodos convencionais, assumindo as propriedades mecânicas reduzidas pelo efeito da temperatura do incêndio.

3.3.3. MÉTODOS AVANÇADOS DE CÁLCULO

Os métodos avançados de cálculo permitem obter uma análise do comportamento estrutural ao fogo de elementos estruturais simples, subestruturas, ou estruturas completas bastante aproximada da realidade, uma vez que se apoia em princípios físicos fundamentais, entrando em linha de conta com grande parte dos processos e fenómenos envolvidos na exposição ao fogo.

No entanto, a maioria destes métodos são baseados na aplicação do método de elementos finitos e como normalmente têm uma interface com o utilizador pouco “friendly” tornam-se de difícil aplicação no âmbito de projecto, assumindo assim grande notoriedade em termos de investigação.

Apesar dos vários programas existentes, apenas se irá apresentar o SAFIR e o SimFirb. Contudo este último apenas permite efectuar a análise mecânica, numa abordagem de método simplificado. Como o SimFirb necessita da análise térmica efectuada pelo SAFIR, ou seja, um método avançado de cálculo na avaliação térmica a abordagem deste modelo será aqui feita.

Recorda-se que o objectivo deste trabalho é precisamente tornar o modelo SimFirb autónomo em relação ao modelo de cálculo SAFIR no que se refere à análise térmica. Assim, o modelo SimFirb e o modelo TS2 quando conjugados serão um modelo simplificado de cálculo da resistência ao fogo de estruturas de betão.

3.3.3.1. SAFIR

O SAFIR foi desenvolvido por Jean-Marc Franssen na Universidade de Liège [3] e trata-se de um programa de elementos finitos que permite a análise de estruturas a diferentes temperaturas, realizando a análise térmica e a análise estrutural de forma autónoma como aliás é frequente neste tipo de modelos.

O programa permite o estudo de estruturas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais em aço, betão e mistas de aço/betão e mais recentemente de outro tipo de materiais como o alumínio e o aço inox e até da madeira.

A aplicação do SAFIR no estudo do comportamento ao fogo de estruturas de betão baseia-se essencialmente nas seguintes análises:

- Análise térmica – determinação da distribuição de temperaturas na secção para a situação de incêndio, considerando a variação das propriedades térmicas dos materiais. O próprio programa tem uma base de dados com inúmeras curvas de incêndio, mas através do fornecimento de um conjunto de dados pode-se definir a curva que se pretende.
- Análise estrutural – determinação na capacidade resistente da estrutura com base na análise térmica. Este cálculo é baseado num processo incremental iterativo, em que se determina sucessivamente a posição de equilíbrio para a solicitação termo mecânica.

Na realidade o SAFIR apresenta-se como um programa com grandes potencialidades e que permite obter uma análise rigorosa do comportamento ao fogo de estruturas de betão.

3.3.3.2. SIMFIRB

O programa SimFIRb (Simplified Fire Resistance – beam) foi desenvolvido pelo Orientador desta tese Miguel Chichorro Gonçalves aquando da elaboração da sua tese “Comportamento ao Fogo de Elementos Estruturais de Betão - Análise Numérica e Metodologia” [1], e que concedeu a sua utilização para o desenvolvimento deste trabalho.

Este programa permite efectuar a análise da capacidade resistente de estruturas expostas a incêndio, em que se obtém as características termo-mecânicas do betão e aço de cada elemento da secção a partir do campo de temperaturas da secção determinado pelo SAFIR (análise térmica efectuada pelo SAFIR).

Apresenta-se na Figura 19 o organigrama de funcionamento do modelo que conjugando os modelos SAFIR e SimFIRb permite a determinação da capacidade resistente de uma secção de betão exposta a incêndio. O SimFIRb foi desenvolvido em Fortran e através de folhas de cálculo que permitem a interligação com o SAFIR e a introdução de dados dos elementos estruturais analisados.

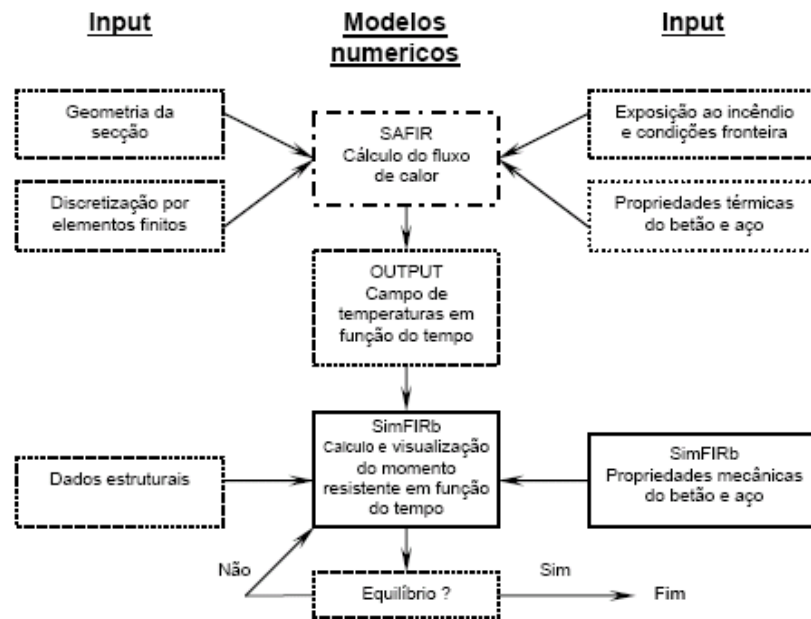


Figura 19 – Organograma de funcionamento do SimFIRb

Apresenta-se na Figura 20 o organograma de cálculo da capacidade resistente de uma secção de betão armado sujeita a incêndio desenvolvendo o modelo TS2 descrito no Capítulo 4.

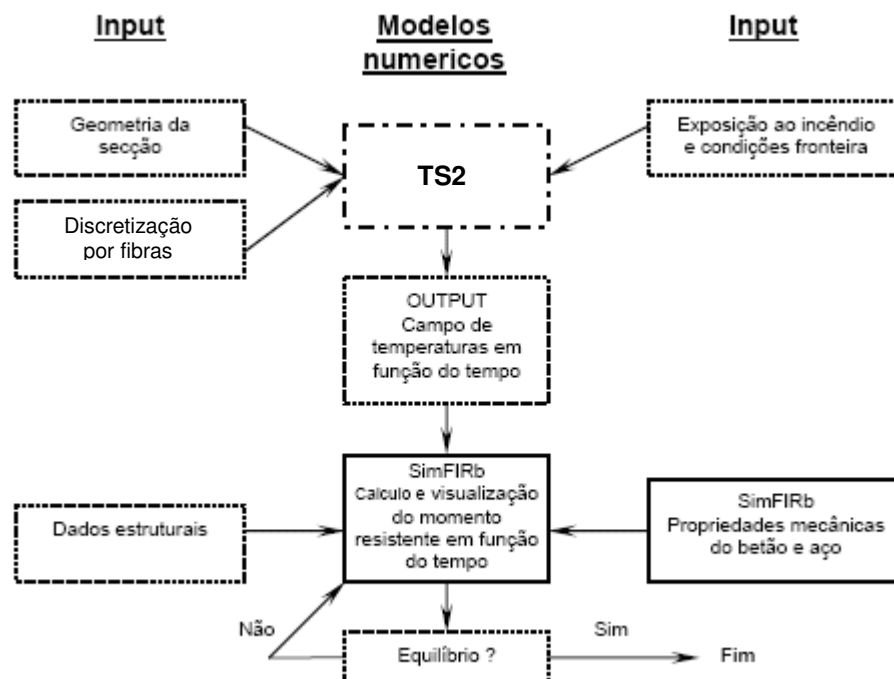


Figura 20 – Organograma de cálculo da capacidade resistente de uma secção de betão armado

4

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO EM VIGAS

4.1. MÉTODO DESENVOLVIDO PARA A ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO FOGO EM VIGAS

A análise da resistência de vigas em situação de incêndio pode ser efectuada através de um dos métodos descritos no Capítulo anterior, porém e tendo em consideração os seguintes condicionalismos:

- O método dos valores tabelados apesar de fácil aplicação apresenta-se como um método bastante conservativo, implicando por vezes a mudança das secções das vigas quando na realidade se a análise fosse efectuada por métodos simplificados ou avançados de cálculo tal não seria necessário;
- Os métodos simplificados necessitam dos perfis de temperatura das secções em análise para o cálculo da secção reduzida e para a aplicação dos coeficientes de redução dos materiais, contudo no Eurocódigo 2 Parte1-2 [2] apenas são apresentados perfis para quatro tipos de secções e para determinados tempos de exposição ao fogo. Deste modo, a aplicação destes métodos a secções com dimensões e tempos de exposição diferentes dos constantes no Eurocódigo 2 Parte1-2 [2] assume elevado grau de dificuldade. Aliado às dificuldades apresentadas, a leitura dos perfis de temperatura das secções baseia-se numa análise gráfica e não na resolução de equações o que pode implicar erros na aplicação dos métodos simplificados;
- O método avançado de cálculo SAFIR é sem dúvida uma ferramenta de grande potencial, contudo a sua aquisição não está ao alcance de todos;
- O SimFirb é um método rigoroso no cálculo da capacidade resistente dos elementos estruturais quando sujeitos a incêndio, contudo necessita da análise térmica efectuada pelo SAFIR;

O autor desenvolveu um programa, TS2, capaz de efectuar a análise térmica de qualquer secção para instantes intervalados de 15 minutos, superando assim os valores fornecidos pelo Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2]. Assim, evita-se a necessidade de recorrer à análise térmica do SAFIR aplicando posteriormente o SimFirb para o cálculo da capacidade resistente do elemento em estudo.

4.1.1. ESTRUTURA DO MÉTODO DESENVOLVIDO

Descreve-se de modo esquemático na Figura 21 o método desenvolvido para a análise da resistência ao fogo em vigas, em que o grande destaque reside na análise térmica efectuada por este, que termina com a aplicação do SimFIRb.

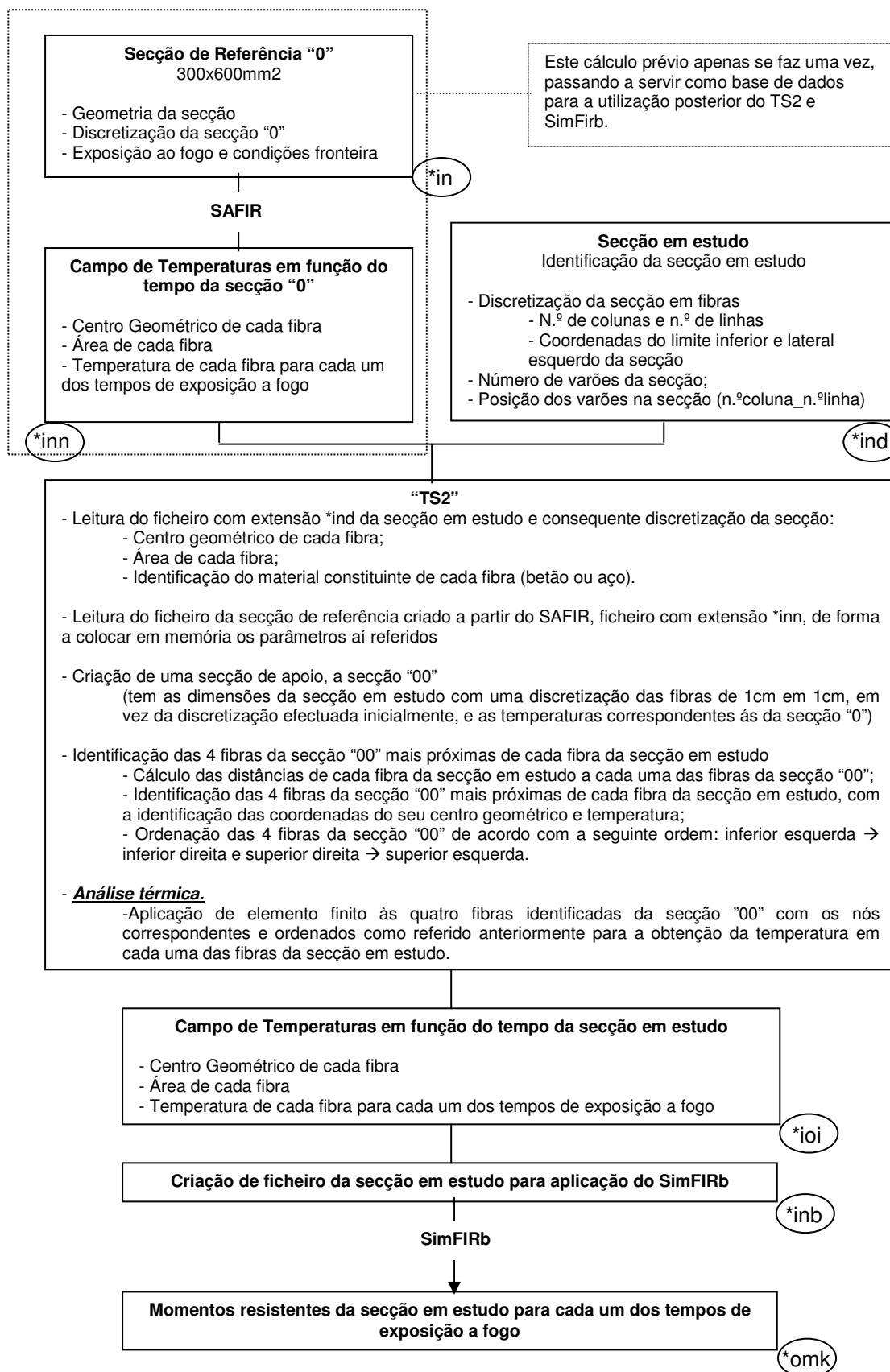


Figura 21 – Organograma do método desenvolvido “TS2”.

O método desenvolvido consiste na aplicação dos seguintes passos:

1. Definição das características da secção de referência “0”, nomeadamente:

- Geometria da secção;
- Discretização da secção “0”;
- Exposição ao fogo e condições fronteira.

A secção de referência, designada de secção “0” define uma secção de 600 x 1200 mm², uma vez que com esta secção se consegue abranger a quase totalidade das secções correntemente utilizadas na construção e ainda as secções estudadas neste trabalho. Contudo, para a aplicação do programa apenas se definiu um quarto da secção, 300 x 600 mm², pois a restante secção é duplamente simétrica da secção discretizada.

A definição da secção “0” é conseguida através de um ficheiro com extensão *.in, como apresentado no organograma. O ficheiro “0.in” é apresentado no Anexo 2.

2. Aplicação do SAFIR para a obtenção do campo de temperaturas em função do tempo para a secção “0” (300 x 600 mm²)

Face à limitação do Eurocódigo 2 Parte 1-2 [2] relativamente aos perfis de temperaturas das secções, recorreu-se ao SAFIR na determinação dos perfis de temperatura para os diferentes tempos de exposição ao fogo (R0, R15, R30, R45, R60, R75, R90, R105, R120, R135, R150, R165, R180, R195, R210, R225, R240) para a secção “0”.

Da análise térmica efectuada pelo SAFIR, resulta um ficheiro com extensão *.inn com a seguinte informação:

- Centro geométrico de cada fibra;
- Área de cada fibra;
- Temperatura de cada fibra para cada um dos tempos de exposição a fogo;

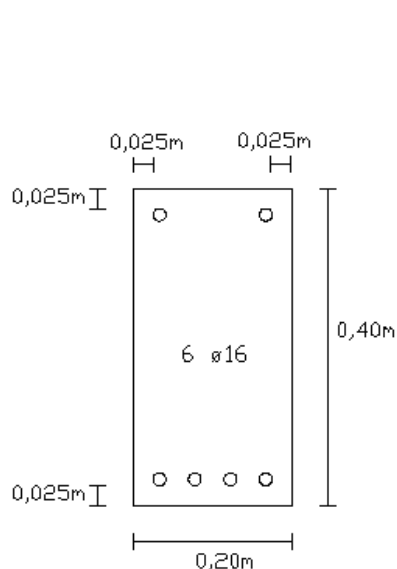
De salientar que os passos anteriores apenas são executados uma única vez, servindo depois de base para todas as secções estudadas.

3. Elaboração de um ficheiro com extensão *.ind para cada secção em estudo com definição dos seguintes parâmetros:

- Discretização da secção,
 - Número de colunas e linhas;
 - Coordenadas do limite inferior e lateral da secção;
- Número de varões da secção;
- Posição dos varões na secção;
- Assume-se que a secção está totalmente exposta ao fogo, com excepção da face superior, uma vez que se tem que respeitar as condições de exposição ao fogo da secção referência, secção “0”.

A discretização de cada secção deverá ser efectuada de modo a garantir que o número de linhas e colunas seja par. As seguintes Figuras apresentam a tipologia de uma secção em estudo, Figura 22, a discretização em fibras, Figura 23 e a estrutura completa do ficheiro *.ind, Figura 24.

Exemplo:



16	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
15	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
14	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196
13	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
12	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
11	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
10	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
9	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
8	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
7	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
6	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
5	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
4	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
3	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
2	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Figura 22 - Secção em estudo.

Figura 23 - Discretização pretendida.

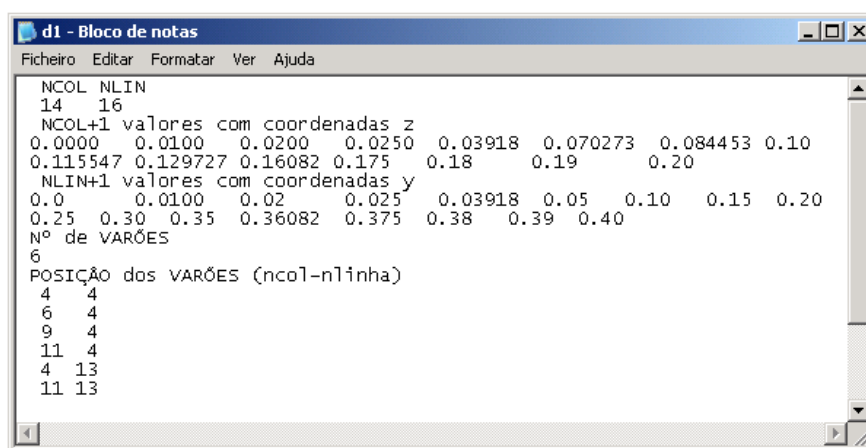


Figura 24 - Ficheiro com extensão *.ind da secção em estudo.

A partir do passo seguinte começa o método desenvolvido neste trabalho.

4. Leitura do ficheiro com extensão *.ind da secção em estudo (passo 3) e criação dos seguintes dados:

- Centro geométrico de cada fibra;
- Área de cada fibra;
- Identificação do material constituinte de cada fibra (betão ou aço);

5. Leitura do ficheiro da secção de referência “0” criado a partir do SAFIR, ficheiro com extensão *.inn, de forma a colocar em memória os parâmetros referidos no passo 2.

6. Criação de uma secção de apoio, a secção “00”, que tem as dimensões da secção em estudo com uma discretização das fibras de 1cm em 1cm, em vez da discretização efectuada no passo 2, e as temperaturas correspondentes às da secção “0”, também elas com uma discretização de 1cm em 1cm.

A atribuição das temperaturas é conseguida através de um algoritmo que atribui as temperaturas de cada fibra da secção “0” à fibra correspondente da secção “00”.

Este passo é de extrema importância na medida em que faz a transição das temperaturas da secção de referência “0” para a secção em estudo.

7. Identificação das 4 fibras da secção “00” mais próximas de cada fibra da secção em estudo

7.1 Cálculo das distâncias de cada fibra da secção em estudo a cada uma das fibras da secção “00”;

7.2 Identificação das 4 fibras da secção “00” mais próximas de cada fibra da secção em estudo, com a identificação das coordenadas do seu centro geométrico e temperatura;

7.3 Ordenação das 4 fibras da secção “00” de acordo com a seguinte ordem: inferior esquerda → inferior direita e superior direita → superior esquerda;

7.4 Aplicação do elemento finito de 4 nós [4] às quatro fibras identificadas (ao centro geométrico de cada fibra faz-se corresponder um nó do elemento finito virtual) para a obtenção da temperatura em cada uma das fibras da secção em estudo.

O elemento finito aplicado é o elemento finito de 4 nós isoparamétrico, que se baseia na seguinte aplicação:

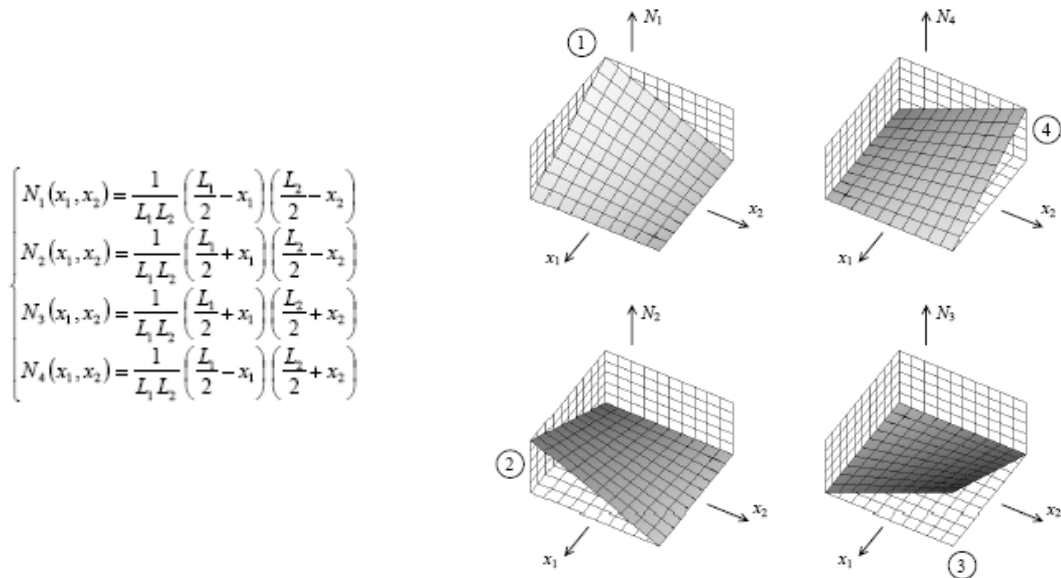


Figura 25 – Gráficos das funções $N_i(x_1, x_2)$ para um elemento de dimensões $L_1 \times L_2 = 2 \times 2$.

8. Campo de temperaturas em função do tempo da secção em estudo

O modelo TS2 tem como “output” um ficheiro com extensão *.ioi com a definição do campo de temperaturas da secção em estudo para os diferentes tempos de exposição ao fogo:

- Centro geométrico de cada fibra;
- Área de cada fibra;
- Temperatura de cada fibra para cada um dos tempos de exposição a fogo.

9. Criação de ficheiro da secção em estudo para aplicação do SimFIRb

- Criação de um ficheiro com extensão *.inb da secção em estudo, de acordo com o campo de temperaturas definidas no passo anterior de modo a permitir a aplicação do SimFIRb.

10. Aplicação do SimFIRb no cálculo da capacidade resistente da secção em estudo sujeita a incêndio.

- Através da análise da Figura 20 e comparando com a análise da Figura 19, a alteração do modelo de cálculo da capacidade resistente consiste na introdução do ficheiro criado anteriormente em detrimento do ficheiro resultante do SAFIR.
- Na Figura 26 apresenta-se o procedimento de cálculo do SimFIRb descrito pelo seu autor [1], contudo e como referido anteriormente, neste caso o passo 1 não é propriamente o aí apresentado, uma vez que a análise térmica resulta dos passos anteriores não necessitando assim da análise efectuada pelo SAFIR. Como tal, o ficheiro *.TEM deixa de ter sentido aparecendo agora o ficheiro *.inb resultante do passo 9.

1. Introdução de dados

Na introdução de dados são necessários os seguintes ficheiros

- *.IN - ficheiro de dados dos programas SAFIR e "SimFIRb"
- *.TEM- ficheiro de resultados da análise térmica de SAFIR
- ficheiro de dados de "SimFIRb"
- *.DAT - ficheiro de dados de "SimFIRb"

Para a determinação da distribuição de temperaturas no interior da secção de betão armado é necessário discretizar a secção em elementos finitos rectangulares. Introduzem-se dados geométricos (número de nós, coordenadas x e y de cada nó, número de elementos, incidências de cada elemento, tipo de material de cada elemento), dados relativos à variação das propriedades físicas dos materiais usados com a temperatura, dados respeitantes à exposição dos elementos ao incêndio e a definição da própria curva de incêndio (utilizou-se em todos os casos a curva de incêndio padrão ISO 834 embora se pudesse ter utilizado qualquer outra, correspondente, por exemplo, a um incêndio real).

O ficheiro *.DAT introduz apenas dados complementares àqueles que já foram dados em *.IN como por exemplo os valores da extensão limite do aço (normalmente definida como 10‰) e a extensão limite do betão (normalmente definida como 3,5‰) e o esforço normal actuante na secção (em kN).

2. Cálculo das tensões no aço em função da temperatura e extensão

É usado o Modelo matemático para as relações tensão-extensão do aço a temperaturas elevadas apresentado no Eurocódigo 2, Parte 1.2, [1], nomeadamente no parágrafo 5.2.

3. Cálculo das tensões no betão em função da temperatura e extensão

É usado o modelo matemático para as relações tensão-extensão do betão a temperaturas elevadas apresentado no Eurocódigo 2, Parte 1.2, [1], nomeadamente no parágrafo 5.2.

4. Cálculo da resultante das forças nas armaduras

Definido o valor dos dois graus de liberdade (extensão ao nível do centro de gravidade e curvatura), calcula-se a extensão ao a nível do centro de gravidade de cada elemento varão e a tensão correspondente para uma dada temperatura. Esta última, multiplicada pela área da secção transversal de cada varão, fornece o valor da força resultante.

5. Cálculo da resultante das forças nos elementos à compressão

Para cada elemento da secção, determina-se a extensão no centro de gravidade de cada um e a tensão correspondente, conforme o material seja aço ou betão. Multiplicando o valor desta tensão pela área do referido elemento e estendendo o somatório a todos eles, obtém-se a força resultante das tensões nos elementos da secção.

6. Equilíbrio do esforço normal resultante com o actuante

Define-se um valor inicial do incremento do valor da extensão ao nível do centro de gravidade da secção, calcula-se a resultante das tensões na secção correspondente ao diagrama de extensões considerado, comparando o valor obtido com o valor do esforço normal actuante. Se o equilíbrio não for verificado, efectua-se uma translação ao diagrama de extensões no sentido correcto, apertando sucessivamente o incremento da extensão ao nível do centro de gravidade da secção até que o erro relativo do esforço normal seja inferior a 2%.

7. Cálculo do momento flector resultante

Após o equilíbrio do esforço normal, há que calcular o momento flector correspondente ao diagrama de tensões equilibrado.

8. Cálculo da derivada da curva momento-curvatura, e ou verificação do alcance de um estado limite último ($\epsilon_s=10E^{-3}$ ou $\epsilon_c=3,5E^{-3}$)

De forma a detectar o posicionamento na curva $M-K$, isto é, com o objectivo de descobrir se se encontra no ramo ascendente ou no descendente, o programa calcula a derivada no ponto em causa da referida curva. Se for positiva, incrementa a curvatura e o processo continua. Se for negativa, volta atrás e vai buscar o valor máximo, diminuindo o incremento do valor da curvatura. Até que $M-K$ seja nulo (menor que um valor pré-determinado ou até que uma das extensões $\epsilon_s=10E^{-3}$ ou $\epsilon_c=3,5E^{-3}$ limites seja atingida.

Figura 26 – Estrutura do SimFIRb.

A aplicação do SimFirb e do método desenvolvido TS2 têm subjacentes alguns pressupostos, nomeadamente:

- As secções planas mantêm-se planas;
- A tensão de tracção do betão foi negligenciada;
- Desde que as áreas de armadura sejam pequenas, assume-se que quer as temperaturas, quer as extensões são uniformes para o aço;
- Não é considerado o efeito de “spalling”;
- As tensões de corte não são consideradas;
- Os betões considerados foram apenas os siliciosos;
- Considera-se que a temperatura é uniforme ao longo do comprimento da secção.

11. Momentos resistentes da secção em estudo para cada um dos tempos de exposição ao fogo

Da aplicação do SimFIRb, passo 10, resulta um ficheiro com a extensão *.omk, que fornece os momentos resistentes da secção em estudo para cada um dos tempos de exposição ao fogo.

4.2. CASOS DE ESTUDO

O modelo desenvolvido neste trabalho quando comparado com a análise efectuada por Miguel Chichorro Gonçalves [1], apresenta como grande vantagem o facto da análise térmica ser efectuada por um programa mais simples do que o SAFIR, uma vez que a posterior análise mecânica é feita igualmente com o recurso ao modelo simplificado por ele desenvolvido SimFIRb. Assim, de modo a testar o modelo desenvolvido, TS2, ao longo deste trabalho procedeu-se à obtenção dos momentos resistentes para cada secção em estudo através da análise térmica efectuada pelo SAFIR e através do modelo desenvolvido, TS2, com a posterior aplicação do SimFIRb.

A análise da resistência ao fogo será efectuada para as 14 secções apresentadas na Figura 27 e a sua escolha residuiu no facto de se tratarem de secções de vigas correntemente utilizadas na construção.

As secções estudadas, baseiam-se em duas secções tipo relativamente às suas dimensões, $200 \times 400 \text{ mm}^2$ e $400 \times 600 \text{ mm}^2$, nas quais se variam a disposição e diâmetro das armaduras e o recobrimento.

As características mecânicas dos materiais consideradas para todas as secções foram as do betão C20/25 e aço A400.

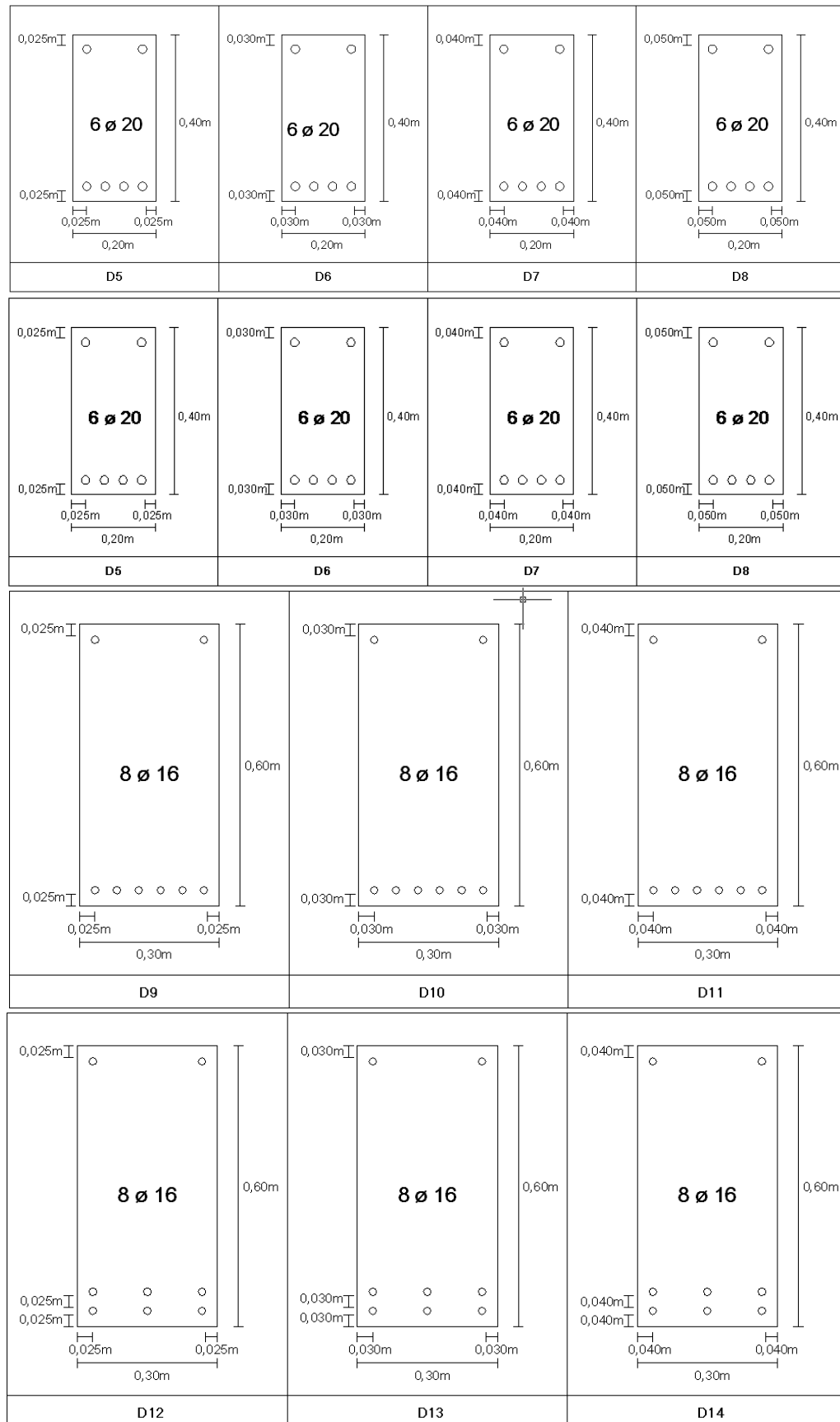


Figura 27 – Casos de estudo – Vigas D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14.

4.3. RESULTADOS

De modo a testar o modelo desenvolvido, TS2, ao longo deste trabalho procedeu-se à obtenção dos momentos resistentes para cada uma das secções da Figura 27 através da análise térmica efectuada pelo SAFIR e através do modelo desenvolvido, TS2, com a posterior aplicação do SimFIRb.

Assim, através da comparação dos momentos resistentes obtidos pela análise térmica efectuada quer pelo SAFIR quer pelo TS2 com a posterior aplicação do SimFirb é possível averiguar a eficiência do modelo desenvolvido, uma vez que aplicação do SAFIR conjuntamente com o SimFirb foi utilizada na tese de doutoramento de Miguel Chichorro Gonçalves [1].

4.3.1. ANÁLISE QUALITATIVA

As figuras apresentadas seguidamente representam a evolução dos momentos resistentes das várias secções apresentadas na Figura 27 quando sujeitas ao incêndio padrão ISO 834. Para cada uma das secções são apresentadas duas curvas, uma delas representa a evolução dos momentos resistentes através da aplicação do SAFIR e posteriormente do SimFirb enquanto a outra representa a evolução dos momentos resistentes através da aplicação do TS2 e posteriormente do SimFirb.

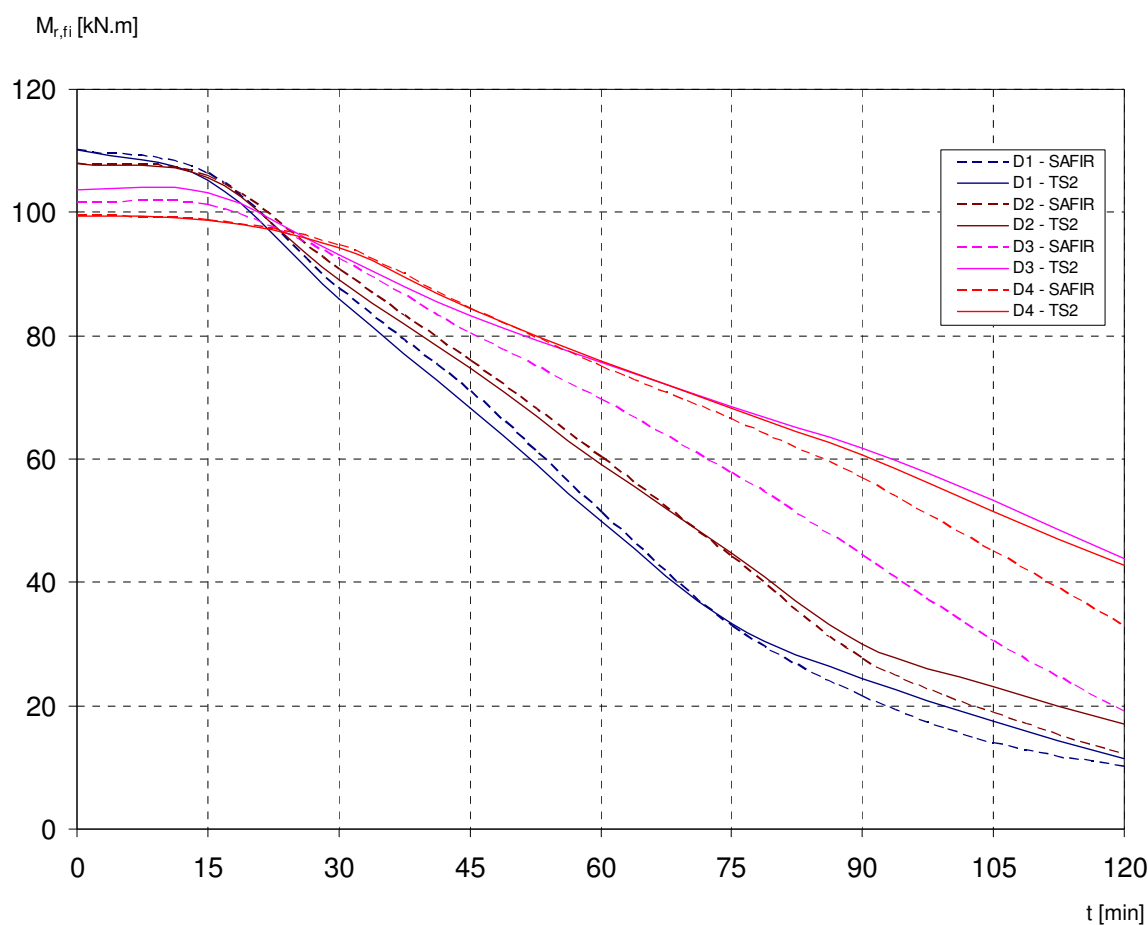


Figura 28 - Momentos resistentes nas secções D1, D2, D3 e D4.

A Figura 28 apresenta a evolução dos momentos resistentes das secções D1, D2, D3 e D4. Estas secções apenas variam no recobrimento, varia entre 2,5 cm e 5cm, enquanto o diâmetro dos varões, o número de varões e a sua disposição são iguais.

Através da análise das curvas representativas da evolução dos momentos resistentes das secções D1 e D2, verifica-se a semelhança entre os resultados obtidos pela análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo método desenvolvido “TS2”. As curvas apresentam um desenvolvimento muito próximo, cruzando inclusive no instante 75 min.

Relativamente à secção D3 verifica-se a semelhança entre as duas curvas até ao instante 30 min, contudo a partir deste instante começa a verificar-se um desfasamento entre estas, que se agrava à medida que aumenta o tempo de exposição ao fogo. Este desfasamento deve-se ao facto das temperaturas das fibras obtidas pelo TS2 posicionadas na parte superior da secção apresentarem valores ligeiramente diferentes dos obtidos pelo SAFIR, uma vez que na parte inferior dessa secção esses valores são muito semelhantes.

Relativamente às curvas da secção D4, os momentos obtidos pela análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo TS2 são em tudo semelhantes, com excepção dos valores obtidos a partir do instante 90 min, em que se verifica uma ligeira diferença entre estes. Essa diferença deve-se às temperaturas obtidas para as fibras posicionadas na parte central superior da secção na análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo TS2 diferirem ligeiramente.

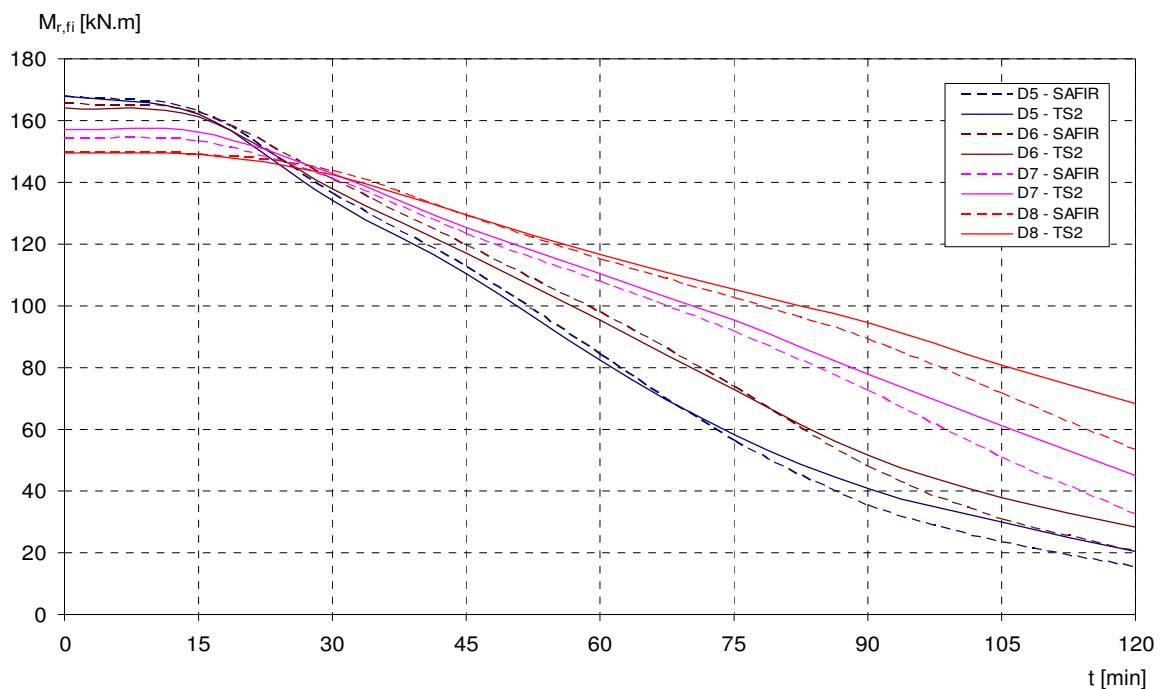


Figura 29 - Momentos resistentes nas secções D5, D6, D7 e D8.

A Figura 29 agora apresentada, representa a evolução dos momentos resistentes das secções D5, D6, D7 e D8. Estas secções apenas variam no recobrimento, que varia entre 2,5 cm e 5cm, enquanto o diâmetro dos varões, o número de varões e a sua disposição são iguais.

Da análise das curvas apresentadas na Figura 29 dos momentos resistentes obtidos através da análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo TS2 verifica-se uma inteira semelhança entre estas em todas as secções estudadas. Tal facto, sugere a fiabilidade do método desenvolvido, uma vez que tal situação vem sendo repetida para as secções já apresentadas.

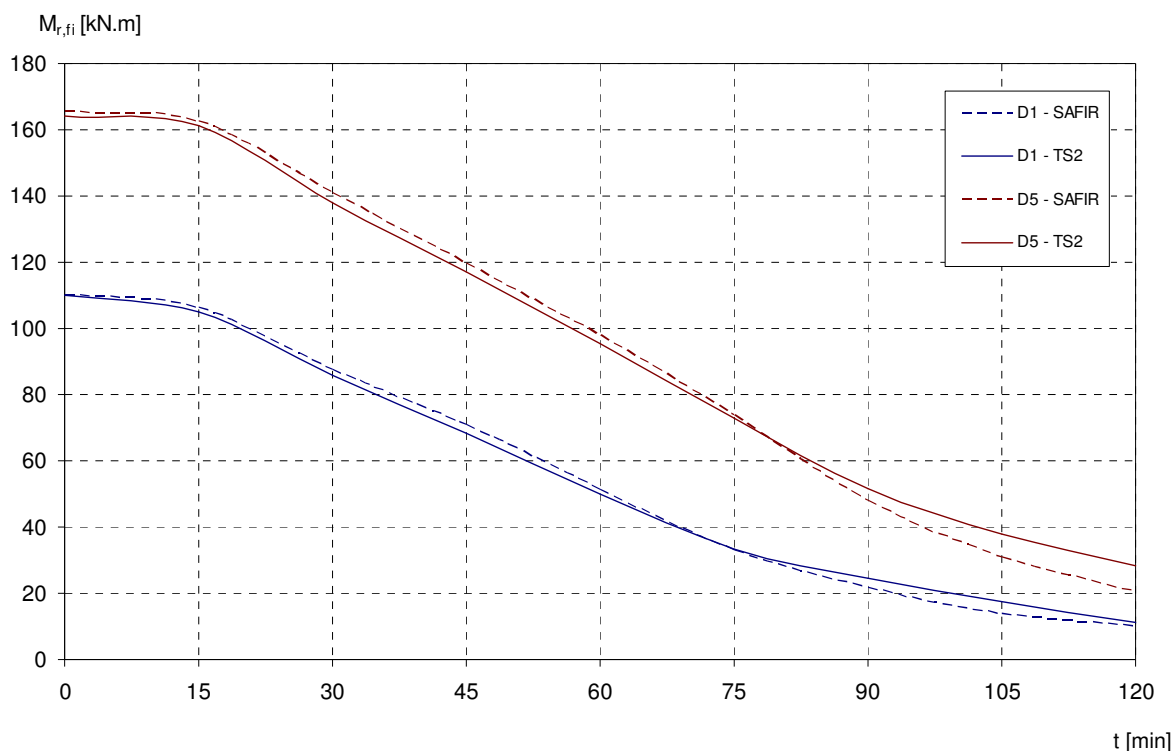


Figura 30 - Momentos resistentes nas secções D1e D5.

A Figura 30 representa a evolução dos momentos resistentes das secções D1 e D5. Estas secções apenas variam no tipo de varão aplicado, ou seja, enquanto na secção D1 foi utilizado varão de 16mm na secção D5 foi de 20mm, sendo que a sua disposição e recobrimento são os mesmos.

De uma análise preliminar das duas secções conclui-se que na secção em que é aplicado varão de diâmetro superior os momentos resistentes serão superiores aos da secção com varões de diâmetro inferior, assim os momentos resistentes da secção D5 serão superiores aos da secção D1.

Através da análise das curvas da Figura 30 é possível comprovar a conclusão preliminar apresentada, uma vez que os momentos resistentes são superiores na secção D5, sendo que tal situação é verificada quer na análise térmica efectuada pelo SAFIR quer pelo TS2.

As curvas obtidas para os momentos resistentes pela análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo TS2 são muito semelhantes para as duas secções.

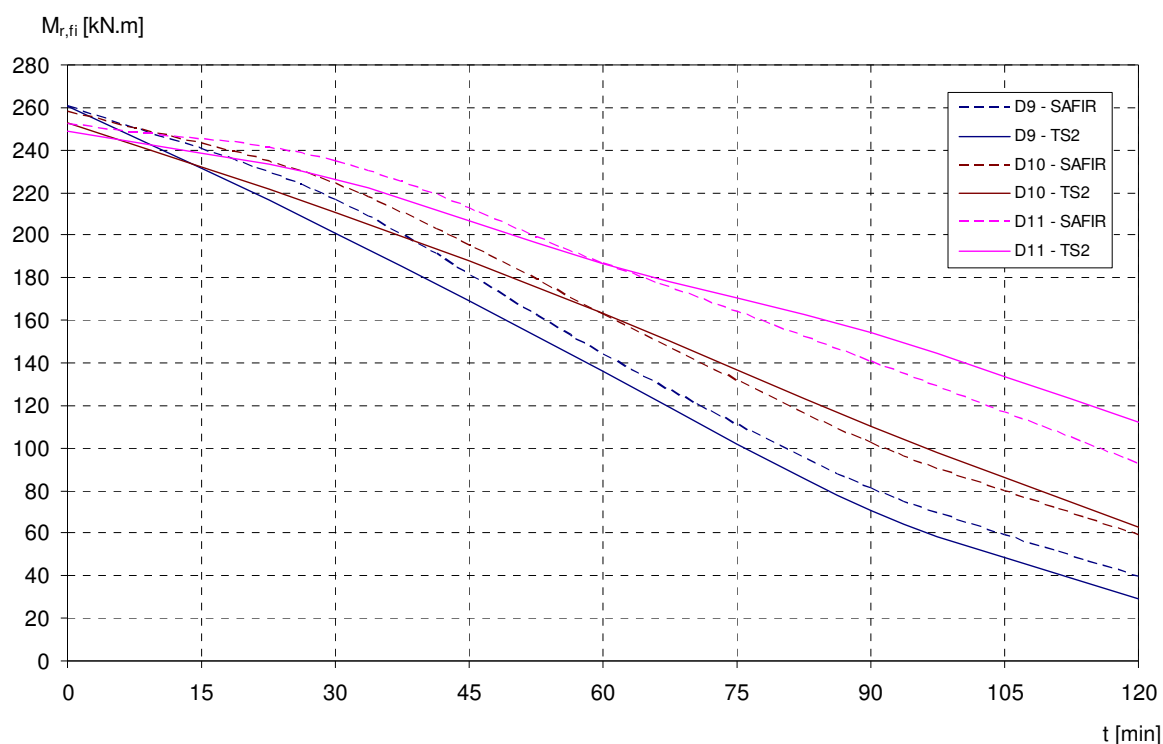


Figura 31 - Momentos resistentes nas secções D9, D10 e D11.

A Figura 31 apresenta a evolução dos momentos resistentes das secções D9, D10 e D11. Estas secções apenas variam no recobrimento, varia entre 2,5 cm e 4cm, enquanto o diâmetro dos varões, o número de varões e a sua disposição são os mesmos.

As secções D9, D10 e D11 apresentam dimensões superiores às secções anteriormente analisadas, assim os valores dos momentos resistentes são superiores aos verificados nas outras secções.

Através da análise das curvas representativas da evolução dos momentos resistentes das secções D9, D10 e D11 obtidos pela análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo método desenvolvido “TS2” verifica-se uma certa semelhança no desenvolvimento das curvas da secção D9, mantendo-se sempre o mesmo desfasamento, enquanto que para as outras secções se verifica um desenvolvimento alternado entre estas, cruzando-se no instante 60 min.

As diferenças observadas entre as curvas dos momentos resistentes quer pela análise térmica efectuada pelo SAFIR quer pelo TS2 deve-se sobretudo às diferenças encontradas entre as temperaturas das fibras posicionadas nas laterais da zona central da secção obtidas quer por um quer por outro método.

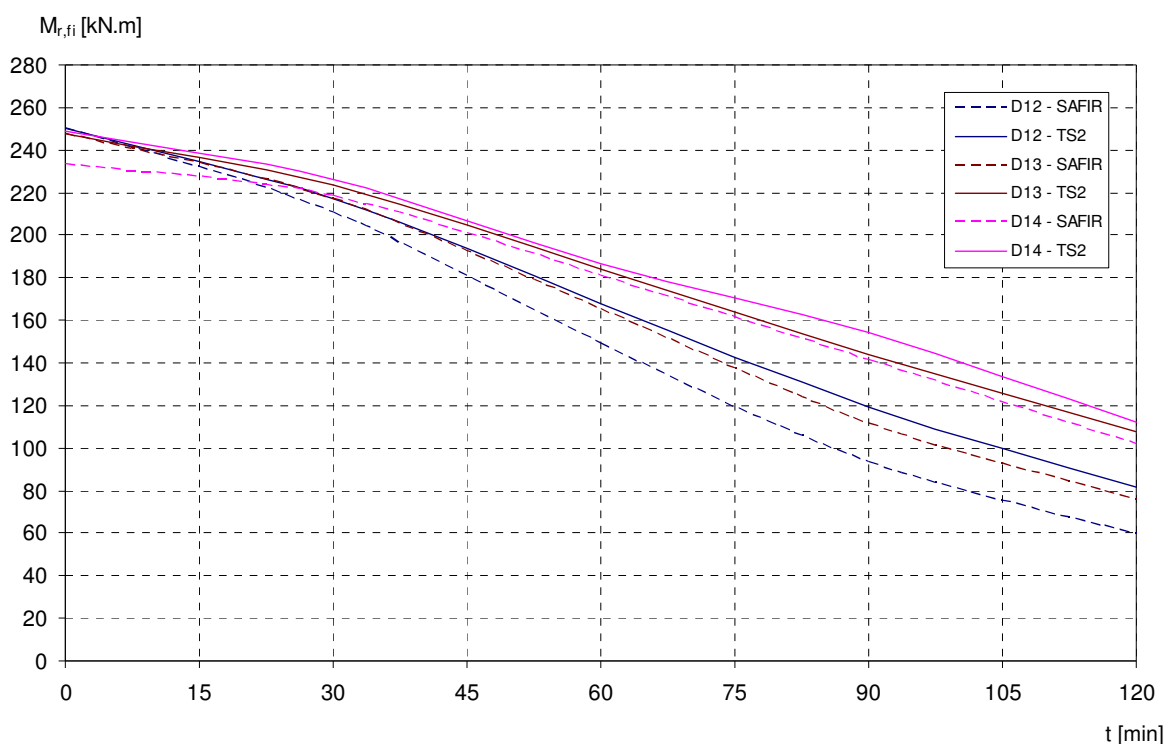


Figura 32 - Momentos resistentes nas secções D12, D13 e D14.

A Figura 32 apresenta a evolução dos momentos resistentes das secções D12, D13 e D14. Estas secções apenas variam no recobrimento, varia entre 2,5 cm e 4cm, enquanto o diâmetro dos varões, o número de varões e a sua disposição são os mesmos.

Pela análise da Figura 32 verifica-se que as curvas dos momentos resistentes obtidas através da análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo TS2 não são tão semelhantes como se verificou nas secções anteriormente apresentadas. As curvas até ao instante 30 min são quase coincidentes contudo a partir desse instante começam a diferir, aumentando sucessivamente a diferença entre elas.

A razão desta diferença reside nas temperaturas obtidas para as fibras da parte superior da secção que apresentam valores ligeiramente diferentes para as duas análises térmicas efectuadas.

Dada a semelhança entre as curvas dos momentos resistentes obtidas pela análise térmica efectuada pelo SAFIR e pela análise térmica efectuada pelo TS2, com excepção das últimas três secções podemos induzir que aplicação do método desenvolvido, TS2, na análise térmica das secções de vigas sujeitas a incêndio padrão ISO 834 se apresenta como uma ferramenta adequada.

4.3.2. ANÁLISE QUANTITATIVA

Da análise efectuada no parágrafo anterior, verifica-se que de uma forma geral o método desenvolvido para a análise térmica de vigas sujeitas a incêndio apresenta bons resultados. Contudo, torna-se necessário conhecer as diferenças de valores entre os momentos obtidos pelos dois métodos. Assim neste parágrafo pretende-se mostrar as diferenças entre os momentos resistentes das curvas apresentadas nos gráficos anteriores.

Nas figuras seguintes apresentam-se os gráficos que comparam os momentos resistentes obtidos através da análise térmica efectuada pelo SAFIR e pelo método desenvolvido TS2, de forma a comprovar a análise efectuada anteriormente.

Os gráficos efectuados para cada uma das secções apresentam a cor laranja a barra referente aos momentos resistentes obtidos através da análise térmica efectuada pelo SAFIR, enquanto a cor azul a barra referente aos momentos resistentes obtidos através da análise térmica efectuada pelo método desenvolvido TS2. Apresenta ainda outra barra, a cor creme, que representa as diferenças entre os momentos resistentes obtidos pelos dois métodos de análise térmica quando as diferenças são não conservativas, ou seja, quando os valores obtidos pelo método desenvolvido TS2 são superiores aos obtidos pelo SAFIR.

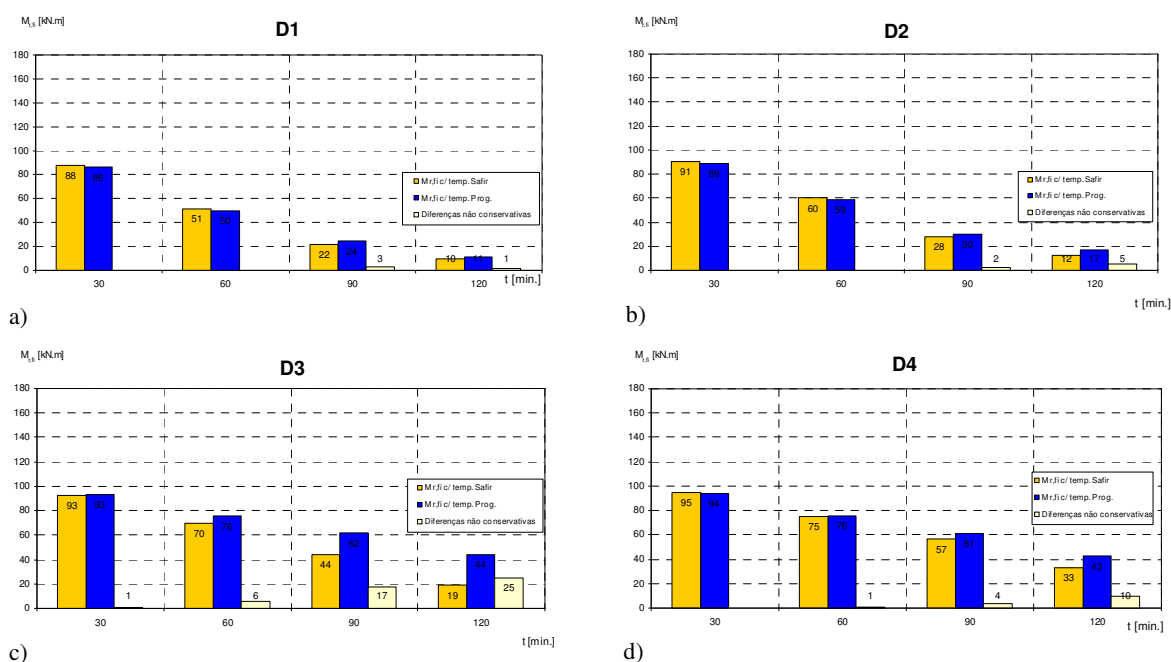


Figura 33 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D1, secção D2, secção D3 e secção D4.

Da análise da Figura 33 verificamos que nas secções D1 e D2 apenas se verificam diferenças não conservativas para os instantes 90 e 120 min, enquanto para as secções D3 e D4 também se verificam diferenças não conservativas no instante 60min.

As diferenças não conservativas apresentadas são muito reduzidas, com excepção da secção D3 em que nos últimos instantes se verificam diferenças superiores a 15 kN.m. Tal situação, deve-se ao facto das temperaturas das fibras obtidas pelo TS2 posicionadas na parte superior da secção apresentarem valores ligeiramente diferentes dos obtidos pelo SAFIR, uma vez que na parte inferior dessa secção esses valores são muito semelhantes.

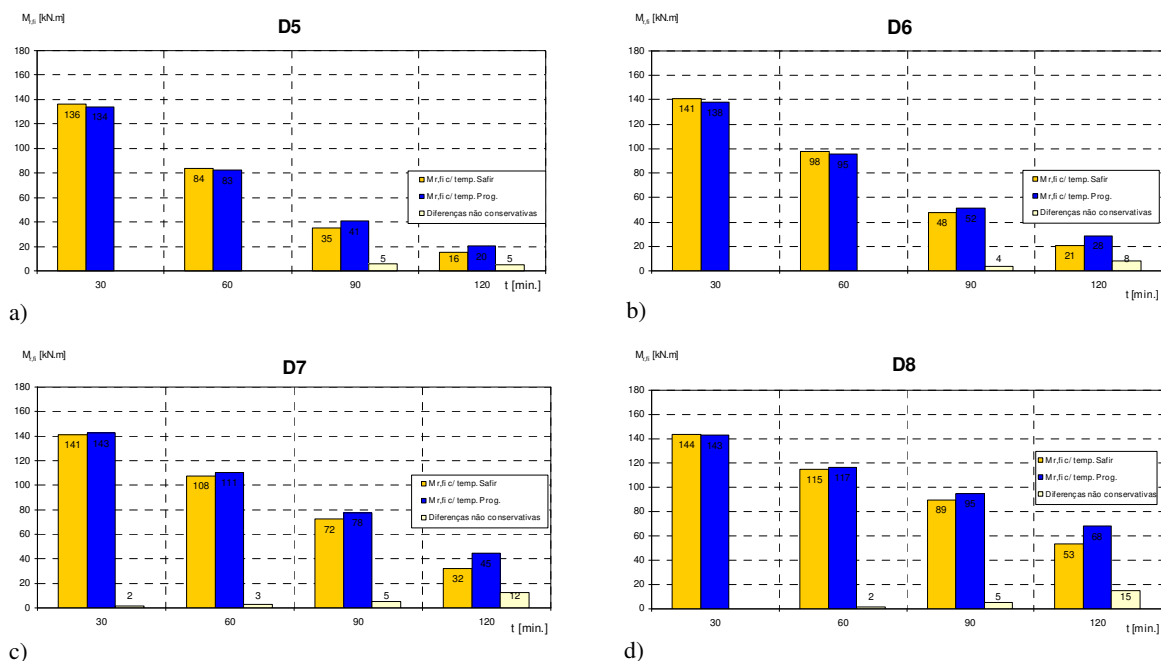


Figura 34 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D5, secção D6, secção D7 e secção D8.

Após análise da Figura 34 verifica-se que a secções D5 e D6 apresentam diferenças não conservativas para os instantes 60 e 90 min, a secção D8 apresenta ainda para o instante 60 min e a secção D7 apresenta para todos os instantes. Contudo, como referido anteriormente, as diferenças não conservativas verificadas são muito pequenas, sendo os valores obtidos para os momentos resistentes quer pela análise térmica efectuada pelo SAFIR quer pelo TS2 muito semelhantes.

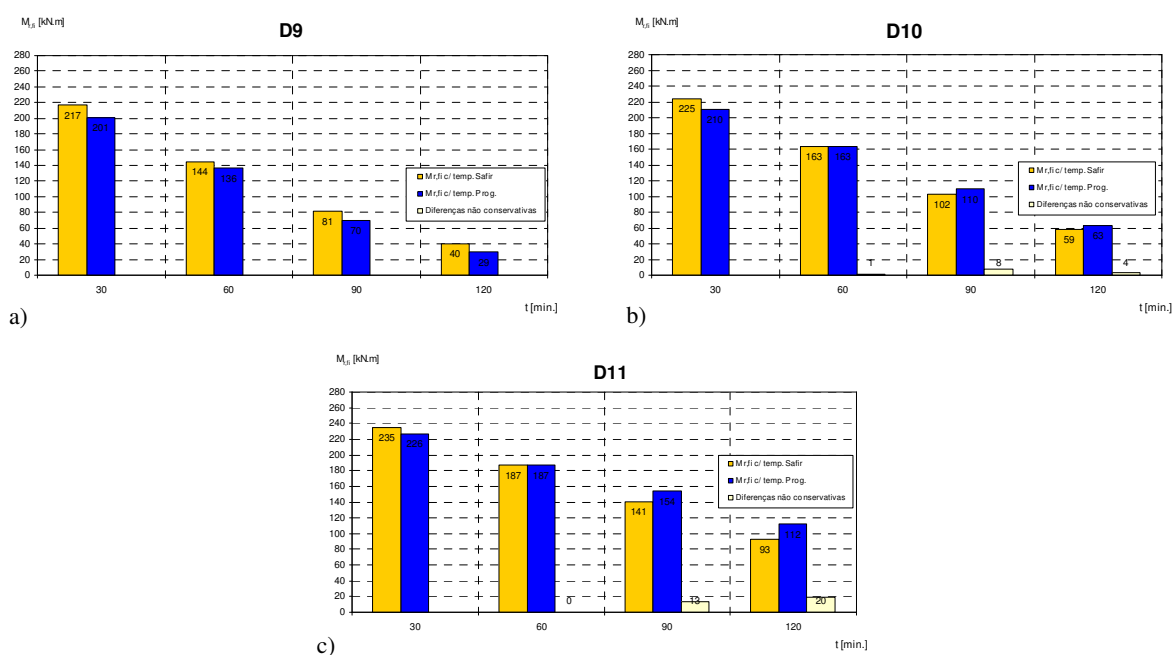


Figura 35 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D9, secção D10 e secção D11.

Da análise da Figura 35 verificamos que na secção D9 não se verificam diferenças não conservativas, ao contrário do que sucede nas secções D10 e D11 em se verificam essas diferenças. Contudo, estas são muito reduzidas, com excepção da secção D11 no instante 120 min. Tal situação deve-se principalmente às diferenças encontradas entre as temperaturas das fibras posicionadas nas laterais da zona central da secção obtidas quer pela análise térmica efectuada pelo SAFIR quer pelo TS2.

No entanto, os valores obtidos para os momentos resistentes através da análise térmica efectuada pelo TS2 quando comparados com os valores obtidos pelo SAFIR são bastante semelhantes.

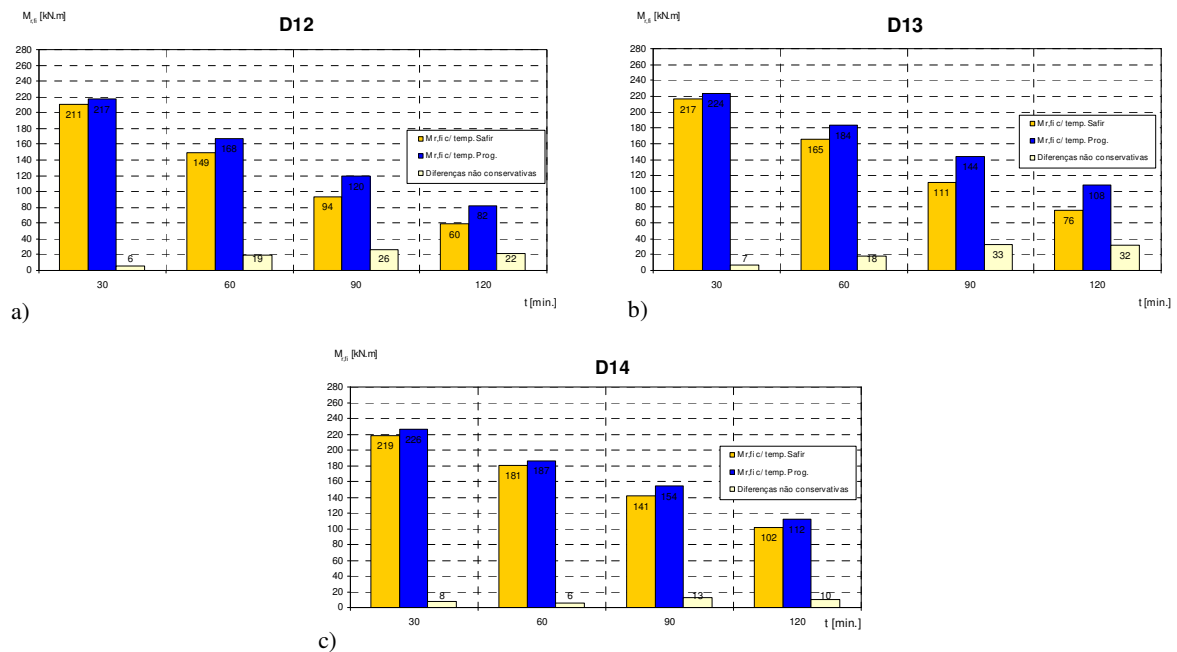


Figura 36 – Momentos resistentes nos instantes 30, 60, 90 e 120min para a: a) secção D12, secção D13 e secção D14.

Após a análise da Figura 36 verificam-se diferenças não conservativas em todas as secções e em todos os instantes ao contrário do que sucedeu nas restantes secções, em que apenas se verificavam de vez em quando diferenças não conservativas para um ou outro instante.

Tal facto deve-se às diferenças encontradas entre as temperaturas das fibras da parte superior da secção obtidas pelo TS2 relativamente às temperaturas obtidas pelo SAFIR.

4.4. CONCLUSÕES

Do estudo efectuada retiram-se as seguintes conclusões:

- Os momentos resistentes obtidos através da análise térmica efectuada pelo método desenvolvido TS2 são de uma forma geral muito semelhantes aos obtidos através da análise térmica efectuada pelo SAFIR;

- Para os instantes 30 e 60 min, os momentos obtidos pelas duas análises térmicas são quase idênticos, com excepção das secções D12, D13 e D14 em que se verifica uma ligeira diferença entre estes;
- A partir do instante 90 min, regista-se uma diferença ligeira entre os momentos resistentes obtidos pelas duas análises térmicas, registando-se apenas uma diferença mais elevada para as secções D12, D13 e D14 tal como acontece nos instantes anteriores;
- Relativamente às secções D12, D13 e D14 há a registar o facto de que para todos os instantes se verificam diferenças não conservativas entre os momentos resistentes obtidos pelos dois métodos;
- A média dos desvios não conservativos entre os momentos resistentes obtidos pelas duas análises térmicas, TS2 e SAFIR, para os casos em estudo é de apenas 17,75%;
- As diferenças entre os momentos resistentes obtidos para todos os casos de estudo com recurso à análise térmica efectuada pelo TS2 relativamente à análise térmica efectuada pelo SAFIR concretizam-se num desvio não conservativo de 11,25%;
- O desvio de 11,25% entre os momentos resistentes obtidos através dos dois métodos de análise térmica permite afirmar que os resultados obtidos pelo método desenvolvido são bastante satisfatórios.

5

CONCLUSÕES

O estudo mostrou que o método desenvolvido, TS2, para a obtenção da análise térmica de vigas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834 apresenta resultantes bastante aceitáveis. Tal afirmação tem como base o facto dos resultados obtidos para os momentos resistentes das 14 secções estudadas apresentarem um desvio não conservativo de apenas 11,25% relativamente aos resultados obtidos com recurso a um método avançado de cálculo, SAFIR.

Deste modo, os objectivos traçados, nomeadamente, “avaliar o comportamento ao fogo de estruturas de betão armado sujeitas a incêndio através de um modelo numérico mais simples que os métodos avançados de cálculo de modo a permitir a sua fácil aplicação na verificação da resistência ao fogo de vigas de betão armado.” foi de certo modo concretizado, uma vez que os resultados obtidos são verdadeiramente satisfatórios.

Apesar dos resultados serem bastante positivos torna-se necessário estudar mais secções de modo a averiguar a eficiência do método desenvolvido e, após esse exercício torna-se essencial aprimorar um pouco mais o método desenvolvido, essencialmente no que se refere ao passo 6, “Criação de uma secção de apoio, a secção ”00”, uma vez que a essência do programa reside fundamentalmente na atribuição das temperaturas da secção de referência “0” obtida através do SAFIR para a secção em estudo.

Após o desenvolvimento do trabalho agora sugerido presume-se que estejamos perante um modelo simplificado bastante eficaz e de fácil aplicação na realização da análise térmica de vigas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Prof. Doutor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues Gonçalves, “*Comportamento ao Fogo de Elementos Estruturais de Betão – Análise Numérica e Metodologia*”, Doutoramento, FEUP.
- [2] European Committee for Standardization, *EN 1992-1-2, (December 2004), “Eurocode 2: Design of Concrete Structures – General Rules - Structural Fire Design”*, English version, Brussels, Belgium.
- [3] Franssen, J.-M., (2005), “*SAFIR: A Thermal/Structural Program for Modeling Structures under Fire*”, The Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Inc.
- [4] Prof. Doutor Álvaro M. F. Azevedo, “*Método dos Elementos Finitos*”, FEUP, 2003.
- [5] European Committee for Standardization, *EN 1991-1-2, (April 2002), “Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-1 and Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire”*, English version, Brussels, Belgium.
- [6] “*Efeito de Altas Temperaturas no Concreto*” - Seminário de Patologia das Edificações, “Novos Materiais e Tecnologias Emergentes”, 2004.
- [7] European Committee for Standardization, *EN 1991-1-2, (April 2002), “Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-1 and Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire”*, English version, Brussels, Belgium.

ANEXOS

ANEXO 1 – PROGRAMA “TS2”

PROGRAM TermSimp1

-
- ! - Cálculo da temperatura para cada uma das fibras da secção !
 - ! de betão armado de forma simplificada através dos dados obtidos d1 !
 - ! prévia da secção tipo "0" 30x30 (B. silicioso) avaliada com o SAFIR !
 - ! e sujeito a incêndio ISO 834 para o instante itime=30,60,90,120,150 !
 - ! 180, 210 e 240 !
 - ! - Determinação da temp. no CG de cada fibra através de um elem. !
 - ! finito virtual de 4 nós correspondente à temp nas 4 fibras vizinhas !
 - ! + próximas do ponto em análise para cada instante. !
 - ! - Leitura da malha de um Ficheiro *.ind com o mínimo conj. de dados !
 - ! - Leitura das malhas e temperaturas das secções de referência "0" !
 - ! Alternativa ainda não feita (tz não necessário) !
 - ! 08x16 0-08.TEM !
 - ! 16x32 0-16.TEM !
 - ! 20x40 0-20.TEM !
 - ! 26x50 0-26.TEM !
 - ! 30x50 0-30.TEM !
 - ! 36x50 0-36.TEM !
 - ! 40x50 0-40.TEM !
 - ! 50x50 0-50.TEM !
 - ! - Cálculo do vector com a posição para cada fibra das 4 fibras + !
 - ! próximas da secção "0" !
 - ! - Cálculo da temperatura para cada fibra e cada instante ITIME !
 - ! Em geral para cada instante 30,60,90,120,150 180, 210 e 240 !
 - ! (ou outro conjunto de instantes dependentes do ficheiro das !
 - ! temperaturas para a secção "0"! !
 - ! - Escrita do ficheiro *.inb (input de SimFIRb) !
 - ! - As fibras são rectangulares e paralelas a z e y !
 - ! MIGUEL CHICHORRO GONÇALVES E DANIEL SOARES - JULHO 2008 !
-

```
parameter mfiber=2000, material=10, mtime=100, mcol=50, mlin=50,
marmad=30
parameter mfiber0=2000, mfiber00=2000
```

```
INTEGER DATE_TIME (8)
```

```
dimension zcol(mcol),ylin(mlin)
dimension iposarm(marmad,2)
dimension centerfiberyz(mfiber,2),area(mfiber)
dimension centerfiberyz0(mfiber0,2),area0(mfiber0)
dimension centerfiberyz00(mfiber00,2)
dimension matfiber(mfiber)
dimension matfiber0(mfiber0)
dimension tempfiber(mfiber,mtime)
dimension tempfiber0(mfiber0,mtime)
dimension tempfiber00(mfiber00,mtime)
```

```
dimension dist(mfiber,mfiber0)
dimension distt(mfiber,mfiber0)
dimension nord(mfiber)
dimension nordd(5,mfiber)
dimension xaxim(mfiber)
dimension xaximo(5)
```

```
dimension z1(4),y1(4),z2(4),y2(4),z3(4),y3(4),z(4),y(4)
```

13_ TS2

```

dimension t1(4),t(4)
dimension yloc1(1),yloc2(1),ylox1(1),ylox2(1)

!
! dimension ltime(mtime)
!
! dimension cfilename(70)
! dimension cmat(material)
! dimension cquoi(10)
!
! character cfilename,cquoi,cfile*80
! character cmat*10
! character cloc*10,cvide
! CHARACTER*80 CLIGNE
! character commande*10
!
! CHARACTER (LEN = 12) CLOCK(3)
!
!
!++ Atribuição de valores às variáveis
!
!   cvide = '           '
!
!   centerfiberyz=0.
!   centerfiberyz0=0.
!       area=0.
!   tempfiber=20.
!   tempfiber0=0.
!
!   rlixo=0.
!
!   matfiber=1           ! por defeito 1=betão
!                       ! a detecção da armadura dará 2 = aço
!
!-----!
!+++ LECTURE DU NOM DE FICHER DE DONNEE
!   OUVERTURE DE CES FICHIERS
!-----!
!
!   WRITE(*,*)
!   35 WRITE(*,629)
!   629 format(' Term-Simpl version 2008 is running.'/ &
!           ' Please type "FILENAME" of "d1.IND" : ')
!   READ(*,719) (cfilename(i),i=1,70)
!   719 format(70a1)
!
!+++ Comprimento do nome de base'
!
!   DO 2 I=70,1,-1
!       IF (cfilename(I).NE.' ') GOTO 3
!   2 CONTINUE
!   3 ILENGTHFILENAME = I
!
!+++ Atribuição do nome completo para o ficheiro de dados
!   Canal 11 (*.IND)
!
!
!   write(*,'(2a1)')(cfilename(i),i=1,ILENGTHFILENAME)
!
!   CALL nafile(cfilename,ILENGTHFILENAME,'.IND',4,CFILE)
!
!   write(*,'(a1)')cfile
!
!

```

```

!                                     13_ TS2
!      if ((cfile.eq.'EXIT.IND').or.(cfile.eq.'exit.ind')) stop
!
!      OPEN (11,FILE='d.IND',STATUS='OLD',ERR=900)
!      go to 36
!
! 900 WRITE(*,*)'ERROR IN THE OPENING OF ',cfilename
!      write(*,*)'It seems as if this file is not present.'
!      write(*,*)'Type the file name again, or type EXIT to stop Term-Simplif.'
!
!      stop
!      go to 35
!
! 901 WRITE(*,*)'ERROR IN THE OPENING OF ',cfilename,' ON UNIT 12.'
!      STOP
! 903 WRITE(*,*)'ERROR IN THE OPENING OF ',cfilename,' ON UNIT 13.'
!      STOP
! 905 WRITE(*,*)'ERROR IN THE OPENING OF ',cfilename,' ON UNIT 14.'
!      STOP

```

```

!+++ Canal 12 (*.inn) - Ficheiro de dados com a temperatura da Secção de
referência 30x30 "0"

```

Obtida previamente com SAFIR

```

!      36 continue
!      36 CALL nfile(cfilename,ILENGTHFILENAME,'.inn',4,CFILE)
!
!      OPEN (12,FILE='0.INN',STATUS='UNKNOWN',ERR=901)
!
!
!

```

```

!+++ Canal 13 (*.ioi) - Ficheiro de resultados parcial do ficheiro *.INB para
correr
!                                     com SimFIRb (faltam linhas iniciais e finais) Contém
Fibras e temperaturas ...

```

```

!      CALL nfile(cfilename,ILENGTHFILENAME,'.ioi',4,CFILE)
!
!      OPEN (13,FILE='d.ioi',STATUS='UNKNOWN',ERR=903)
!
!

```

```

!+++ Canal 14 (*.TMP) - Ficheiro de resultados temporário para controlo dos
cálculos
!                                     deste programa

```

```

!      CALL nfile(cfilename,ILENGTHFILENAME,'.tmp',4,CFILE)
!
!      OPEN (14,FILE='d.tmp',STATUS='UNKNOWN',ERR=905)
!
!

```

```

!-----!
! IMPRESSION DU FICHIER DE DONNEE DANS LE FICHIER DE RESULTAT TMP !
!-----!

```

```

!      write(14,2000)
!      2000 format(//          &
!
!      '
!      '
!      '
!      '
!      '
!      '
!

```

```

*****'/'&
*Term-Simpl*'/'&
* 2008 *'/'&
* * *'/'&
* * *'/'&
* * *'/'&
**'/'&

```

3ágina p

13_ TS2 '///
'

```
!
!
! write(14,2003)
2003 format('PROGRAM ''Term-Simpl'' ver. 2008, Junho. 2008', /, &
& '=====', /, /, &
& 'By Miguel Chichorro Gonçalves E Daniel Soares', /, &
& 'Univ. of Porto.', /, &
& 'telm. + 351 918551587', /, &
& 'tel. int. + 351 225082116', /, &
& 'fax 225081940', /, &
& 'E-mail: miguelcg@fe.up.pt', /)
!
!
! CALL DATE_AND_TIME (CLOCK(1), CLOCK(2), CLOCK(3), DATE_TIME)
! write(14,2008) date_time(3), date_time(2), date_time(1), date_time(5),
date_time(6), date_time(7)
2008 format(/, 'DATE OF THIS RUN : ', i2, '-', i2, '-', i4, /, &
& 'TIME OF THIS RUN : ', i2, ':', i2, ':', i2, /)
!
!
!-----!
! LECTURE DES Fichiers des donnees !
!-----!
!
!++ *.IND
!
! WRITE(14,16)
16 FORMAT('DESCRIPTION OF THE PROBLEM.' / &
& '=====' /)
!
!
!++ LECTURE DES caracteristiques des fibres au filename.IND
!
!
! read(11,'(a)')cligne
! read(11,*)ncol,nlin
! write(14,1001)ncol,nlin
1001 format(2x,i7,2x,i7)
1011 format(50(1x,e12.4))
!
! read(11,'(a)')cligne
! read(11,*)(zcol(i),i=1,ncol+1)
! write(14,'(a)')cligne
! write(14,1011)(zcol(i),i=1,ncol+1)
!
!
! read(11,'(a)')cligne
! read(11,*)(ylin(i),i=1,nlin+1)
! write(14,'(a)')cligne
! write(14,1011)(ylin(i),i=1,nlin+1)
!
!
! read(11,'(a)')cligne
! read(11,*)narmad
! write(14,'(a)')cligne
! write(14,1001)narmad
!
!
! read(11,'(a)')cligne
! do 22 i=1,narmad
! read(11,*)(iposarm(i,j),j=1,2)
! write(14,*)(iposarm(i,j),j=1,2)
22 continue
!
! close (11)
```

```

!
!
!++ *.inn - Leitura das temperaturas da secção "0"
!
!
!      read(12,1003)commande
! 1003  format(A10)
!
!      nfiber=ncol*nlin
!
!      read(12,1004)commande,nfiber0
!      write(13,1006)commande,nfiber
!      write(14,1006)commande,nfiber0
1004  format(2x,A11,i7)
1006  format(2x,A11,i7)
!
!
!      read(12,'(a)')cligne
!      write(13,'(a)')cligne
!      write(14,'(a)')cligne
!      read(12,1010)commande,y0,z0
!      write(13,1010)commande,y0,z0
!      write(14,1010)commande,y0,z0
!      read(12,1010)commande,yc,zc
!      write(13,1010)commande,yc,zc
!      write(14,1010)commande,yc,zc
1010  format(A10,2e12.4)
!
!
!      do 100 ifiber0=1,nfiber0
!          read(12,1020)(centerfiberyz0(ifiber0,i),i=1,2), &
!                  area0(ifiber0), matfiber0(ifiber0), rlixo
!          write(14,1020)(centerfiberyz0(ifiber0,i),i=1,2), &
!                  area0(ifiber0), matfiber0(ifiber0), rlixo
100  continue
1020  format(3e14.6,i4,e14.6)
!
!      read(12,'(a)')cligne
!      write(14,'(a)')cligne
!
!      read(12,'(a)')cligne
!      write(14,'(a)')cligne
!
!      itime=0
111  itime=itime+1
!
!      read(12,*,end=999)commande,jtime
!      ltime(itime)=jtime/60
!      write(14,*)commande,ltime(itime),' Minutos'
!      read(12,'(a)')cligne
!      write(14,'(a)')cligne
!
!      do 130 ifiber0=1,nfiber0
!          read(12,3003)lfiber0,tempfiber0(lfiber0,itime)
!          write(14,3003)lfiber0,tempfiber0(lfiber0,itime)
130  continue
!
!      go to 111
!
! 3003  format(i5,f7.1)
!
! 999  continue
!
!      ntime=itime-1
!
!
!
!++ Criação dos vectores das fibras da secção em estudo centerfiberyz(i,j)  i=

```

```

fibra n                                     matfiber(ifiber)      j=1
!--> y do CG                                area(ifiber)        j=2
!--> z do CG                                tempfiber(ifiber,itime)
!
!
matfiber=1
ifiber=0
do 200 j=1,nlin
    do 210 i=1,ncol
        ifiber=ifiber+1
        centerfiberyz(ifiber,2)=(zcol(i)+zcol(i+1))/2.
        centerfiberyz(ifiber,1)=(ylin(j)+ylin(j+1))/2.
        area(ifiber)=(-zcol(i)+zcol(i+1))*(-ylin(j)+ylin(j+1))
!
        do 220 k=1,narmad
if((((iposarm(k,2)-1)*ncol+iposarm(k,1)).eq.ifiber)then
            matfiber(ifiber)=2
            go to 222
        endif
220         continue
222         continue
        write(13,1020)(centerfiberyz(ifiber,k),k=1,2), &
                    area(ifiber),matfiber(ifiber),rlixo
210         continue
200     continue
!
!++ Criação da secção '00' que tem as dimensões da secção em estudo mas fibras
com 1cm de lado
! e as temperaturas correspondentes à secção '0' mas completa (sem simetria)
!
zmax00=zcol(ncol+1)
ymax00=ylin(nlin+1)
ncol00=zmax00*100
nlin00=ymax00*100
nfiber00=ncol00*nlin00
!
ifiber00=0
!+ Montagem fibras da secção 00
!
do 340 i=1,nlin00
    xi=i
    do 350 j=1,ncol00
        xj=j
        ifiber00=ifiber00+1
        centerfiberyz00(ifiber00,1)=xi/100-.005
        centerfiberyz00(ifiber00,2)=xj/100-.005
350     continue
340     continue
!+ Atribuição de temperaturas da secção 0 à secção 00
!
ncol002=ncol00/2
nlin002=nlin00/2
!
do 355 itime=1,ntime

```

```

!+ 1º 1/4 de secção 00
!
      do 360 i=1,nlin002
        do 370 j=1,ncol002
!
          ifiber00=(i-1)*ncol00+j
!++
          ifiber0=(i-1)*25+j
!
          tempfiber00(ifiber00,itime)=tempfiber00(ifiber0,itime)
!
      370      continue
      360      continue
!
!+ 2º 1/4 de secção 00
!
      do 380 i=1,nlin002
        k=0
        do 390 j=ncol002+1,ncol00
!
          ifiber00=(i-1)*ncol00+j
!++
          ifiber0=(i-1)*25+j
!
          k=k+1
          kk=(k-1)*2+1
          jfiber00=(i-1)*ncol00+j-kk
tempfiber00(ifiber00,itime)=tempfiber00(jfiber00,itime)
!
      390      continue
      380      continue
!
!+ 3º 1/2 secção 00 superior
!
!
      do 395 i=nlin002+1,nlin00
        do 397 j=1,ncol00
          ifiber00=(i-1)*ncol00+j
          kfiber00=(nlin002-1)*ncol00+j
!
tempfiber00(ifiber00,itime)=tempfiber00(kfiber00,itime)
!
      397      continue
      395      continue
!
!
      write(14,*)' IITIME = ',itime
      write(14,*)' IFIBER Y Z TEMPFIBER00'
      do 133 ifiber00=1,nfiber00
write(14,*)ifiber00,centerfiberyz00(ifiber00,1),centerfiberyz00(ifiber00,2),temp
fiber00(ifiber00,itime)
      133      continue
!
!
      355      continue
!
!
!++ Identificação das 4 fibras da secção "00" que estão + próximas da fibra em
estudo
!
      write(14,*)' DIST '
      do 300 i=1,nfiber
!
        write(14,*)' Fibra i= ',i

```

13_ TS2

```

!
!               do 300 j=1,nfiber00
!               dist(i,j)=sqrt((centerfiberyz(i,1)-centerfiberyz00(j,1))**2+ &
!               (centerfiberyz(i,2)-centerfiberyz00(j,2))**2)
!               write(14,*)j,dist(i,j)
300      continue
!
!
!
!*** NORD - Atribuição das 4 posições correspondentes aos menores valores
!       de uma matriz
!
!* Pq as matrizes têm zeros para além da parte utilizada: =1000.
!
!       do 308 i=1,mfiber
!           do 309 j=nfiber00+1,mfiber00
!               dist(i,j)=1000.
309      continue
308      continue
!
!       do 318 i=nfiber+1,mfiber
!           do 319 j=1,nfiber00
!               dist(i,j)=1000.
319      continue
318      continue
!
!* Define as 5 fibras + perto (depois é preciso filtrar e ter 2 em cima e duas
em baixo)
!
!       write(14,*)
!
!       do 305 k=1,5
!
!           nord=minloc(dist,DIM=2)
!           do 315 i=1,nfiber
!               nordd(k,i)=nord(i)
315      continue
!
!
!       xaxim=maxval(dist,DIM=2)
!
!       write(14,*)k
!       write(14,*)' NORD xAXIM (ifiber)'
!       do 316 i=1,nfiber
!           write(14,*)i,nord(i),xaxim(i)
316      continue
!
!       do 310 i=1,nfiber
!           dist(i,nord(i))=xaxim(i)
310      continue
305      continue
!
!
!       write(14,*)' NORDD '
!       write(14,*)' Fibra, nordd i=1,5 '
!       do 320 j=1,nfiber
!           write(14,*)j,(nordd(i,j),i=1,5)
320      continue
!
!* Filtrar as 4 posições!
!
!       do 322 j=1,nfiber
!
!           nn1=nordd(1,j)
!
!           if(nordd(2,j).eq.nn1+1.or.nordd(2,j).eq.nn1-1)then
!               n=1
!           else

```

```

13_ TS2
        if(norodd(3,j).eq.nn1+1.or.norodd(3,j).eq.nn1-1)then
            nn3=norodd(2,j)
            norodd(2,j)=norodd(3,j)
            norodd(3,j)=nn3
        else
            if(norodd(4,j).eq.nn1+1.or.norodd(4,j).eq.nn1-1)then
                nn4=norodd(2,j)
                norodd(2,j)=norodd(4,j)
                norodd(4,j)=nn4
            else
                write(14,*)' Problema com a fibra ',j,' com a
posição 2'
            endif
        endif
    endif
!
!    nn3=norodd(3,j)
!
!    if(nn3.eq.nn1+1.or.nn3.eq.nn1+2.or.nn3.eq.nn1-1.or.nn3.eq.nn1-2)then
!        norodd(3,j)=norodd(4,j)
!        norodd(4,j)=nn3
!        nn3=norodd(3,j)
!        write(14,*)' Ifiber= ',j,'norodd(3)=
',norodd(3,j),'norodd(4)= ',norodd(4,j)
!    endif
!
!        if(norodd(4,j).eq.nn3+1.or.norodd(4,j).eq.nn3-1)then
!            n=1
!        else
!            if(norodd(5,j).eq.nn3+1.or.norodd(5,j).eq.nn3-1)then
!                norodd(4,j)=norodd(5,j)
!            else
!                write(14,*)' Problema com a fibra ',j,' com a posição
4'
!
!                if(norodd(2,j).eq.nn1+1)then
!                    norodd(4,j)=norodd(3,j)+1
!                else
!                    norodd(4,j)=norodd(3,j)-1
!                endif
!
!            endif
!        endif
!!
!!
322 continue
!
!    write(14,*)' NORDD '
!    write(14,*)' Fibra, norodd i=1,4 '
!    do 324 k=1,nfiber
!        write(14,*)k,(norodd(i,k),i=1,4)
324 continue
!
!
!++ Aplicação do elemento finito para cálculo da temperatura da fibra em estudo
! para cada instante 30,60,90,120,150 180, 210 e 240 (ou outro conjunto de
! instantes dependentes do
! ficheiro das temperaturas para a secção "0" !
!
!    do 907 itime=1,ntime
!        write(14,*)' Itime= ',itime
!        do 500 i=1,nfiber
!
!+ Pôr as 4 fibras por ordem! (esq/inf dir/inf dir/sup esq/sup)
!
!
!        z1(1)=centerfiberyz00(norodd(1,i),2)

```

```

                                13_ TS2
                                y1(1)=centerfiberyz00(nordd(1,i),1)
                                z1(2)=centerfiberyz00(nordd(2,i),2)
                                y1(2)=centerfiberyz00(nordd(2,i),1)
                                z1(3)=centerfiberyz00(nordd(3,i),2)
                                y1(3)=centerfiberyz00(nordd(3,i),1)
                                z1(4)=centerfiberyz00(nordd(4,i),2)
                                y1(4)=centerfiberyz00(nordd(4,i),1)
!
!+ Preparação da ordem nas temperaturas
!
                                t1(1)=tempfiber00(nordd(1,i),itime)
                                t1(2)=tempfiber00(nordd(2,i),itime)
                                t1(3)=tempfiber00(nordd(3,i),itime)
                                t1(4)=tempfiber00(nordd(4,i),itime)
!
!4nos2.f90
!
!
!
                                write(14,*)' Fibra= ',i
                                write(14,*)' z1,y1,t1 (i=1,4) '
                                write(14,*)(z1(j),y1(j),t1(j),j=1,4)
!
                                z2=z1
                                y2=y1
                                z3=z1
                                y3=y1
                                z=0.
                                y=0.
                                t=0.
!
!+ Por os nós por ordem
!
                                ymax=maxval(y1)
                                ymin1=minval(y1)
                                yloc1=minloc(y1)
!
                                y1(yloc1(1))=ymax
!
                                ymin2=minval(y1)
                                yloc2=minloc(y1)
!
                                if(z2(yloc1(1)).lt.z2(yloc2(1)))then
                                    z(1)=z2(yloc1(1))
                                    y(1)=y2(yloc1(1))
                                    z(2)=z2(yloc2(1))
                                    y(2)=y2(yloc2(1))
                                    t(1)=t1(yloc1(1))
                                    t(2)=t1(yloc2(1))
                                else
                                    z(1)=z2(yloc2(1))
                                    y(1)=y2(yloc2(1))
                                    z(2)=z2(yloc1(1))
                                    y(2)=y2(yloc1(1))
                                    t(1)=t1(yloc2(1))
                                    t(2)=t1(yloc1(1))
                                endif
!
                                ymin=minval(y2)
                                ymax1=maxval(y2)
                                ylox1=maxloc(y2)
!
                                y2(ylox1(1))=ymin
!
                                ymax2=maxval(y2)
                                ylox2=maxloc(y2)
!
!

```

```

                                13_ TS2
if(z3(ylox1(1)).lt.z3(ylox2(1)))then
    z(4)=z3(ylox1(1))
    y(4)=y3(ylox1(1))
    z(3)=z3(ylox2(1))
    y(3)=y3(ylox2(1))
    t(4)=t1(ylox1(1))
    t(3)=t1(ylox2(1))
else
    z(4)=z3(ylox2(1))
    y(4)=y3(ylox2(1))
    z(3)=z3(ylox1(1))
    y(3)=y3(ylox1(1))
    t(4)=t1(ylox2(1))
    t(3)=t1(ylox1(1))
endif
!
    write(14,*)'POR ORDEM z,y,t (i=1,4) '
    write(14,*)(z(j),y(j),t(j),j=1,4)
!
!+ Elemento finito de 4 nós isoparamétrico
!
    XL1=z(2)-z(1)
    XL2=y(4)-y(1)
!
    zz=-(z(1)+XL1/2.-centerfiberyz(i,2))
    yy=-(y(1)+XL2/2.-centerfiberyz(i,1))
!
    XN1=1./XL1/XL2*(XL1/2.-zz)*(XL2/2.-yy)
    XN2=1./XL1/XL2*(XL1/2.+zz)*(XL2/2.-yy)
    XN3=1./XL1/XL2*(XL1/2.+zz)*(XL2/2.+yy)
    XN4=1./XL1/XL2*(XL1/2.-zz)*(XL2/2.+yy)
!
!
!
    tempfiber(i,itime)=XN1*t(1)+XN2*t(2)+XN3*t(3)+XN4*t(4)
!
    write(14,*)' XL1 XL2 zz yy XN1 XN2 XN3 XN4 TEMPFIBER '
    write(14,*)XL1,XL2,zz,yy,XN1,XN2,XN3,XN4,tempfiber(i,itime)
!
!
500    continue
907    continue
!
!++ Escrita da temperatura de cada fibra para cada instante
!
    do 112 itime=1,ntime
!
!
        write(13,'(a)')cligne
        write(14,'(a)')cligne
        write(13,*)commande,ltime(itime),' Minutos'
        write(14,*)commande,ltime(itime),' Minutos'
        write(13,'(a)')cligne
        write(14,'(a)')cligne
!
        do 135 ifiber=1,nfiber
            write(13,3003)ifiber,tempfiber(ifiber,itime)
            write(14,3003)ifiber,tempfiber(ifiber,itime)
135        continue
!
112    continue
!
!++
!
    close (11)
    close (12)
    close (13)

```

```
13_ TS2
close (14)
!
!
stop
end
!
```

ANEXO 2 – EXEMPLO DO FICHEIRO “0.in”

15 - 30x60-1
 30x60-1 "Caso 30x60" com elementos c 1cm de lado
 beam concrete section - Thermal Analysis
 Just concrete

```

    NPTTOT      3500
    NNODE      1891
    NDIM        2
    NDIMMATER    1
    NDDLMAX      1
    FROM        1   TO 1891 STEP    1 NDDL    1
END_NDDL
    TEMPERAT
    TETA        0.9
    TINITIAL    20.0
    MAKE.TEM
    LARGEUR11   400000
    LARGEUR12   10000
    NOENUM
30x60-1.tem
    NMAT        1
    ELEMENTS
    SOLID       1800
    NG          2
    NVOID       0
END_ELEM
    NODES
    NODE        1      0.0000      0.00
    GNODE       31      0.0000      0.3
    REPEAT      31      0.0100      0.00      60
    NODELINE
    YC_ZC       0.      0.      0.
    FIXATIONS
END_FIX
    NODOFSOLID
    ELEM        1      1      2      33      32      1      0.
    GELEM       30      30      31      62      61      1      0.      1
    REPEAT      30      31
    FRONTIER
F      1      FISO      NO      NO      NO
GF     15      FISO      NO      NO      NO      NO      1
F      1      NO      NO      NO      FISO
GF     736     NO      NO      NO      FISO      15
END_FRONT
    SYMMETRY
END_SYM
    PRECISION   1.E-3
    MATERIALS
    SILCONCEC2
    TIME        46.      25.      9.      .56
    TIME        60.      14400.
END_TIME
    IMPRESSION
    TIMEPRINT   900.
  
```


ANEXO 3 – EXEMPLO DO FICHEIRO “d1.ind”

18 _ d1

```
NCOL NLIN
14 16
NCOL+1 valores com coordenadas z
0.0000 0.0100 0.0200 0.0250 0.03918 0.070273 0.084453 0.10
0.115547 0.129727 0.16082 0.175 0.18 0.19 0.20
NLIN+1 valores com coordenadas y
0.0 0.0100 0.02 0.025 0.03918 0.05 0.10 0.15 0.20
0.25 0.30 0.35 0.36082 0.375 0.38 0.39 0.40
Nº de VARÕES
6
POSICÃO dos VARÕES (ncol-nlinha)
4 4
6 4
9 4
11 4
4 13
11 13
```