



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise Térmica de Secções de Betão Armado Submetidas ao Fogo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Mecânica Estrutural.

Autor

Carlos Alberto Pessoa Albino

Orientadoras

Carla Maria Araújo Fernandes Costa Ferreira

Maria Helena Freitas Melão Barros

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

Coimbra, Janeiro de 2012

AGRADECIMENTOS

Sozinho, jamais conseguiria desenvolver este trabalho. Foi com a ajuda de muitas pessoas – umas pelos conhecimentos transmitidos, outras pelo apoio moral – que ultrapassei este desafio.

Agradeço aos meus pais, os principais impulsionadores da minha caminhada académica. Sem o seu apoio jamais teria chegado aqui.

Agradeço à minha filha, Leonor, o tempo que disponibilizou para que eu pudesse realizar este trabalho no prazo que defini.

Agradeço à minha namorada, Susana, a tolerância e a paciência com que me deixou trabalhar, particularmente nas noites que passei em frente ao computador, no desenvolvimento do programa de cálculo “Fire Analysis System” e enquanto escrevia este documento.

Agradeço aos meus colegas de curso pelo apoio e pelo incentivo que sempre me deram. Aqui, deixo um agradecimento especial ao Ricardo Dias, pela força que dava e pela disponibilidade demonstrada que, sei muito bem, ia para além das palavras.

Agradeço às minhas orientadoras, Professora Doutora Carla Maria Araújo Fernandes Costa Ferreira e Professora Doutora Maria Helena Freitas Melão Barros, pela disponibilidade, pela dedicação e pela simpatia demonstrada ao longo destes últimos meses.

Finalmente, quero agradecer ao Professor Daniel Dias da Costa a prontidão e disponibilidade demonstrada quando solicitado. Quero evidenciar, acima de tudo, a sua capacidade de tornar muito claro aquilo que a minha mente, de uma forma obstinada, insistia em tornar obscuro.

“A Descoberta consiste em
ver o que todos viram
e em pensar no que
ninguém pensou.”

Albert Szent-Györgyi

RESUMO

O Eurocódigo 2 (EC2), na sua Parte 1-2, fornece os modelos e as regras para o cálculo de estruturas em situação de incêndio, nomeadamente as leis constitutivas do betão e do aço sob temperaturas elevadas. As propriedades térmicas, designadamente as curvas de extensão, calor específico e resistência característica em função da temperatura estão estabelecidas na mesma norma, que distingue os betões constituídos por agregados siliciosos e os constituídos por agregados calcários. Distinção essa apenas e só existente na aplicação das propriedades enumeradas anteriormente: diretamente na extensão térmica e na resistência característica, e indiretamente no calor específico através da aplicação do calor específico volúmico que leva em conta a massa volúmica do agregado. Apesar de, contudo, as propriedades mecânicas do betão dependerem fundamentalmente do tipo de agregado usado.

O conhecimento da distribuição das temperaturas numa peça de betão é a base para a determinação da sua resistência em situação de incêndio. O Anexo A apresenta alguns perfis de temperatura numa laje com 0,20 m de espessura, 4 secções de vigas e 2 pilares, um de secção quadrada e outro circular. As isotérmicas do Anexo A limitam-se a 1, 3 ou 4 instantes de tempo (30, 60, 90 ou 120 minutos) e foram calculadas admitindo apenas o limite inferior da condutibilidade térmica do betão e um teor de água de 1,5 %. Contudo, o Anexo Nacional português desta norma estipula o limite superior da condutibilidade térmica do betão como propenso a ser adotado para betões de massa volúmica normal ou betões de alta resistência, apropriando o uso dos perfis indicados no Anexo A aos betões leves.

O objetivo desta tese é desenvolver um programa de cálculo de simples utilização, com entrada de dados e análise de resultados interativas, para projetistas, que forneça a distribuição de temperaturas em qualquer secção e instante de tempo, e com a possibilidade de opção por outras propriedades térmicas, nomeadamente calor específico, teor de água e condutibilidade.

ABSTRACT

Eurocode 2 (EC2) provides the models and rules for the design of structures under fire, namely the constitutive laws for concrete and steel at elevated temperatures. The thermal properties, including extension curves, specific heat and resistance versus temperature characteristic are established on EC2, which distinguishes between concrete made of siliceous or calcareous aggregates. This distinction only exists in the application of the properties listed above: directly on the thermal elongation and characteristic strength of concrete, and indirectly the specific heat through the application of the volumetric specific heat that takes into account the density of the aggregate. Although, however, the mechanical properties of concrete depend fundamentally on the type of aggregate used in its composition.

The knowledge of temperature distribution in a piece of concrete is the basis for determining its strength under fire. Annex A provides some temperature profiles in a slab of 0.20 m thickness, four sections of beams and two pillars, a square section and another circular. The isotherms of Annex A are limited to 1, 3 or 4 time instants (30, 60, 90 or 120 minutes) and were calculated assuming only the lower limit of the thermal conductivity of concrete and a moisture content of 1,5 %. However, the Portuguese national annex of this standard requires the upper limit of thermal conductivity of concrete as likely to be adopted for normal density concrete or high strength concrete, appropriating the use of the temperature profiles specified in the Annex A to the lightweight concrete.

The purpose of this thesis is to develop a calculation program easy to use, with interactive data entry and analysis of results, for designers, providing the temperature distribution in any section and instant of time, and the possibility of opting for other thermal properties, including specific heat, moisture content and conductivity.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Generalidades.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.3 Estruturação da tese.....	15
2 ESTADO DA ARTE.....	16
2.1 Introdução	16
2.2 Enquadramento histórico	16
2.3 Introdução aos métodos de análise numérica	17
2.4 Os métodos numéricos na análise do efeito do fogo	18
3 FORMULAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE NUMÉRICA.....	20
3.1 Introdução	20
3.1.1 Definições	20
3.2 Análise térmica	20
3.3 Afetação dos elementos de betão pelo incêndio – transferência de calor	21
3.3.1 Transferência de calor por condução	22
3.3.2 Transferência de calor por convecção	25
3.3.3 Transferência de calor por radiação.....	26
3.4 Análise numérica.....	29
3.4.1 Método dos elementos finitos	30
3.4.2 Condições iniciais no domínio e de fronteira.....	31
3.4.3 Equações da transferência de calor.....	32
3.4.4 Aplicação do método numérico à análise térmica.....	33
3.4.5 Processo iterativo.....	38
3.4.6 Critérios de convergência	39
4 DESCRIÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> E ANÁLISE DE RESULTADOS	41
4.1 Introdução	41
4.2 Funcionamento do programa <i>Fire Analysis System</i>	41
4.3 Propriedades térmicas usadas na análise	44
4.3.1 Calor específico	44
4.3.2 Teor de água.....	46
4.3.3 Condutibilidade térmica.....	46
4.3.4 Capacidade calorífica.....	48
4.3.5 Massa volúmica	48
4.4 Curva de incêndio.....	49

4.5	Classificação de resistência ao fogo padrão	50
4.6	Propriedades materiais em estudo – Resultados	51
4.7	Validação do modelo e comparação com o EC2	52
4.7.1	Influência dos métodos de integração no tempo	54
4.7.2	Influência da discretização da secção em elementos finitos	55
4.7.3	Influência do método de interpolação na determinação das curvas	56
4.8	Influência das propriedades térmicas na distribuição da temperatura.....	58
4.8.1	Influência da condutibilidade térmica	58
4.8.2	Influência do teor de água.....	59
4.8.3	Influência do calor específico	61
4.9	Evolução da temperatura num ponto ao longo do tempo	62
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	68
5.1	Conclusões	68
5.2	Desenvolvimentos Futuros	70
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
6.1	[DS] Dissertação/Tese de Mestrado	71
6.2	[PB] Publicação.....	71
6.3	[RG] Regulamento	72
6.4	[SI] Site de Internet	72
6.5	[TD] Tese de Doutoramento	73
7	ANEXOS.....	A.1
	A – Influência da condutibilidade térmica na distribuição da temperatura.....	A.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Imagem de entrada do programa de cálculo desenvolvido.....	13
Figura 2.1 – Incêndio de 1906 em São Francisco [SI06].....	16
Figura 3.1 – Mecanismos de transmissão de calor [SI04]	22
Figura 3.2 – Fluxos de calor que atravessam a fronteira de um elemento infinitesimal.....	23
Figura 3.3 – Fluxo de calor proporcionado pelas ondas electromagnéticas [SI01].....	26
Figura 3.4 – Radiação incidente (E_i), refletida (E_r), transmitida (E_t) e absorvida (E_a) (modificada de [SI02]).....	26
Figura 3.5 – Elemento finito de oito nós do tipo <i>serendipity</i> (modificada de [SI05]).....	30
Figura 3.6 – Variação da temperatura no intervalo de tempo Δt (modificado de [DS2])	36
Figura 4.1 – Adição da secção.....	41
Figura 4.2 – Configurações da análise	42
Figura 4.3 – Escolha do tempo de exposição ao fogo.....	42
Figura 4.4 – Alguns estados da análise	43
Figura 4.5 – Definição das curvas de temperatura a apresentar nos resultados	43
Figura 4.6 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 300 \times 160$ (mm^2)	52
Figura 4.7 – Perfil de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 300 \times 160$ (mm^2) – R90	53
Figura 4.8 – Isotérmicas de 500°C para uma viga $h \times b = 300 \times 160$ (mm^2).....	53
Figura 4.9 – Identificação dos dois tipos de divergências nos resultados.....	54
Figura 4.10 – Comparação dos resultados dos três métodos de integração no tempo.....	55
Figura 4.11 – Comparação dos resultados obtidos através de várias discretizações da secção.....	56
Figura 4.12 – Comparação dos resultados obtidos através dos dois métodos de interpolação.....	57
Figura 4.13 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm^2] – R30.....	59
Figura 4.14 – Isotérmicas de 500°C para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm^2].....	60
Figura 4.15 – Comparação entre o EC2-1-2 e o Manual da ASCE: Isotérmicas de 500°C para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm^2].....	62
Figura A.1 – Superfícies para as quais são apresentados os perfis de temperatura.....	A.1
Figura A.2 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 15 \times 8$ [cm^2] – R30.....	A.2
Figura A.3 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm^2]	A.2
Figura A.4 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm^2] – R90.....	A.3
Figura A.5 – Isotérmicas de 500°C para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm^2].....	A.3
Figura A.6 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 60 \times 30$ [cm^2]	A.3
Figura A.7 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para uma viga $h \times b = 80 \times 50$ [cm^2]	A.4
Figura A.8 – Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para um pilar $h \times b = 30 \times 30$ [cm^2]	A.5

Figura A.9 – Isotérmica de 500 °C para um pilar $h \times b = 30 \times 30$ [cm ²]	A.6
Figura A.10 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar circular com diâmetro de 30 cm ...	A.6
Figura A.11 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar circular com diâmetro de 30 cm ...	A.7
Figura A.12 – Isotérmica de 500 °C para um pilar circular com diâmetro de 30 cm	A.7

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Calor específico em função da temperatura e do teor de água (EC2)	45
Gráfico 4.2 – Calor específico em função da temperatura e do agregado (ASCE)	45
Gráfico 4.3 – Condutibilidade térmica do betão (EC2-1-2).....	47
Gráfico 4.4 – Condutibilidade térmica do betão (ASCE)	47
Gráfico 4.5 – Curva de incêndio padrão ISO 834	50
Gráfico 4.6 – Evolução da temperatura ao longo do tempo em dois pontos.....	63
Gráfico 4.7 – Representação do tipo de aumento da temperatura ao longo do tempo	64
Gráfico 4.8 – Identificação da “Barriga” na curva dos pontos com aumento linear de temperatura ao longo do tempo	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Classificação do betão quanto à densidade	49
Tabela 4.2 – Classes de resistência ao fogo padrão para produtos de construção.....	51
Tabela 4.3 – Classificação da resistência dos elementos de suporte ao fogo padrão	51
Tabela 4.4 – Profundidade das isotérmicas de 500 °C relativamente ao teor de água de 1,5 %	60
Tabela 4.5 – Pontos da curva com aumento linear de temperatura ao longo do tempo.....	65
Tabela 4.6 – Comparação entre a correlação de um ponto de ordenada imposta e outro obtido por aproximações sucessivas.....	67

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

$c_p(\theta)$	calor específico a pressão constante
$c_{p,peak}$	calor específico de pico a pressão constante
k	coeficiente de condutibilidade térmica
q_{cd}	fluxo de calor por condução [W/m^2]
t	tempo
u	teor de água
x	distância normal a uma superfície

Letras maiúsculas latinas

A	área
Q	quantidade de calor [J]
T	temperatura
W	trabalho realizado por um sistema

Letras minúsculas gregas

θ	temperatura
θ_g	temperatura dos gases no compartimento de incêndio em [$^{\circ}\text{C}$]
λ	coeficiente de condutibilidade térmica de um material qualquer em [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
λ_c	Condutibilidade térmica do betão em [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
ρ	peso específico do material [kN/m^3]

Letras maiúsculas gregas

ΔU	variação da energia interna de um sistema
------------	---

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Nos últimos anos, a sociedade académica tem vindo a focalizar o estudo da ação do fogo pela sua importância e consequência nos edifícios, quer ao nível social quer ao nível económico. Com a pretensão de permitir a evacuação das pessoas, por um lado, e a preservação da integridade estrutural dos edifícios, por outro, têm sido realizados ensaios experimentais e desenvolvidos métodos de análise que permitem aos projetistas dimensionar as suas estruturas com segurança e eficiência. Recentemente, o Comité Europeu de Normalização publicou um regulamento, o Eurocódigo 2, que na sua Parte 1-2 estabelece as regras gerais para a verificação da resistência ao fogo. Ele define os princípios, os requisitos e as regras para o projeto estrutural de edifícios de betão expostos ao fogo [RG3].

A Parte 1-2 do Eurocódigo 2 (EC2-1-2) estabelece os métodos de verificação da resistência ao fogo: valores tabelados, métodos de cálculo simplificados e modelos de cálculo avançados. Para estes últimos, apenas são indicados os princípios. De resto, os valores tabelados apenas permitem a análise isolada de elementos da estrutura e os métodos de cálculo simplificados permitem o estudo de partes da estrutura, não permitindo a interação com a estrutura global [RG3].

O Anexo A do EC2-1-2 (EC2-1-2-A) apresenta perfis de temperatura para secções de lajes, vigas e pilares, com medidas definidas, baseados em valores discretos de teor de água, de calor específico do betão e é compatível com o limite inferior da condutibilidade térmica do betão. São ainda assumidos valores concretos para a emissividade da superfície do betão e para o coeficiente de convecção.

Com base nestes pressupostos existe a necessidade de alargar o leque informativo acerca da distribuição da temperatura numa maior diversidade de secções e para outros valores das propriedades térmicas do betão.

1.2 Objetivos

Quando um projetista pretende estudar o comportamento da sua estrutura numa situação de incêndio, depara-se com três etapas importantes: a modelação do incêndio, a análise térmica e, finalmente, a análise estrutural. Com este trabalho pretendeu-se criar uma ferramenta que lhe facilite a tarefa na etapa intermédia uma vez que consistiu na elaboração de um programa de cálculo (Fire Analysis System) de fácil utilização orientado para projetistas, que fornece o perfil de temperatura em qualquer secção e em qualquer instante de tempo. Adicionalmente elaborou-se um módulo que permite também o cálculo da temperatura num ponto isolado da secção.



Figura 1.1 – Imagem de entrada do programa de cálculo desenvolvido

A possibilidade de optar por outras propriedades térmicas de diferentes características materiais, para além das consideradas no EC2-1-2-A, é uma exigência imposta pela necessidade de abrangência das diferentes condições reais da estrutura. Por exemplo, o Anexo A do EC2-1-2 adotou o limite inferior da condutibilidade térmica para obter os perfis de temperatura expostos referindo que este limite “fornece temperaturas mais realistas para as estruturas de betão do que o limite superior” acrescentando, ainda, que este último foi “determinado com base em ensaios de estruturas mistas aço/betão”. Contudo, o Anexo Nacional desta norma, define que estes perfis de temperatura, apresentados no EC2-1-2-A, podem ser adotados apenas para betões leves e estipula que o limite superior da

condutibilidade térmica pode ser adotado para betões de massa volúmica normal e para betões de alta resistência.

O trabalho culminará então numa solução de distribuição de temperaturas determinadas a partir de uma análise transitória bidimensional com recurso a elementos finitos, em que o utilizador se deparará com três etapas principais:

1. definição da secção, escolha das propriedades térmicas e da análise computacional;
2. escolha do tempo de exposição ao fogo;
3. seleção das isotérmicas e análise do perfil térmico resultante bem como análise da variação da temperatura em qualquer ponto da secção.

A validação dos resultados obtidos com o modelo desenvolvido será efetuada através da comparação entre os perfis de temperatura apresentados nas figuras do EC2-1-2-A e os obtidos do programa de cálculo quando se consideram as mesmas propriedades térmicas e as mesmas secções.

Na utilização do programa é possível optar pelo idioma português ou inglês.

Por restrições temporais, só foi possível abranger a tipologia das secções definidas no EC2-1-2 (secções retangulares e circulares) mas, é ambição do autor desenvolver outros módulos onde seja possível definir qualquer tipo de secção, bem como permitir diferentes condições de exposição ao fogo e, por último, definir propriedades mecânicas dos materiais permitindo posteriormente efetuar análises termomecânicas.

1.3 Estruturação da tese

A presente tese encontra-se dividida em seis capítulos principais, e mais dois capítulos com referências bibliográficas e anexos. Faz-se de seguida, uma descrição sucinta dos diferentes capítulos.

No **Capítulo 1 – Introdução**, é abordada, de uma forma sucinta, a perspetiva europeia no que diz respeito ao desenvolvimento de ferramentas para os projetistas com o intuito de orientar e simplificar as suas tarefas de verificação da segurança estrutural de edifícios. Neste capítulo é ainda descrito genericamente o tema da tese e os objetivos principais a que o autor se propõe no âmbito da mesma.

No **Capítulo 2 – Estado da arte**, contextualiza-se este trabalho no panorama geral relativo aos estudos realizados nesta área, às normas de verificação da segurança e à produção de ferramentas de apoio e aplicabilidade dos métodos analíticos e aproximados existentes para dimensionamento.

No **Capítulo 3 – Formulação do modelo de análise numérica**, é descrito o modelo de análise usado pelo programa de cálculo.

No **Capítulo 4 – Descrição do *software* e análise de resultados**, é apresentada a forma como o utilizador deve interagir com o programa desenvolvido e é definida a diversidade de parâmetros e comportamentos dos materiais que são contemplados na análise. São também apresentados, neste capítulo, alguns resultados que podem ser obtidos, nomeadamente os perfis de temperaturas, numa análise comparativa com os resultados do EC2-1-2-A. Na parte final é, ainda, apresentado um estudo da evolução da temperatura ao longo do tempo num ponto específico da secção.

No **Capítulo 5 – Conclusões e desenvolvimentos futuros**, são apresentadas as conclusões e são apresentadas propostas para desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

Se, no princípio dos tempos, o fogo era considerado obra do acaso ou resultado da ação divina, hoje, sabe-se que um incêndio é uma ação controlável desde que sejam usados os meios de proteção adequados. Nesse sentido, ao longo dos últimos anos, foram desenvolvidos métodos de verificação da resistência ao fogo baseados em curvas de incêndio que ajudam os projetista a perceber a sua evolução ao longo do tempo e, conseqüentemente, projetar as estruturas para suportar as elevadas temperaturas durante um determinado período de tempo.

2.2 Enquadramento histórico

Foi no final do século XIX e início do século XX que o homem começou a preocupar-se, cientificamente, com a ação do fogo sobre as estruturas, prevendo a sua ação nos seus cálculos. Com a explosão demográfica e conseqüente concentração dos edifícios, na altura construídos essencialmente à base de madeira, surgiram também incêndios de grandes proporções e, conseqüentemente, de difícil controlo DS1. Como exemplo, refere-se o incêndio que deflagrou em São Francisco após um terramoto de grandes dimensões em Abril de 1906 (Figura 2.1). Durante cerca de três dias, o incêndio destruiu mais de 28 000 estruturas e provocou pelo menos 3000 mortos [SI06]. A perda de vidas humanas e as perdas económicas associadas a estes acontecimentos conduziram à necessidade de investigar cientificamente o problema.



Figura 2.1 – Incêndio de 1906 em São Francisco [SI06]

Bauschinger foi provavelmente o primeiro investigador a preocupar-se com esta temática, quando em 1884-86 documentou duas séries de resultados de ensaios a elementos expostos ao fogo. É-lhe atribuído este reconhecimento devido, essencialmente, à inexistência de referências anteriores.

A partir dessa data os ensaios experimentais relacionados com este assunto tiveram um crescimento assinalável. No entanto, foi no período de 1912 a 1917 que foram realizados ensaios em larga escala de elementos isolados. Nesse período, foram ensaiadas, à escala real, colunas metálicas, de betão armado e de madeira. Estiveram em estudo vários parâmetros como por exemplo, a carga de colapso, os efeitos do arrefecimento repentino com água e diferentes classes de resistência do betão. São estudos detalhados e completos, concorrendo com alguns que se fazem presentemente DS1.

2.3 Introdução aos métodos de análise numérica

Os grandes investimentos associados à realização de ensaios experimentais conduziram, desde sempre, a que a Ciência e a Tecnologia se preocupassem por descrever os fenómenos reais através de modelos matemáticos. O estudo destes modelos permite uma compreensão mais profunda dos fenómenos estudados bem como da sua evolução futura. A Matemática Aplicada é o ramo da Matemática que se dedica a desenvolver as ferramentas mais adequadas para a resolução dos problemas descritos por esses modelos.

Infelizmente nem sempre é possível aplicar os métodos clássicos de análise, por diferentes razões:

- não se aplicam aos problemas físicos reais;
- a sua aplicação resulta excessivamente complexa;
- a solução formal é tão complicada que se torna impossível qualquer interpretação posterior;
- simplesmente não existem métodos analíticos capazes de proporcionar soluções válidas para o problema.

Nestes casos, em que as soluções analíticas são inviáveis, são úteis as técnicas numéricas que, através do cálculo, mais ou menos intenso, conduzem a soluções tão aproximadas quanto se

queiram. O grande esforço de cálculo envolvido na maioria destes métodos faz com que o seu uso esteja intimamente ligada ao uso de computadores. De facto, sem o desenvolvimento que ocorreu no campo da informática seria difícil de imaginar o nível atual de utilização das técnicas numéricas em áreas cada vez mais diversificadas [SI03].

2.4 Os métodos numéricos na análise do efeito do fogo

Na área da Engenharia Civil, têm sido desenvolvidos vários programas, comerciais e não comerciais, que recorrem aos métodos numéricos para efetuarem o estudo e o efeito da ação do fogo sobre elemento e estruturas.

Naturalmente, tratam-se de programas diferenciados pois foram desenvolvidos, originalmente, para responder a situações específicas que preocupavam os seus autores. São programas mais ou menos complexos.

Os programas comerciais possuem um visual de utilização mais ou menos atraente mas são fechados quanto aos métodos de cálculo e conseqüentemente sem advertência das aproximações efetuadas ou dos erros admitidos.

Por outro lado, os programas não comerciais, que circulam quase exclusivamente no meio académico, são muito específicos e exigem, por vezes, o conhecimento do código fonte. Uma vez acessível, o código fonte pode ser modificado existindo a possibilidade de alterar o método de cálculo bem como fazer o controlo dos resultados.

A maioria dos programas existentes não faz incidir o interesse na análise térmica na medida em que a análise mecânica é o resultado vantajoso para qualquer projetista. Assim, o cálculo térmico é admitido como um cálculo intermédio, necessário, para obter os resultados termomecânicos, resultados estes que são a base do dimensionamento.

Apesar de tudo, ainda assim, destacam-se, pelo menos, dois programas que permitem a análise térmica de elementos estruturais sujeitos a elevadas temperaturas.

O *TASEF-2D*, desenvolvido por Ulf Wickstrom em 1979 na universidade de Lund, Suécia, permite a análise térmica não linear de elementos finitos bidimensionais planos. Tem a vantagem de permitir a definição da curva de incêndio bem como a análise de qualquer tipo de material desde que se introduzam as suas propriedades térmicas.

O *FIRES-T3*, desenvolvido por uma equipa de investigadores na universidade da Califórnia em 1977, permite fazer uma análise térmica não linear através de elementos finitos de uma, duas ou três dimensões. Trata-se de um programa mais avançado que o TASEF-2D em termos de análise térmica, no entanto, permite apenas tal como o TASEF-2D, a consideração de diferentes curvas de incêndio e a definição das características de materiais definidas pelo utilizador DS1.

A existência destes e de outros programas não abscinde o interesse por esta matéria nem pelo desenvolvimento de novas ferramentas que permitam aos projetistas escolher a que mais se adequa às suas necessidades. Por outro lado, o conhecimento que temos e a compreensão do comportamento dos materiais em situação de incêndio são ainda limitados. Impõe-se, por isso, um contínuo estudo e desenvolvimento de novas ferramentas que possibilitem aos investigadores, desenvolver novas formulações ou melhorar as existentes.

3 FORMULAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE NUMÉRICA

Antes de se iniciar a descrição da formulação do modelo de análise numérica convém perceber o porquê da necessidade de efetuar esta análise. É pertinente entender, também, em que medida é que o fogo afeta os elementos de betão. Neste sentido, é por aqui que se vai começar a apresentação.

3.1 Introdução

No decurso deste capítulo vão ser usados termos e condições que são específicos deste tema e sobre os quais convém perceber bem as suas definições. Registam-se, de seguida, breves definições de forma a tornar compreensível a exposição que se segue.

3.1.1 Definições

Calor. Quantidade de energia térmica transferida de um sistema para outro devido exclusivamente à diferença de temperaturas entre ambos.

Fluxo de calor. Taxa de energia térmica (calor) transferida a uma determinada superfície.

Incêndio. Ocorrência de fogo não controlado.

Termodinâmica. Ramo da Física que estuda as causas e os efeitos de mudanças na temperatura, pressão e volume. Na sua essência, a Termodinâmica estuda o movimento da energia e como a energia cria movimento.

Transferência de calor. Transição de energia térmica (calor) de um corpo mais quente para um corpo mais frio.

Vácuo. Ausência de matéria numa certa região do espaço. O vácuo perfeito não é possível na Natureza.

3.2 Análise térmica

A análise térmica é o propósito deste trabalho. E não se pode falar de análise térmica sem falar de termodinâmica. É irrelevante estar a referir aqui as transformações e os processos ou

até nomear todos os princípios da termodinâmica. O que importa realmente é conhecer o princípio que está intimamente ligado às transferências de calor numa situação de incêndio. Convém então relembrar o primeiro princípio da termodinâmica ou Princípio da Conservação da Energia como também é conhecido. Ele refere que, existindo um sistema e um ambiente vizinho, se uma certa quantidade de calor Q atravessa a fronteira comum aos dois devido à diferença de temperatura entre ambos e se a fronteira entre ambos se mover nesse processo, implicando produção de trabalho W devido à energia trocada, então a variação da energia interna ΔU do sistema é expresso pela Equação (3.1).

$$\Delta U = Q - W \quad [J] \quad (3.1)$$

Esta expressão representa analiticamente o princípio da conservação da energia e pode ler-se da seguinte forma: "a variação da energia interna de um sistema é igual à diferença entre o calor e o trabalho trocados entre o sistema e o meio exterior".

Ora, é com base neste princípio que se efetua a análise térmica de um elemento de betão numa situação de incêndio, considerando para o efeito que o trabalho realizado é nulo.

É importante também reter o significado do segundo princípio da termodinâmica. Ele diz que as diferenças entre sistemas em contacto tendem a igualar-se e que esse processo se realiza apenas num sentido: a transferência de energia realiza-se do sistema com mais energia para o sistema com menos energia.

Em jeito de comparação, enquanto o primeiro princípio fornece uma fórmula de quantificação da energia, o segundo princípio fornece-nos uma fórmula qualitativa para a energia.

Ainda, relativamente à análise térmica, interessa referir que se efetua uma análise transitória. Contrariamente à análise térmica estática, na análise térmica transitória são consideradas as variações dos fluxos de calor no sistema ao longo do tempo, aliás, como acontece numa situação de incêndio. Os valores da temperatura no sistema são obtidos em função do tempo ocorrido após o início do incêndio, variando a cada instante, a saber, desde já, de acordo com a curva de incêndio padrão ISO 834 (ver Gráfico 4.5 – Curva de incêndio padrão ISO 834, página 50).

3.3 Afetação dos elementos de betão pelo incêndio – transferência de calor

De que forma é que o incêndio afeta os elementos de betão? Os elementos de betão sofrem um aumento de temperatura provocado pela transferência de calor do fogo para o elemento.

Até à data são conhecidos três mecanismos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Estes três mecanismos estão ilustrados na Figura 3.1.

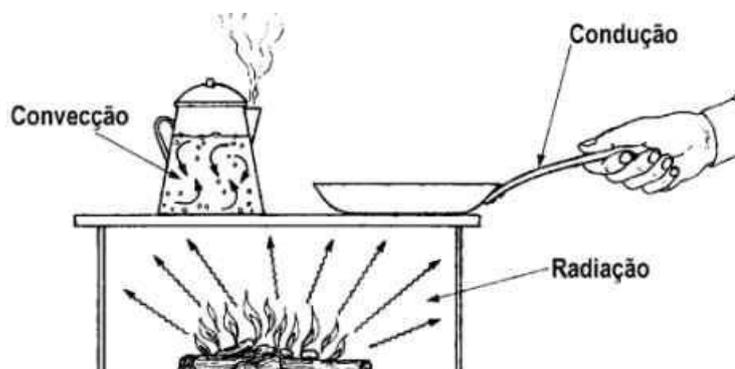


Figura 3.1 – Mecanismos de transmissão de calor [SI04]

É importante ainda referir que o calor flui sempre das temperaturas mais altas para as temperaturas mais baixas e esta transferência não pode ser impedida: só é possível torna-la mais lenta – o mesmo é dizer que não existe nenhum material isolante perfeito.

De seguida são expostas, separadamente, as diferentes formas de propagação do calor mas, na maioria das vezes elas ocorrem combinadas.

3.3.1 Transferência de calor por condução

A condução ocorre dentro de um corpo ou entre dois corpos em contacto físico direto. A lei da condução térmica, ou lei de Fourier, estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo da temperatura. A constante de proporcionalidade é o coeficiente de condutibilidade térmica (definição em 0, página 46) do material. Esta lei é traduzida pela expressão (3.2) que define o fluxo numa única direção (quando há gradiente de temperatura apenas na direção x).

$$q_{cd} = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_x = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.2)$$

Nesta expressão:

A – área da superfície de contacto [m^2];

t – tempo [s];

θ – temperatura [$^{\circ}K$];

x – distância normal à superfície de contacto [m];

o sinal negativo significa que o fluxo de calor se dá da parte mais quente para a parte mais fria.

Verifica-se, pela expressão anterior, que a condutibilidade térmica exerce um papel fundamental na transferência de calor por condução. Os materiais com um coeficiente de condutibilidade elevado são bons condutores térmicos enquanto os materiais com um coeficiente de condutibilidade baixo são bons isolantes térmicos.

Aquela é a expressão mais simples da transferência de calor por condução. No entanto é muito fácil adaptá-la às circunstâncias de uma análise bidimensional ou mesmo tridimensional. Por exemplo, a expressão para uma análise tridimensional é a indicada na seguinte equação:

$$q_{cd} = -\lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} - \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} - \lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (3.3)$$

Para existir equilíbrio de energia é necessário garantir que os fluxos de calor que entram são iguais aos fluxos de calor que saem. A Figura 3.2 representa um elemento tridimensional em equilíbrio (regime estacionário, sem variação no tempo).

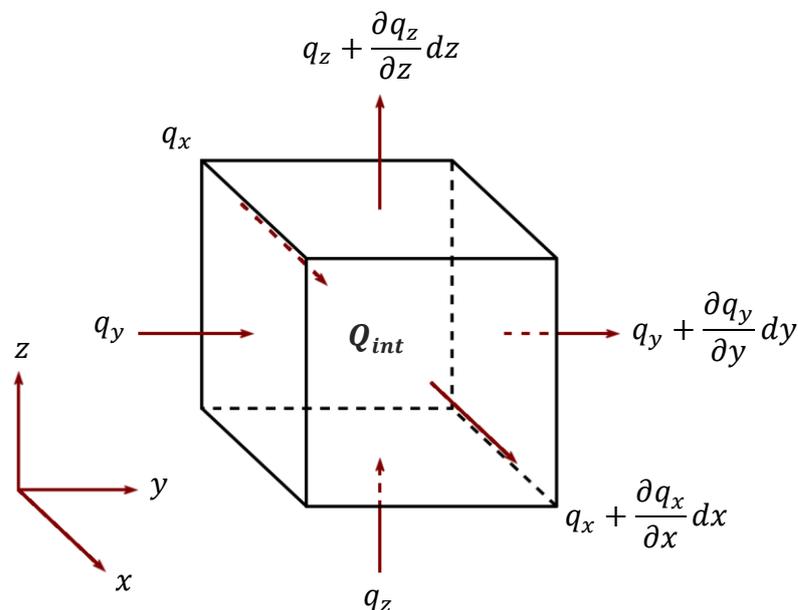


Figura 3.2 – Fluxos de calor que atravessam a fronteira de um elemento infinitesimal

Nesta figura, Q_{int} , representa a geração de calor interna que se traduz, por exemplo, na evaporação da água aprisionada no betão, no calor de hidratação da cura do betão ou até mesmo nas alterações dos valores de calor específico ou da densidade dos materiais que constituem os betões. Nestes casos a geração de calor interna assume um valor negativo por se tratarem de processos que consomem energia. Portanto, a qualquer aumento do valor de Q_{int} existirá sempre uma transmissão de calor do interior do elemento para o seu exterior. Assim, deduz-se facilmente que a variação do fluxo é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta q_{cd} = -\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - Q_{int} = 0 \quad (3.4)$$

ou

$$\Delta q_{cd} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q_{int} = 0 \quad (3.5)$$

que pode ser apresentada ainda numa forma mais compacta:

$$\Delta \mathbf{q}_{cd} = -\nabla^T \cdot (\lambda \cdot I \cdot \nabla \theta) - Q_{int} = -\nabla^T \cdot \mathbf{q} - Q_{int} = 0 \quad (3.6)$$

onde:

$\nabla^T = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right]$ é o vetor gradiente (transposto);

$\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$, em materiais isotrópicos como se considera no caso do betão;

I é a matriz identidade de ordem 3;

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix}.$$

A energia térmica ou calor transferido por unidade de volume de um elemento é expresso pelo integral do calor específico do material que o constitui desde o zero absoluto até à temperatura T a que se encontra o elemento:

$$Q = \int_0^T \rho \cdot c \cdot d\theta = \rho \cdot c \cdot \theta \quad (3.7)$$

onde:

c – calor específico do material [J/(kg·K)];

θ – Temperatura [°C].

A temperatura varia no espaço e no tempo durante a transferência do calor. Logo, da mesma forma – e pela análise da expressão anterior –, reconhece-se que existe também variação da quantidade do calor transferido ao longo do tempo que se traduz pela equação seguinte onde t representa o tempo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.8)$$

Assim, a equação geral da transmissão de calor por condução – teoricamente válida para qualquer material – é:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \rho \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} - Q_{int} = 0 \quad (3.9)$$

3.3.2 Transferência de calor por convecção

A convecção consiste na transferência de calor entre fluidos ou entre um fluido e um sólido devido ao movimento de um fluido. Esse movimento é gerado pela diferença de densidade de um (ou do) fluido devido à existência de um gradiente de temperatura (convecção natural). Como é do conhecimento geral, quando um fluido é aquecido expande tornando-se menos denso e tendendo a subir acima da parte do fluido mais fria, portanto, menos densa. Esta, por sua vez, tende a descer. Este processo repete-se enquanto houver diferença de densidade – enquanto houver diferença de temperatura – dando origem às chamadas correntes de convecção. Em oposição à convecção natural, a convecção pode ser forçada quando o movimento do fluido é provocado por uma bomba (no caso dos líquidos) ou por um ventilador (no caso de um fluido gasoso).

A transferência de calor por convecção térmica é dada pela expressão:

$$q_{cv} = \alpha_c (\theta_S - \theta_F) \quad (3.10)$$

onde:

θ_F – temperatura do fluido na proximidade da superfície;

θ_S – temperatura da superfície do elemento sólido;

α_c – coeficiente de transferência de calor por convecção.

Esta expressão é apresentada pela Parte 1-2 do Eurocódigo 1 que também fornece os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção para várias situações de cálculo.

3.3.3 Transferência de calor por radiação

A radiação consiste na transmissão de calor através de ondas eletromagnéticas. Estas ondas propagam-se à velocidade da luz (299 792 458 m/s – velocidade no vácuo) e não necessitam de qualquer meio material para que a transmissão possa ocorrer. De facto, a transferência de calor por radiação é mais eficiente no vácuo. As ondas eletromagnéticas são formadas por um campo elétrico e outro magnético, que oscilam em fase, perpendicularmente entre si e também em relação à direção da propagação da onda (direção do fluxo de calor) como se representa na Figura 3.3.

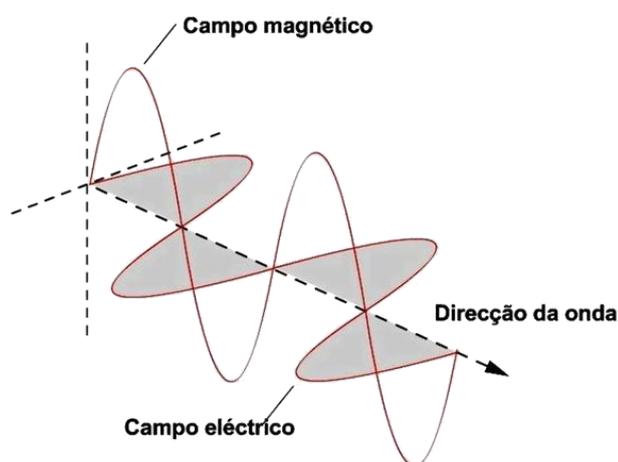


Figura 3.3 – Fluxo de calor proporcionado pelas ondas electromagnéticas [SI01]

A Figura 3.4 representa a forma como um corpo translúcido – em oposição a um corpo negro – trata a radiação que lhe incide. Enquanto um corpo negro, por definição, absorve e emite, a qualquer temperatura, toda a energia que lhe é transmitida em qualquer comprimento de onda, um corpo translúcido absorve apenas uma parte: a restante é refletida ou (re)transmitida.

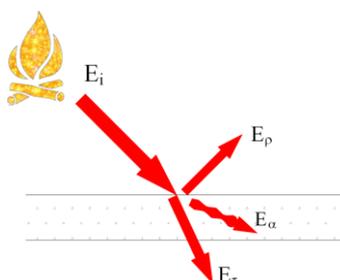


Figura 3.4 – Radiação incidente (E_i), refletida (E_r), transmitida (E_t) e absorvida (E_a) (modificada de [SI02])

A determinação da energia transmitida por um corpo não foi um problema simples de resolver. Por isso, Gustav Kirchhoff (1824-1887) começou por examinar o caso teórico simplificado do corpo negro. Como foi referido anteriormente, este corpo absorve toda a radiação que incide sobre ele, sem refletir qualquer parcela dessa radiação. Então, para que exista equilíbrio termodinâmico, este corpo deve irradiar a energia na mesma taxa que a absorve.

Quantificar a intensidade de energia que este corpo emite por radiação foi um problema complexo que Max Planck, em 1900, descreveu matematicamente através de uma lei que hoje conhecemos pelo seu nome – Lei de Planck – traduzida pela equação (3.11).

$$I_{\lambda}(\theta) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot [e^{k \cdot h \cdot c / (\lambda \cdot k \cdot \theta)} - 1]} \quad (3.11)$$

onde:

I_{λ} – intensidade específica (radiação do corpo negro);

h – constante de Planck ($h = 6,626\ 069\ 3(11) \times 10^{-34}$ [J · s]);

c – velocidade da luz no vácuo (299 792 458 m/s);

λ – comprimento de onda da radiação;

k – constante de Boltzmann ($k = 1,380\ 650\ 3 \times 10^{-23}$ [J/K]).

Esta intensidade específica não depende de qualquer propriedade do corpo exceto da sua temperatura. Assim, qualquer corpo em equilíbrio termodinâmico emite esta radiação – radiação de corpo negro – com um comprimento de onda dado pela Lei de Planck.

Foi a partir desta expressão que Stefan e Boltzmann deduziram o fluxo de calor por radiação emitido por um corpo negro. Fizeram-no integrando a Lei de Planck a todos os comprimentos de onda. O resultado está expresso em (3.12).

$$q_{rd,CN} = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(\theta) \cdot d\lambda = \sigma \theta^4 \quad (3.12)$$

onde:

$q_{rd,CN}$ – Fluxo de calor emitido por radiação de um corpo negro;

σ – constante de Stefan- Boltzmann ($\sigma = 5,6696 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)];

θ – temperatura do corpo negro.

Mas, esta expressão é válida quando aplicada a um corpo negro – aplicação teórica. Como nenhum material emite a totalidade da radiação que lhe incide existe a necessidade de modificar aquela expressão tornando-a válida para qualquer corpo. Surge então a necessidade de introduzir o conceito de emissividade, ϵ . Esta, é a relação entre o poder emissivo de um corpo qualquer e o de um corpo negro.

$$q_{rd,\epsilon} = \epsilon \cdot \sigma \cdot \theta^4 \quad (3.13)$$

Em rigor, ϵ é a relação entre o poder emissivo de um corpo cinzento e o de um corpo negro. Ambos são teóricos. A diferença é que o corpo cinzento absorve ou emite uma fração da energia emitida ou absorvida por um corpo negro. É esta diferença que aproxima as características do corpo cinzento às de um corpo real, no entanto não os iguala. Nos corpos reais a emissividade faz-se depender da temperatura, do comprimento de onda e da direção (ângulo) da emissão. De qualquer maneira é comum assumir que a emissividade não depende do comprimento de onda – dessa forma a emissividade de um corpo é constante – assumindo-se, assim, por simplificação, que os corpos reais são corpos cinzentos.

Prosseguindo, o fluxo de calor por radiação absorvido por um corpo é então obtido pela diferença entre o fluxo emitido pelo corpo com a temperatura mais elevada e o fluxo de calor absorvido pelo corpo com a temperatura mais baixa:

$$q_{rd} = (\epsilon \cdot \sigma \cdot \theta^4)_{emissor} - (\alpha \cdot \sigma \cdot \theta^4)_{receptor} \quad (3.14)$$

Onde α é a relação entre o poder de absorção de um corpo qualquer e a de um corpo negro.

Mas Kirchhoff, baseado nas leis da termodinâmica, definiu que no equilíbrio térmico, $\alpha = \epsilon$. Daqui resulta que o fluxo de calor absorvido por um corpo é obtido por:

$$q_{rd} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (\theta^4_{emissor} - \theta^4_{receptor}) \quad (3.15)$$

Resta ainda referir que a emissividade assume sempre um valor superior a zero e inferior ou igual a 1. Este limite superior corresponde à emissividade de um corpo negro. O limite inferior tem a ver com o facto de todos os materiais com temperatura superior ao zero absoluto emitirem radiação. Contudo, também é sabido que é impossível colocar um material à temperatura de zero absoluto. Logo, a emissividade nunca atinge o valor de zero.

Hoje, o projetista tem a vida facilitada: a emissividade dos materiais encontra-se tabelada nos Eurocódigos estruturais.

Para o caso concreto em estudo, o EC2-1-2 considera o valor de 0,7 para a emissividade da superfície do betão e a Parte 1-2 do Eurocódigo 1 apresenta a seguinte expressão para o cálculo do fluxo de calor por radiação.

$$q_{rd} = \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (3.16)$$

em que:

Φ – fator de vista;

ϵ_m – emissividade da superfície do elemento;

ϵ_f – emissividade do fogo;

θ_r – temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio [°C];

θ_m – temperatura da superfície do elemento [°C].

Nesta expressão, o fator de vista é a fração de energia irradiada de forma difusa que emana de uma dada superfície radiante e que chega a uma dada superfície recetora. Geralmente, este fator assume o valor unitário. No entanto, se se pretender levar em conta os efeitos de posição e de sombra, poderá optar-se por um valor inferior. É importante referir também que a emissividade do fogo assume, geralmente, o valor unitário.

3.4 Análise numérica

Uma vez conhecidas as formas como o calor do fogo é transmitido aos elementos de betão pretende-se explicar agora porque é que tem que se efetuar uma análise numérica.

Ora, como se viu, a temperatura num ponto qualquer interior a um elemento, depende, não só, da própria temperatura a que se encontra o elemento numa fase inicial, mas também da temperatura ambiente, que por sua vez dependem do tempo de exposição ao fogo. As propriedades térmicas e físicas do material constituinte do elemento também têm um contributo importante para a propagação do calor e dependem, igualmente, da temperatura a que o elemento está exposto, logo, do tempo de exposição. Estas dependências não são lineares pelo que se exige uma análise térmica, não linear, em função do tempo de exposição ao fogo. Não existindo, por outro lado, uma solução analítica abrangente – ela só é possível, com um rigor permissível, em casos muito limitados –, recorre-se à análise numérica que permite uma análise mais flexível e fornece resultados tão precisos quanto se queira.

A análise numérica recorre aos elementos finitos que, após a análise, fornece a distribuição da temperatura na secção, discretizada pelos valores da temperatura em cada coordenada nodal

de cada elemento e aproximada através de funções de forma devidamente definidas de acordo com o tipo de elemento finito escolhido.

3.4.1 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos permite obter uma solução numérica aproximada sobre um domínio – no qual estão definidas determinadas equações diferenciais que caracterizam o comportamento físico do problema – dividindo-o num determinado número de subdomínios independentes entre si designados por “elementos finitos”. Ao conjunto dos elementos finitos chama-se “discretização” do problema. Em cada elemento finito existe uma quantidade de pontos representativos chamados “nós”. Um nó que se encontra no limite do elemento pode pertencer a mais que um elemento. Ao conjunto dos nós com as respetivas relações de contiguidade chama-se “malha”. Ora, é sobre esta malha que se realizam os cálculos. As funções que aproximam a solução exata do problema, dependentes das coordenadas nodais, chamam-se “funções de forma”.

O modelo desenvolvido (Fire Analysis System) recorre a elementos quadriláteros de 8 nós do tipo *serendipity*. Este elemento é caracterizado por possuir 8 nós como se mostra na Figura 3.5 que representa um elemento genérico deste tipo. Na mesma figura encontram-se representados os eixos, ξ e η , correspondentes às coordenadas locais.

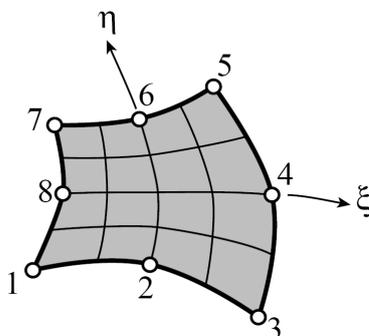


Figura 3.5 – Elemento finito de oito nós do tipo *serendipity* (modificada de [SI05])

As funções de forma de um elemento deste tipo são as indicadas de seguida:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= -(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \xi + \eta)/4 & N_2 &= (1 - \xi)(1 + \xi)(1 - \eta)/2 \\
 N_3 &= -(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \xi + \eta)/4 & N_4 &= (1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \eta)/2 \\
 N_5 &= -(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \xi - \eta)/4 & N_6 &= (1 - \xi)(1 + \xi)(1 + \eta)/2 \\
 N_7 &= -(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \xi - \eta)/4 & N_8 &= (1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \eta)/2
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

e as suas derivadas parciais são:

$$\begin{aligned}
 N_{1,\xi} &= -(\eta - 1)(2\xi + \eta)/4 & N_{2,\xi} &= \xi(\eta - 1) \\
 N_{3,\xi} &= (\eta - 1)(\eta - 2\xi)/4 & N_{4,\xi} &= -(1 + \eta)(\eta - 1)/2 \\
 N_{5,\xi} &= (1 + \eta)(2\xi + \eta)/4 & N_{6,\xi} &= -\xi(1 + \eta) \\
 N_{7,\xi} &= -(1 + \eta)(\eta - 2\xi)/4 & N_{8,\xi} &= (1 + \eta)(\eta - 1)/2
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned}
 N_{1,\eta} &= -(\xi - 1)(2\eta + \xi)/4 & N_{2,\eta} &= (1 + \xi)(\xi - 1)/2 \\
 N_{3,\eta} &= (\xi + 1)(2\eta - \xi)/4 & N_{4,\eta} &= -\eta(\xi + 1) \\
 N_{5,\eta} &= (1 + \xi)(2\eta + \xi)/4 & N_{6,\eta} &= -((1 + \xi)(\xi - 1))/2 \\
 N_{7,\eta} &= -(\xi - 1)(2\eta - \xi)/4 & N_{8,\eta} &= \eta(\xi - 1)
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

A escolha recaiu sobre os elementos do tipo *serendipity* porque os elementos de Lagrange requerem um esforço computacional maior em consequência do maior número de nós.

3.4.2 Condições iniciais no domínio e de fronteira

A equação diferencial da condução de calor no domínio tem de respeitar as condições de temperatura inicial ($t = 0$) e condições de fronteira.

No domínio, o campo inicial de temperaturas pode traduzir-se pela expressão seguinte:

$$\theta(x, y, t = 0) = \theta_0(x, y), \text{ em } \Omega \tag{3.20}$$

As condições de fronteira podem assumir-se de dois tipos: as condições de fronteira essenciais ou de Dirichlet onde se consideram as temperaturas prescritas θ numa parte da fronteira Γ_θ ,

$$\theta = \theta(x, y, t), \text{ em } \Gamma_\theta \tag{3.21}$$

e as condições de fronteira naturais ou de Neumann onde se consideram os fluxos de calor prescritos q_{pr} numa parte da fronteira Γ_q e normal a esta de acordo com a expressão seguinte:

$$q_{pr} = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = q(x, y, t), \text{ em } \Gamma_q \tag{3.22}$$

3.4.3 Equações da transferência de calor

A transferência de calor no domínio (fluxo de calor por condução), numa análise bidimensional e transitória, é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + Q_{int} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}, em \Omega \quad (3.23)$$

Onde:

- Q_{int} – geração de calor interna;
- c_p – calor específico;
- t – tempo;
- θ – temperatura;
- λ – coeficiente de condutibilidade térmica;
- ρ – peso específico do material;
- Ω – domínio.

O campo de temperaturas que satisfaz esta equação deve satisfazer também as condições de fronteira traduzidas pelo fluxo de calor por convecção térmica q_{cv} que ocorre na fronteira Γ_c (símbolos já definidos na equação (3.10), página 25)

$$q_{cv} = \alpha_c (\theta_S - \theta_F), em \Gamma_c \quad (3.24)$$

e pelo fluxo de calor por radiação q_{rd} que ocorre na fronteira Γ_r (símbolos já definidos na equação (3.16), página 29)

$$q_{rd} = \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot (\theta_r^4 - \theta_m^4), em \Gamma_r \quad (3.25)$$

Para tornar o cálculo mais simples é possível linearizar esta última equação da seguinte forma:

$$\begin{aligned} q_{rd} &= \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot (\theta_r^4 - \theta_m^4) = \\ &= \underbrace{\Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot (\theta_r^2 + \theta_m^2)}_{\alpha_r} (\theta_r + \theta_m) (\theta_r - \theta_m) = \alpha_r (\theta_r - \theta_m) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Se se considerar α_r como o coeficiente de transferência de calor por radiação, esta expressão toma a mesma forma que a expressão do fluxo de calor por convecção. Como $\theta_S = \theta_m (= \theta)$

e habitualmente se considera $\theta_F = \theta_r (= \theta_\infty)$, podem-se combinar as duas expressões da seguinte forma:

$$q_{cr} = q_{cv} + q_{rd} = \alpha_c(\theta - \theta_\infty) + \alpha_r(\theta - \theta_\infty) = \alpha_{cr}(\theta - \theta_\infty) \quad (3.27)$$

onde

$$\alpha_{cr} = \alpha_c + \alpha_r \quad (3.28)$$

é o coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação.

Facilmente se percebe que tanto a equação de transferência de calor no domínio, equação (3.23), como a equação (combinada) de transferência de calor na fronteira, equação (3.27), são não lineares. A primeira, devido à condutibilidade térmica, calor específico e peso específico do material que dependem da temperatura; a segunda, devido ao assumido coeficiente de transferência de calor por radiação, α_r , que também possui um termo não linear dependente da temperatura. Daqui, a necessidade de usar métodos numéricos para a resolução do problema.

3.4.4 Aplicação do método numérico à análise térmica

Para a análise térmica recorreu-se aos elementos finitos identificados no ponto 3.4.1 para discretizar o domínio Ω .

O objetivo é conseguir determinar as temperaturas nodais – temperaturas em cada nó da malha de elementos finitos – para depois, à custa delas, ser possível determinar a temperatura em qualquer ponto do interior de cada elemento. A temperatura, no interior de cada elemento, é interpolada pela seguinte equação:

$$\theta = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \theta_i = ([N] \cdot \{\theta\})^e \quad (3.29)$$

onde,

$[N]$ – matriz das funções de forma definidas em cada elemento e ;

$\{\theta\}$ – vetor dos valores nodais da temperatura em cada elemento e ;

n – número de nós de cada elemento.

Prosseguindo, o método de determinação do problema de transferência de calor consiste na resolução direta das equações que regem o problema físico incluindo as condições de contorno. A esta formulação dá-se o nome de formulação fraca. Opta-se por esta formulação, porque a obtenção da solução exata pela chamada formulação forte, para além de requerer continuidade nas soluções das variáveis dependentes e a diferenciabilidade das funções que definem essas variáveis, pelo menos, até à ordem da equação diferencial que define o problema; em geral, é difícil de implementar e limitada a casos especiais, funcionando bem, apenas para problemas com geometrias e condições de fronteira regulares.

Neste trabalho, foi, então, usada a formulação fraca com recurso ao método dos resíduos pesados para a sua resolução. Em que consiste o método dos resíduos pesados?

O método dos resíduos pesados inicia-se com a definição de uma equação diferencial genérica na forma:

$$Lu = f \quad (3.30)$$

Onde L é um operador diferencial qualquer. Inicialmente, admite-se uma solução aproximada u^* e substitui-se na equação diferencial. Como u^* é uma solução aproximada, esta operação define um erro residual na equação diferencial:

$$Lu^* - f = r \quad (3.31)$$

Não se pode forçar que o resíduo r desapareça diretamente da equação mas pode-se forçar que, para um integral pesado sobre o domínio Ω da solução, o resíduo seja eliminado. Assim, o resultado do produto do termo residual e de uma função de peso w em Ω pode ser nulo:

$$I = \int_{\Omega} r \cdot w \cdot d\Omega = 0 \quad (3.32)$$

A forma usada para tornar o resíduo $Lu^* - f = r$ pequeno é anular o integral I , ou seja, anular determinadas médias pesadas.

Existem diferentes métodos para escolher a função de peso. No presente trabalho, usou-se o método de Galerkin que estabelece que as funções de peso são as funções de forma dos elementos utilizadas na aproximação de u .

Assim, o sistema global de equações a resolver é, para todo o domínio e respetiva fronteira, dado pela seguinte expressão em forma matricial:

$$[K]\{\theta\} + [C]\{\dot{\theta}\} = \{F\} \quad (3.33)$$

Nesta equação,

$[K]$ – matriz de condutibilidade térmica;

$[C]$ – matriz de calor específico;

$\{F\}$ – vetor de fluxos de calor nodais;

$\{\theta\}$ – vetor de incógnitas (temperaturas a determinar).

onde,

$$K_{ij} = K_{ij}^{\Omega} + K_{ij}^{\Gamma} \quad (3.34)$$

$$K_{ij}^{\Omega} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \lambda \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \lambda \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \cdot d\Omega^e = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} (\nabla N_i \cdot \lambda \cdot \nabla N_j) \cdot d\Omega^e \quad (3.35)$$

$$K_{ij}^{\Gamma} = \sum_{e=1}^{E_{\Gamma}} \int_{\Gamma_{\alpha_{cr}}^e} \alpha_{cr} \cdot N_i \cdot N_j \cdot d\Gamma_{\alpha_{cr}}^e \quad (3.36)$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho \cdot c_p \cdot N_i \cdot N_j \cdot d\Omega^e \quad (3.37)$$

$$F_i = \sum_{e=1}^{E_{\Gamma}} \int_{\Gamma_{\alpha_{cr}}^e} N_i \cdot \alpha_{cr} \cdot \theta_{\infty} \cdot d\Gamma_{\alpha_{cr}}^e \quad (3.38)$$

E – número total de elementos;

E_{Γ} – número de elementos com fronteira $\Gamma_{\alpha_{cr}}^e$ onde existe fluxo de calor por convecção e radiação;

N_i, N_j – funções de forma;

λ – coeficiente de condutibilidade térmica;

Ω^e – domínio elementar.

No entanto, a expressão (3.33) representa um sistema de equações que resulta apenas da discretização do domínio. Para resolver por métodos numéricos este sistema é necessária também uma discretização no tempo. Esta discretização corresponde a uma aplicação do método das diferenças finitas, baseado em duas hipóteses:

- a expressão (3.33) é satisfeita apenas em pontos discretos $t_{n+\beta}$ de cada intervalo de tempo Δt (Figura 3.6);
- as temperaturas variam linearmente ao longo do intervalo de tempo Δt , desde o instante t_n até ao instante $t_{n+1} = t_n + \Delta t$.

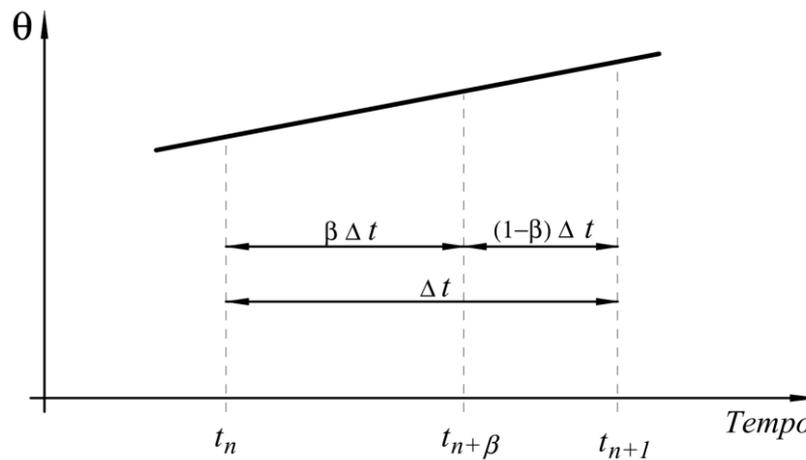


Figura 3.6 – Variação da temperatura no intervalo de tempo Δt (modificado de [DS2])

Assim, no instante $t_{n+\beta} = t_n + \beta\Delta t$,

$$\theta_{n+\beta} = \theta_n + \frac{\beta\Delta t(\theta_{n+1} - \theta_n)}{\Delta t}, \text{ com } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (3.39)$$

e, de acordo com a segunda hipótese,

$$\frac{\partial\theta_{n+\beta}}{\partial t} = \frac{\theta_{n+1} - \theta_n}{\Delta t} \quad (3.40)$$

Substituindo estas duas últimas expressões na expressão (3.33) chega-se à fórmula de recorrência,

$$\hat{K}_{n+\beta} \cdot \theta_{n+\beta} = \hat{F}_{n+\beta}, \text{ com } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (3.41)$$

onde:

$$\hat{K}_{n+\beta} = \frac{C_{n+\beta}}{\beta \cdot \Delta t} + K_{n+\beta} \quad (3.42)$$

$$\hat{F}_{n+\beta} = F_{n+\beta} + \frac{C_{n+\beta}}{\beta \cdot \Delta t} \cdot \theta_n \quad (3.43)$$

Uma vez resolvido o sistema de equações (3.41) para $\theta_{n+\beta}$ no instante $t_{n+\beta}$ as temperaturas no final do intervalo, t_{n+1} , são dadas por

$$\theta_{n+1} = \frac{\theta_{n+\beta}}{\beta} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \cdot \theta_n \quad (3.44)$$

E estas são também as temperaturas iniciais θ_n quando se avança para o intervalo de tempo seguinte.

Em função do valor do operador β obtêm-se vários esquemas de integração no tempo:

- a) esquema explícito de Euler: $\beta = 0$
- b) esquema implícito de Crank-Nicolson: $\beta = 1/2$
- c) esquema implícito de Galerkin: $\beta = 2/3$
- d) esquema implícito de Euler-Backward: $\beta = 1$

Para $1/2 \leq \beta \leq 1$ os esquemas de integração são designados de incondicionalmente estáveis, mesmo que a convergência se processe com oscilações.

Mas estas oscilações diminuem à medida que β se aproxima da unidade. Neste caso – no esquema de integração implícito de Euler Backward – não há mesmo oscilações. Em geral, a solução obtida através deste esquema de integração é subestimada. Por isso, como solução de compromisso, sugere-se o esquema de Galerkin [DS3].

No modelo desenvolvido foram implementados os últimos três esquemas por, precisamente, serem incondicionalmente estáveis.

3.4.5 Processo iterativo

A solução pretendida, com a margem de erro assumida, é obtida através de aproximações sucessivas. O método usado foi o método iterativo simples cujos passos se descrevem a seguir.

Em primeiro lugar devem ser inicializadas as variáveis e fixadas as condições iniciais:

- 1) fazer $n = 0$, $i = 0$ e $t_n = 0$;
- 2) fixar $\theta_{n+\beta} = \theta_n = \theta_0$.

Depois, para cada intervalo de tempo:

- 3) calcular as matrizes $K_{n+\beta}$ e $C_{n+\beta}$ de acordo com as equações (3.34) e (3.37), respetivamente, se $i = 0$ ou se as propriedades (ρ , c_p , λ ou α_{cr}) variarem com $\theta_{n+\beta}^i$. Caso contrário, passar para o passo 5).
- 4) Calcular a matriz $\hat{K}_{n+\beta} = \frac{C_{n+\beta}}{\beta \cdot \Delta t} + K_{n+\beta}$ apresentada anteriormente na equação (3.42).
- 5) Calcular o vetor $F_{n+\beta}$ de acordo com a equação (3.38) quando $i = 0$, quando as condições de fronteira mudarem durante o intervalo de tempo $n = n + 1$ e durante as iterações $i = i + 1$. Caso contrário, passar para o passo 7).
- 6) Calcular a matriz $\hat{F}_{n+\beta} = F_{n+\beta} + \frac{C_{n+\beta}}{\beta \cdot \Delta t} \cdot \theta_n$ apresentada anteriormente na equação (3.43).
- 7) Resolver o sistema de equações $\theta_{n+\beta}^{i+1} = \hat{K}_{n+\beta}^{-1} \cdot \hat{F}_{n+\beta}$
- 8) Verificar a convergência e a precisão dos resultados. A verificação da convergência dos resultados é realizada pela análise da diferença entre os resultados da iteração $i + 1$ e os resultados da iteração i . Quando esta diferença for menor ou igual que uma determinada tolerância, então atingiu-se a precisão nos resultados desejada.
- 9) Se não se verificou a convergência, fazer $i + 1$ e voltar ao passo 3). Caso contrário continuar para o passo 10).

- 10) Fazer $\theta_{n+\beta} = \theta_{n+\beta}^{i+1}$.
- 11) Avaliar a temperatura no instante t_{n+1} de acordo com a equação (3.44).
- 12) Se $n < N - 1$, sendo N o número total de intervalos de tempo, fazer $t_{n+1} = t_n + \Delta t$, $n = n + 1$, $i = 0$ e voltar ao passo 3). Caso contrário continuar para o passo 13).
- 13) Finalizar a análise não linear da temperatura.

3.4.6 Critérios de convergência

No ponto 8) do processo iterativo apresentado anteriormente, a verificação da convergência e a precisão dos resultados pode ser verificada de uma das seguintes formas: pela norma euclidiana ou pelo erro máximo.

Na norma euclidiana, o critério de convergência é satisfeito quando a norma da diferença entre dois resultados de iterações consecutivas, $i + 1$ e i é menor que uma determinada tolerância, ξ [em %], ou seja,

$$\frac{\|\theta_{n+\beta}^{i+1} - \theta_{n+\beta}^i\|}{\|\theta_{n+\beta}^i\|} \leq \xi \quad (3.45)$$

O critério de convergência, pelo erro máximo, é satisfeito quando a maior diferença entre dois resultados de iterações consecutivas, $i + 1$ e i é menor, em módulo, que uma determinada tolerância, ξ [em °C], ou seja,

$$|\theta_{n+\beta}^{i+1} - \theta_{n+\beta}^i| \leq \xi \quad (3.46)$$

Há que ter em conta, ainda, a estabilidade dos esquemas de integração no tempo. Foi visto, no final do subcapítulo 3.4.4 que para $1/2 \leq \beta \leq 1$, o sistema de equações é incondicionalmente estável, mesmo que a convergência se processe com oscilações. No entanto, essas oscilações podem provocar convergência para soluções numéricas que nada têm a ver com a realidade física. Esta situação pode ocorrer devido à geometria do problema, à discretização da malha dos elementos finitos ou ao intervalo de tempo adotado. Neste sentido, foram feitos estudos e surgiram algumas regras que garantem a convergência para uma solução fisicamente correta.

Assim, recomenda-se [PB3] a utilização, no esquema de integração, de um intervalo de tempo da ordem de:

$$\Delta t < \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \cdot h^2 \quad (3.47)$$

em que

Δt – intervalo de tempo a usar no esquema de integração [s];

ρ – massa específica do material [kg/m^3];

c_p – calor específico do material [$J/(kg \cdot ^\circ C)$];

λ – condutibilidade térmica do material [$W/(m \cdot ^\circ C)$];

h – dimensão característica dos elementos (distância entre dois nós muito próximos) [m].

Recomenda-se, como solução de compromisso, para não ter que recorrer ao cálculo desta expressão, que os elementos tenham uma dimensão característica inferior a 0,05 m e o intervalo de tempo seja de $\Delta t = 5$ segundos.

4 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo faz-se uma breve apresentação ilustrada do funcionamento do Fire Analysis System – programa desenvolvido neste trabalho – e são apresentados alguns resultados obtidos que, por um lado, validam o programa e, simultaneamente, permitem efetuar uma comparação crítica com os resultados propostos pelo EC2-1-2. Neste sentido, para aferir os resultados fornecidos pelo Fire Analysis System estudaram-se as mesmas secções com as mesmas propriedades térmicas indicadas no EC2. Na parte final, faz-se uma pequena análise da evolução da temperatura num ponto ao longo do tempo.

4.2 Funcionamento do programa *Fire Analysis System*

A primeira tarefa a realizar é criar uma secção, retangular ou circular. Na Figura 4.1, apresentam-se os passos a seguir para criar uma secção.

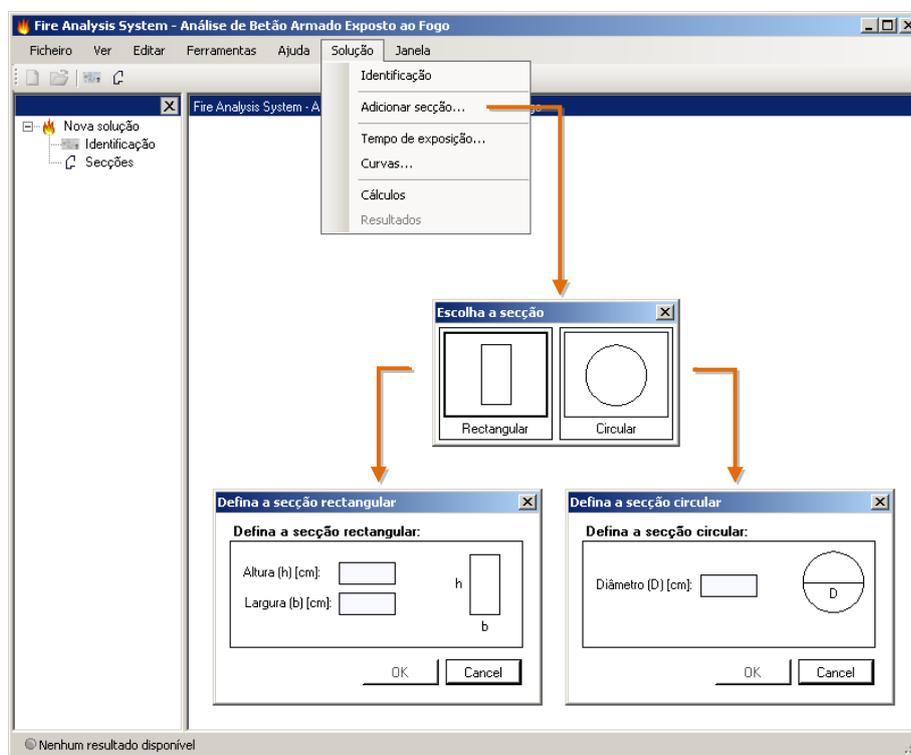


Figura 4.1 – Adição da secção

Seguidamente, são efetuadas as configurações relativas aos elementos finitos, propriedades térmicas do betão e aos métodos de integração. A Figura 4.2 mostra as várias configurações possíveis que podem ser consideradas no modelo de análise térmica.

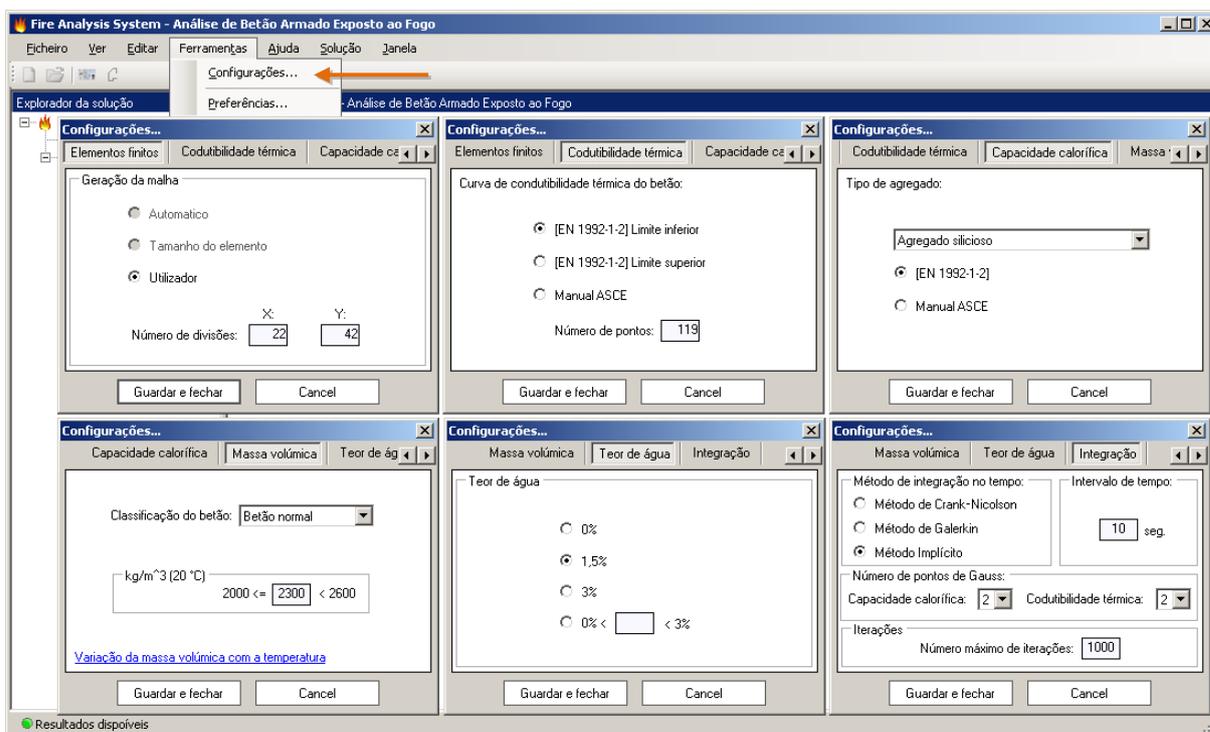


Figura 4.2 – Configurações da análise

Definida a secção e efetuadas as configurações resta indicar os tempos de exposição ao fogo que se pretendem estudar, no menu “Solução > Tempo de exposição...”.

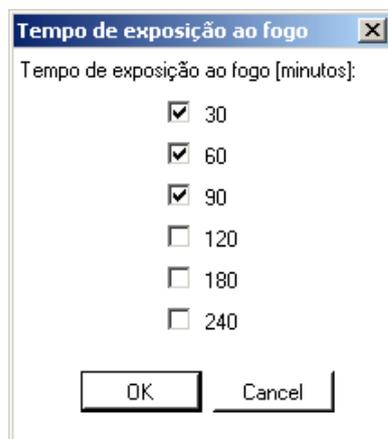


Figura 4.3 – Escolha do tempo de exposição ao fogo

De seguida devem ser efetuados os cálculos no menu “Solução > Cálculos”. A Figura 4.4 apresenta alguns estados da análise.

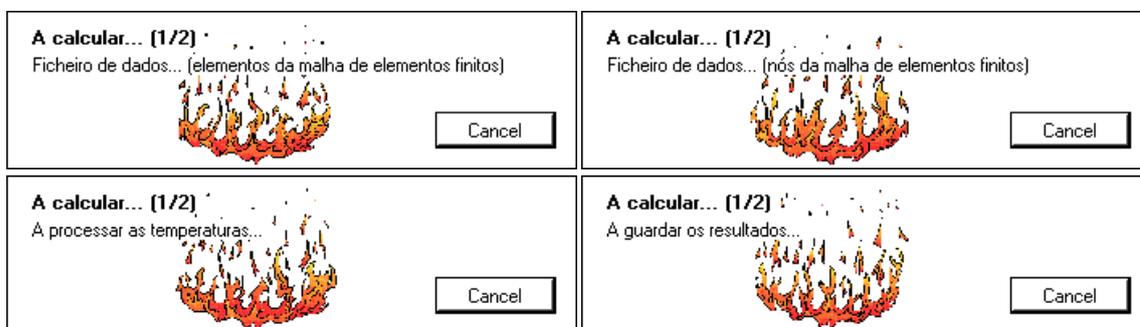


Figura 4.4 – Alguns estados da análise

Efetuada a análise térmica da secção procede-se à visualização dos resultados no menu “Solução > Resultados...”.

No menu “Solução > Curvas...” define-se o número de curvas a apresentar bem como os limites da temperatura a apresentar. Como se pode ver na Figura 4.5, é, também aqui, que se define a temperatura da isotérmica a apresentar nos tempos de exposição ao fogo pretendidos.

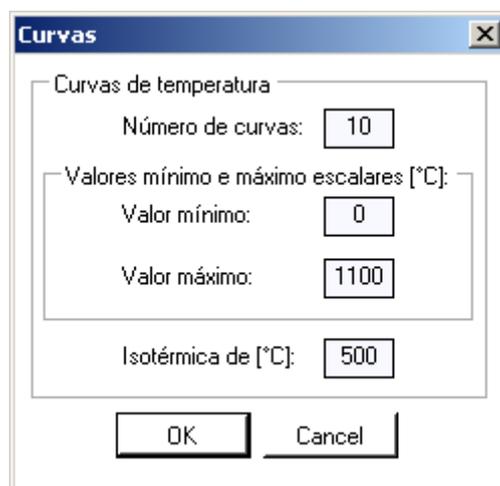


Figura 4.5 – Definição das curvas de temperatura a apresentar nos resultados

Antes de continuar com a apresentação dos resultados, é pertinente referir as propriedades térmicas do betão e o significado de cada uma. Ao mesmo tempo tecer-se-ão algumas considerações sobre a forma como o programa de análise produzido as utiliza.

4.3 Propriedades térmicas usadas na análise

As propriedades do betão que a seguir se apresentam variam em função da temperatura e dependem das suas características e composição.

4.3.1 Calor específico

Definição: O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de um determinado material que recebe uma determinada quantidade de calor. Por outras palavras, é a quantidade de energia necessária para que uma quantidade unitária de material aumente de um grau a sua temperatura. Esta grandeza varia consoante a temperatura do material como se pode verificar a seguir.

O calor específico a pressão constante, $c_p(\theta)$, do betão seco (teor de água $u = 0\%$) pode ser determinado a partir das expressões indicadas no sistema de equações (4.1) onde θ representa a temperatura do betão em [°C]. Segundo o EC2-1.2, estas expressões são válidas tanto para agregados siliciosos como para agregados calcários.

$$\begin{aligned}
 c_p(\theta) &= 900 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} && \text{para } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ }^\circ\text{C;} \\
 c_p(\theta) &= 900 + (\theta - 100) \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} && \text{para } 100 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200 \text{ }^\circ\text{C;} \\
 c_p(\theta) &= 900 + (\theta - 200)/200 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} && \text{para } 200 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400 \text{ }^\circ\text{C;} \\
 c_p(\theta) &= 1100 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} && \text{para } 400 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C.}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Quando no método de cálculo das secções transversais de betão, o teor de água não for explicitamente considerado a função anterior pode ser modelada por um valor constante, $c_{p,peak}$, situado entre os 100 °C e os 115 °C e decresce linearmente entre os 115 °C e os 200 °C:

$$\begin{aligned}
 c_{p,peak} &= 900 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} && \text{para um teor de água de } 0\% \text{ do peso do betão;} \\
 c_{p,peak} &= 1470 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} && \text{para um teor de água de } 1,5\% \text{ do peso do betão;} \\
 c_{p,peak} &= 2020 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} && \text{para um teor de água de } 3,0\% \text{ do peso do betão.}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Para outros teores de água, aceita-se a interpolação linear. A função e os picos do calor específico a pressão constante estão representados no Gráfico 4.1.

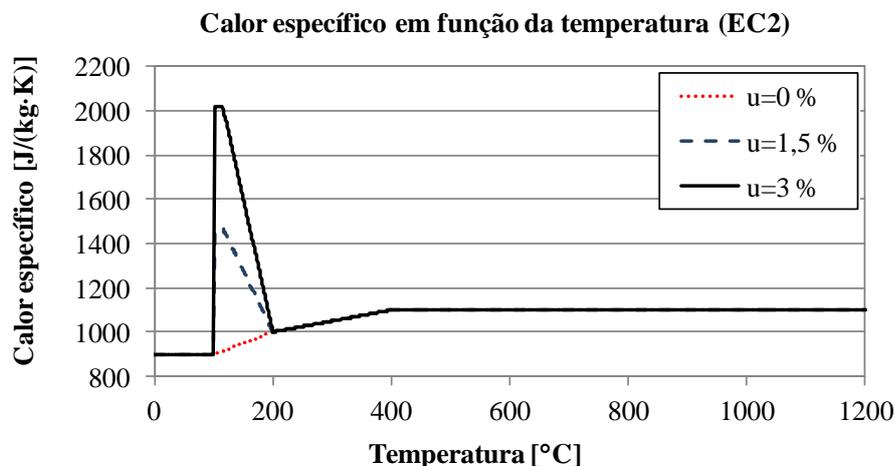


Gráfico 4.1 – Calor específico em função da temperatura e do teor de água (EC2)

Neste ponto devem ser feitas duas ressalvas relativas ao EC2-1-2. A primeira é que o calor específico é independente dos agregados, calcários ou siliciosos, usados na constituição do betão. Outra ressalva é que, apesar de serem apresentadas três curvas para o calor específico dependentes do teor de água, apenas uma – a correspondente ao teor de água de 1,5 % – é usada nos resultados respeitantes à distribuição da temperatura apresentados no Anexo A do EC2-1-2.

No Manual da ASCE o calor específico do betão é função do tipo de agregado, calcário ou silicioso, que o compõe [PB4]. No Gráfico 4.2 estão representadas as curvas da variação do calor específico do betão em função do agregado que o compõe, segundo o manual da ASCE.

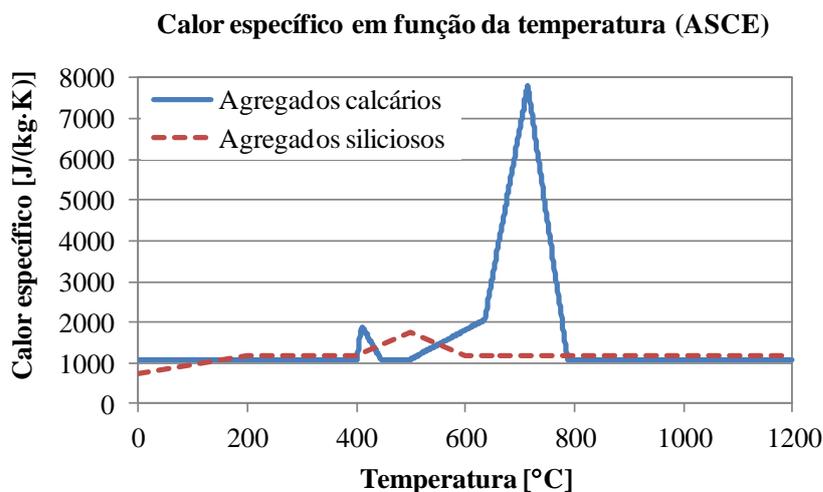


Gráfico 4.2 – Calor específico em função da temperatura e do agregado (ASCE)

No Fire Analysis System, esta propriedade passa despercebida ao utilizador comum porque depende diretamente do teor de água e do tipo de agregado (e da temperatura, mas nesta análise, pretende-se determinar a temperatura a partir das outras variáveis!). Ora, é ao definir-se o teor de água e o tipo de agregado que compõe o betão que o programa escolhe automaticamente a curva adequada que irá entrar no processo de cálculo.

4.3.2 Teor de água

Definição: o teor de água é a percentagem de água constituinte do betão por peso do elemento.

Em situação de incêndio, ao serem atingidas altas temperaturas, a água constituinte do betão começa a vaporizar e a libertar-se. No entanto, nos cálculos, assume-se que o teor de água é constante ao longo do tempo de incêndio e essa perda é contabilizada na perda de massa volúmica (ver o subcapítulo 4.3.5). No Fire Analysis System existe a possibilidade de optar por betões com qualquer teor de água compreendido entre $u = 0 \%$ e $u = 3 \%$.

4.3.3 Condutibilidade térmica

Definição: A condutibilidade térmica representa a capacidade que os corpos têm para conduzir – transmitir no seu interior – calor. Assim, um material com alta condutibilidade térmica é habitualmente usado como dissipador de calor enquanto um material com baixa condutibilidade térmica é usado como isolamento térmico por, precisamente, resistir à passagem do calor.

A condutividade térmica é mais uma das características do material que depende fortemente da temperatura. No EC2-1-2, a condutibilidade térmica do betão, λ_c , pode ser determinada entre os valores dos limites inferior e superior.

Assim, o limite superior da condutibilidade térmica, λ_c , do betão de massa volúmica normal (ver Tabela 4.1 – Classificação do betão quanto à densidade, página 49) pode ser determinada a partir da equação (4.3) onde θ é a temperatura do betão:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right) + 0,0107 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right] \text{ para } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.3)$$

Já o limite inferior da condutibilidade térmica, λ_c , do betão de massa volúmica normal pode ser determinada a partir da equação (4.4) onde θ é a temperatura do betão:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right) + 0,0057 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right] \text{ para } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

A variação do limite inferior e do limite superior da condutibilidade térmica em função da temperatura, como definida no EC2-1-2, está representada no Gráfico 4.3.

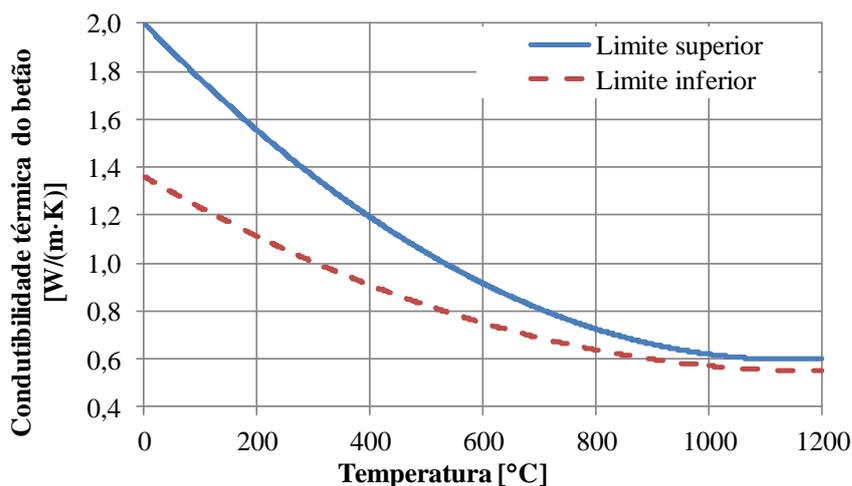


Gráfico 4.3 – Condutibilidade térmica do betão (EC2-1-2)

O manual da ASCE indica a curva apresentada no Gráfico 4.4 para a condutibilidade térmica do betão [PB4]. No gráfico pode verificar-se a existência de um patamar até aos 295 °C e, a partir desta temperatura, a condutibilidade térmica decresce linearmente até aos 1000 °C. O patamar seguinte não está definido no manual servindo apenas para questões numéricas relacionadas com o programa de cálculo.

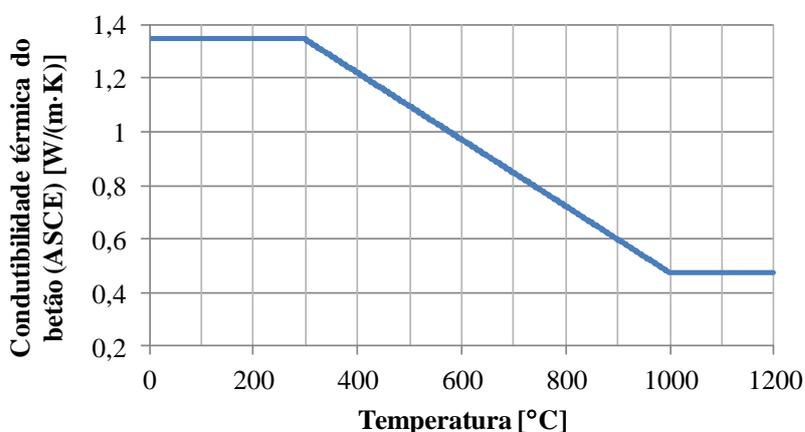


Gráfico 4.4 – Condutibilidade térmica do betão (ASCE)

No Fire Analysis System, o utilizador pode escolher uma das três curvas apresentadas para simular a condutibilidade térmica.

4.3.4 Capacidade calorífica

Definição: A capacidade calorífica é a grandeza física que determina o calor que é necessário fornecer a um corpo para produzir nele um aumento de um grau de temperatura. Esta grandeza caracteriza o corpo e não o material que o constitui.

Pode então obter-se a capacidade calorífica de um elemento estrutural através do produto entre o calor específico do material que o constitui e a massa do elemento.

No Fire Analysis System, existe a possibilidade de escolher o tipo de agregado – calcário ou silicioso – (válido apenas quando se usa o Manual da ASCE) que, por natureza, têm capacidades caloríficas diferentes e depois tratar o resultado através da escolha de uma das curvas de calor específico apresentadas pelo EC2-1-2 ou do Manual da ASCE.

4.3.5 Massa volúmica

Definição: a massa volúmica ou densidade de um corpo é o quociente entre a massa e o volume desse mesmo corpo.

Também a massa volúmica, $\rho(\theta)$, varia com a temperatura principalmente devido à perda de água. Essa variação está definida no sistema de equações (4.5) sendo que o EC2-1-2 assume que um betão normal com agregados siliciosos a 20 °C tem uma massa volúmica de $\rho(20\text{ °C}) = 2300\text{ kg/m}^3$.

$$\begin{aligned}
 \rho(\theta) &= \rho(20\text{ °C}) && \text{para } 20\text{ °C} \leq \theta \leq 115\text{ °C}; \\
 \rho(\theta) &= \rho(20\text{ °C}) \cdot (1 - 0,02 \cdot (\theta - 115)/85) && \text{para } 115\text{ °C} < \theta \leq 200\text{ °C}; \\
 \rho(\theta) &= \rho(20\text{ °C}) \cdot (0,98 - 0,03 \cdot (\theta - 200)/200) && \text{para } 200\text{ °C} < \theta \leq 400\text{ °C}; \\
 \rho(\theta) &= \rho(20\text{ °C}) \cdot (0,95 - 0,07 \cdot (\theta - 400)/800) && \text{para } 400\text{ °C} < \theta \leq 1200\text{ °C}.
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

A massa volúmica, ρ , depende do tipo de betão. A classificação do betão quanto à sua densidade está resumida na Tabela 4.1.

Classificação		Densidade (ρ) [kg/m^3 (20 °C)]
Betão leve	D1,0	$800 \leq \rho \leq 1000$
	D1,2	$1000 < \rho \leq 1200$
	D1,4	$1200 < \rho \leq 1400$
	D1,6	$1400 < \rho \leq 1600$
	D1,8	$1600 < \rho \leq 1800$
	D2,0	$1800 < \rho \leq 2000$
Betão normal		$2000 < \rho < 2600$
Betão pesado		$2600 \leq \rho$

Tabela 4.1 – Classificação do betão quanto à densidade

No Fire Analysis System existe a possibilidade de optar por qualquer betão com densidade superior a 800 kg/m^3 .

4.4 Curva de incêndio

Existem duas curvas de incêndio principais usadas no meio académico: uma reflete o incêndio real e a outra, um incêndio padronizado. Referem-se curvas de incêndio “principais” porque existem variantes. Por exemplo, existem curvas de incêndio real com ou sem *flashover* e, no caso das curvas de incêndio padronizado, existem curvas nominais de hidrocarbonetos e de incêndio exterior mas, neste trabalho, baseia-se numa única curva: a curva nominal ISO 834 (Gráfico 4.5) definida por:

$$\theta_g = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20 \quad (4.6)$$

em que:

θ_g – temperatura dos gases no compartimento de incêndio em °C;

t – tempo em minutos.

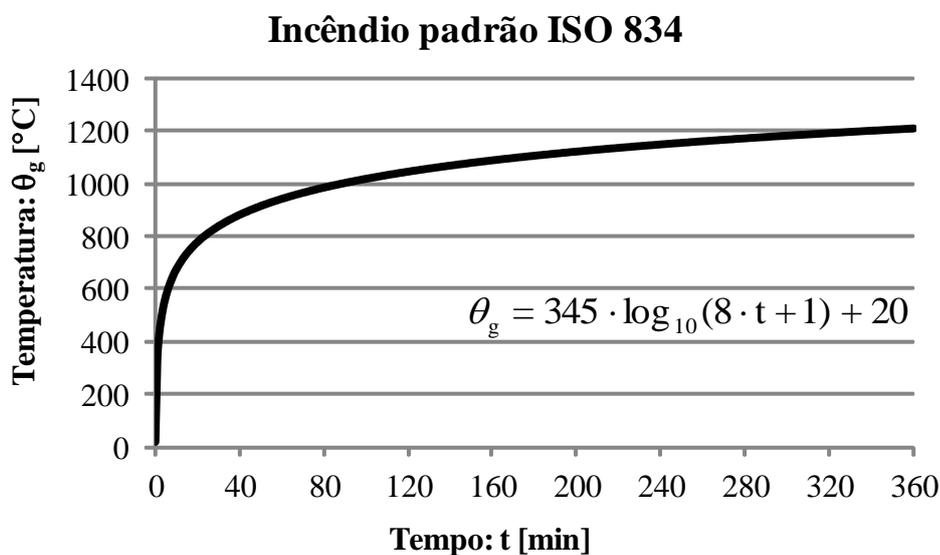


Gráfico 4.5 – Curva de incêndio padrão ISO 834

4.5 Classificação de resistência ao fogo padrão

A resistência ao fogo de um elemento de construção é definido em função do intervalo de tempo, expresso em minutos, durante o qual esse mesmo elemento, sujeito aos efeitos de um incêndio, mantém as propriedades de resistência física e mecânica para o qual foi dimensionado.

A classificação dos elementos de construção é feita levando em conta a sua função como indicado na Tabela 4.2.

Classe	Função
R	capacidade de suporte de carga
E	estanquidade a chamas e gases quentes
I	isolamento térmico
W	radiação
M	ação mecânica
C	fecho automático
S	passagem de fumo
P ou PH	continuidade de fornecimento de energia e ou de sinal
G	resistência ao fogo
K	capacidade de proteção contra o fogo

Tabela 4.2 – Classes de resistência ao fogo padrão para produtos de construção

A classificação dos elementos com funções de suporte de carga e sem funções de compartimentação resistente ao fogo é efetuada com base na Tabela 4.3.

Classificação	Duração da resistência [min]									
R	15	20	30	45	60	90	120	180	240	360

Tabela 4.3 – Classificação da resistência dos elementos de suporte ao fogo padrão

Apenas se relembra esta classificação, de elementos com capacidade de suporte de carga, porque é a que se aplica diretamente às vigas e aos pilares, elementos estruturais sujeitos ao presente estudo.

4.6 Propriedades materiais em estudo – Resultados

Todas as propriedades indicadas no ponto 4.3 são passíveis de ser alteradas, estudadas e comparadas. No entanto, no âmbito deste trabalho, efetua-se o estudo da influência de diferentes valores de calor específico, teor de água e condutibilidade térmica.

Assim, vão, inicialmente, estabelecer-se comparações com os resultados apresentados no Anexo A do EC2-1-2, para verificar a validade do modelo.

Após essa validação, serão apresentadas algumas comparações para analisar a influência dos diversos parâmetros nos resultados.

4.7 Validação do modelo e comparação com o EC2

O programa desenvolvido (Fire Analysis System) foi baseado em modelos existentes, já testados e divulgados ([DS1], [DS2] e [DS3]), recorrendo, como já foi dito anteriormente, a uma análise baseada em elementos finitos quadrangulares de oito nós do tipo *serendipity*. Considera-se, por isso, o modelo amplamente validado. Como confirmação, a própria comparação com o EC2, acaba por demonstrar essa mesma validação. Neste sentido, considera-se mais importante a comparação dos resultados obtidos pelo modelo desenvolvido e a apresentação de alguns resultados do que dissertar sobre a validação do modelo usado, testado e validado em muitas outras circunstâncias [PB2]. Dando continuidade a esta ideia, neste capítulo faz-se uma análise comparativa entre os resultados propostos pelo Anexo A do EC2-1-2 e os resultados do modelo desenvolvido. Apesar de a verificação ter sido efetuada para todas as secções apresentadas no EC2-1-2-A [PB1], aqui, a título de exemplo e numa perspetiva de extrapolação para as restantes secções – possível de realizar pelo motivo indicado (a verificação foi efetuada para todas as secções) –, apenas se apresenta a comparação para uma delas: a secção da viga $h \times b = 300 \times 160$ [mm²], correspondente às figuras A.4 a A.6 do Anexo A do EC2-1-2. Essa comparação está representada na Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8.

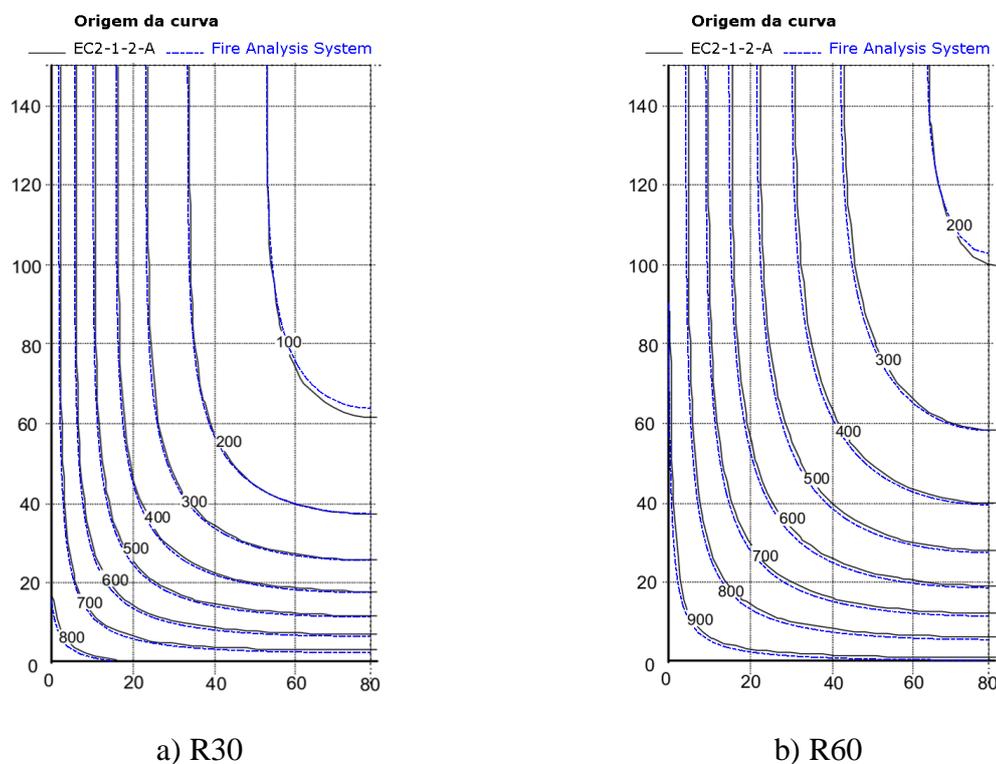


Figura 4.6 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 300 \times 160$ (mm²)

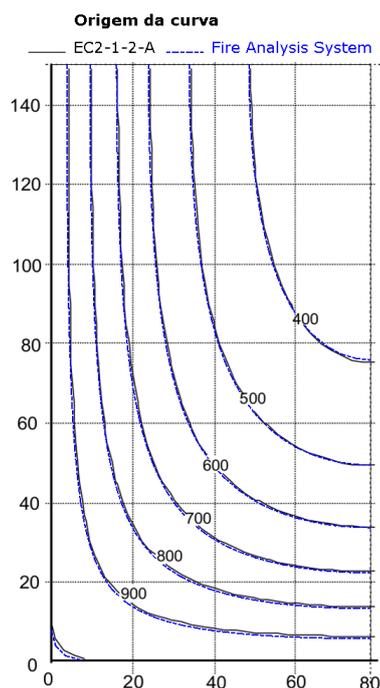


Figura 4.7 – Perfil de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 300 \times 160$ (mm²) – R90

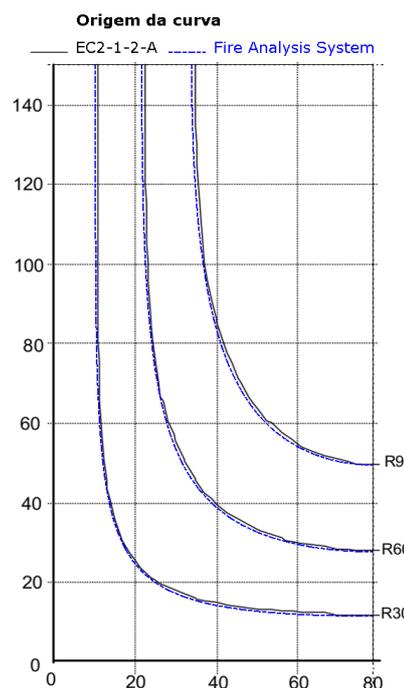


Figura 4.8 – Isotérmicas de 500 °C para uma viga $h \times b = 300 \times 160$ (mm²)

Após a visualização das figuras anteriores observam-se algumas diferenças nos resultados. A que se devem essas discrepâncias? Para responder a esta questão convém observar e separar dois tipos de divergências identificadas na Figura 4.9.

A primeira, identificada com o número 1, na figura, terá a ver com a qualidade da digitalização do documento e consequente sobreposição das imagens correspondentes aos resultados. Como se pode ver pelas imagens anteriores, algumas curvas praticamente coincidem, outras, correspondentes aos resultados do Fire Analysis System, encontram-se ligeiramente à esquerda e, noutras secções que, por opção, não se apresentam, encontram-se ligeiramente à direita. Por este motivo, esta discrepância nos resultados não foi motivo de preocupação. Contudo, a discrepância identificada com o número 2 já motivou alguma inquietação, principalmente por se desconhecer a sua origem.

Observando com atenção a figura na zona identificada com o número 2 verifica-se que a curva fornecida pelo EC2-1-2-A não é tangente à horizontal. Supõe-se que seja resultado da discretização da secção em poucos elementos finitos. No entanto poderá ser também, resultado do método de integração. É a influência dos métodos de integração que se vai avaliar de seguida.

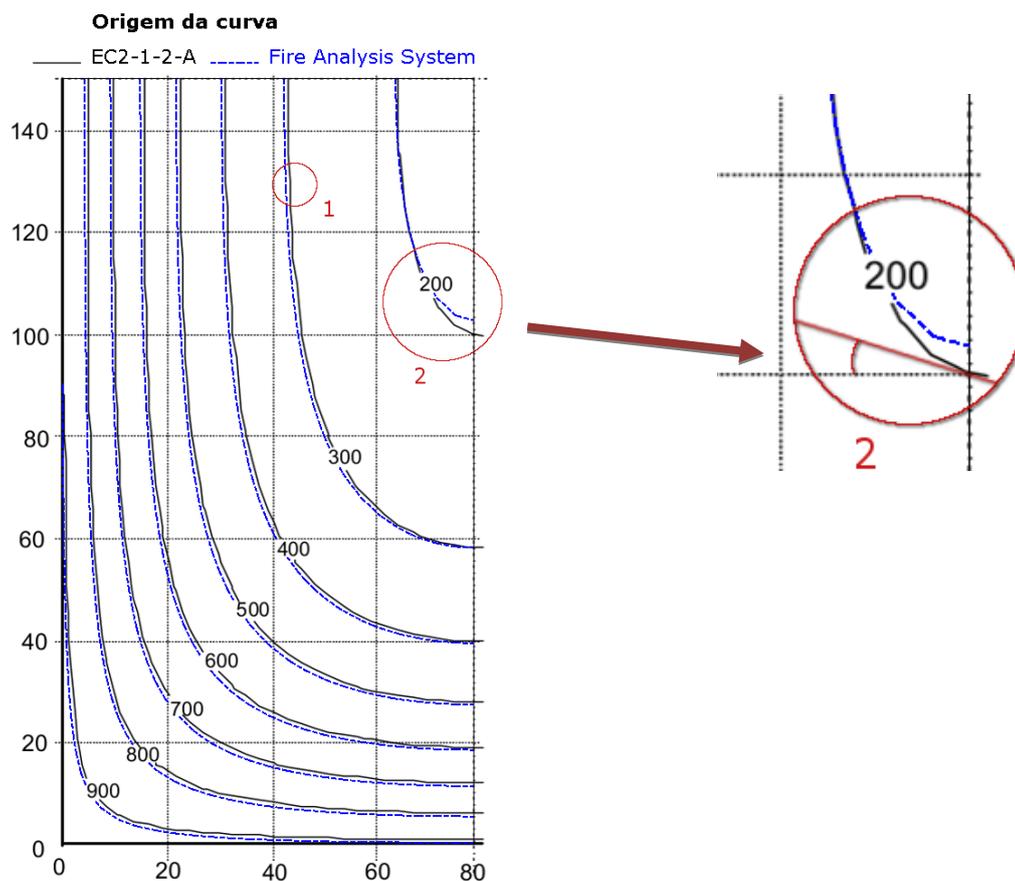


Figura 4.9 – Identificação dos dois tipos de divergências nos resultados

4.7.1 Influência dos métodos de integração no tempo

Neste capítulo pretende-se estudar a influência das opções tomadas ao nível da integração numérica no tempo nos resultados obtidos.

A necessidade deste estudo surgiu após a constatação da diferença de resultados entre o Fire Analysis System – modelo desenvolvido – e o EC2-1-2. Essa diferença, acentuada nas curvas de temperatura mais interiores, está evidenciada na Figura 4.9.

Na análise da distribuição da temperatura na secção que tem vindo a ser estudada é possível optar por um dos três métodos de integração no tempo: Método de Crank-Nicolson, Método de Galerkin ou Método Implícito. O resultado da aplicação desses três métodos está evidenciado na Figura 4.10, cuja secção e o tempo de exposição são os indicados na Figura 4.6 b).

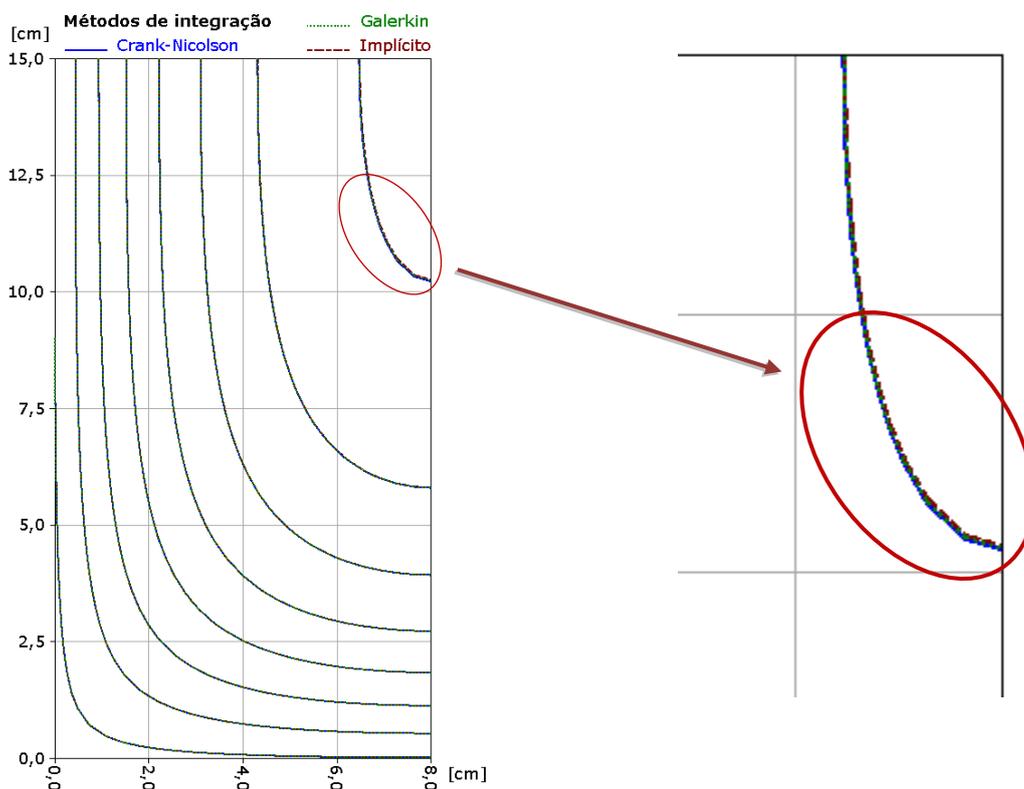


Figura 4.10 – Comparação dos resultados dos três métodos de integração no tempo

Como se pode ver, pela figura anterior, não há qualquer diferença entre os três métodos usados com a ressalva de que o método Implícito se afasta insignificamente dos outros dois (apenas) na zona interior da secção, portanto, onde a temperatura é mais baixa e, por conseguinte, a sua importância é relativizada numa situação de incêndio.

Pode, então, admitir-se que a escolha do método de integração no tempo não é motivo daquela discrepância.

Outras variáveis relacionadas com a integração no tempo (por exemplo, número de pontos de Gauss, intervalo de tempo de integração, número de iterações) e tolerâncias foram estudadas mas nenhuma evidenciou qualquer diferenciação entre as curvas.

4.7.2 Influência da discretização da secção em elementos finitos

A discretização da secção em elementos finitos é outra variável, para além dos métodos de integração, que poderia influenciar o resultado daquela forma. É essa a avaliação que está

representada na Figura 4.11, cuja secção e o tempo de exposição são os indicados na Figura 4.6 b). Foram testadas as divisões da secção em 924, 231 e 72 elementos. No entanto, pode verificar-se que também este não é o motivo daquela discrepância, uma vez, que, naquela zona, qualquer que seja a discretização, a curva converge sempre para o mesmo ponto.

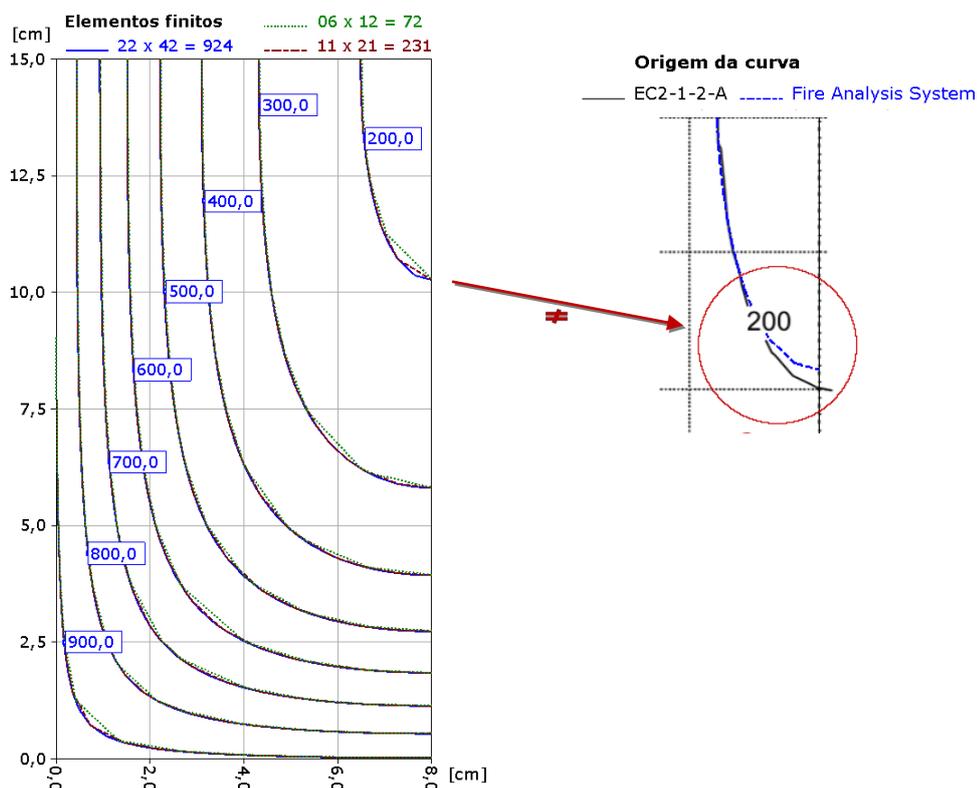


Figura 4.11 – Comparação dos resultados obtidos através de várias discretizações da secção

4.7.3 Influência do método de interpolação na determinação das curvas

A determinação das curvas dos perfis de temperatura pode ser realizada com recurso à interpolação linear entre os valores existentes nos nós da malha de elementos finitos ou com recurso às funções de forma. No Fire Analysis System está implementado o recurso às funções de forma, no entanto, via código, é possível alterar para interpolação linear. Foi o que se fez para determinar a influência dos dois métodos nos resultados. Essa influência está representada na Figura 4.12, cuja secção e o tempo de exposição são os indicados na Figura 4.6 b).

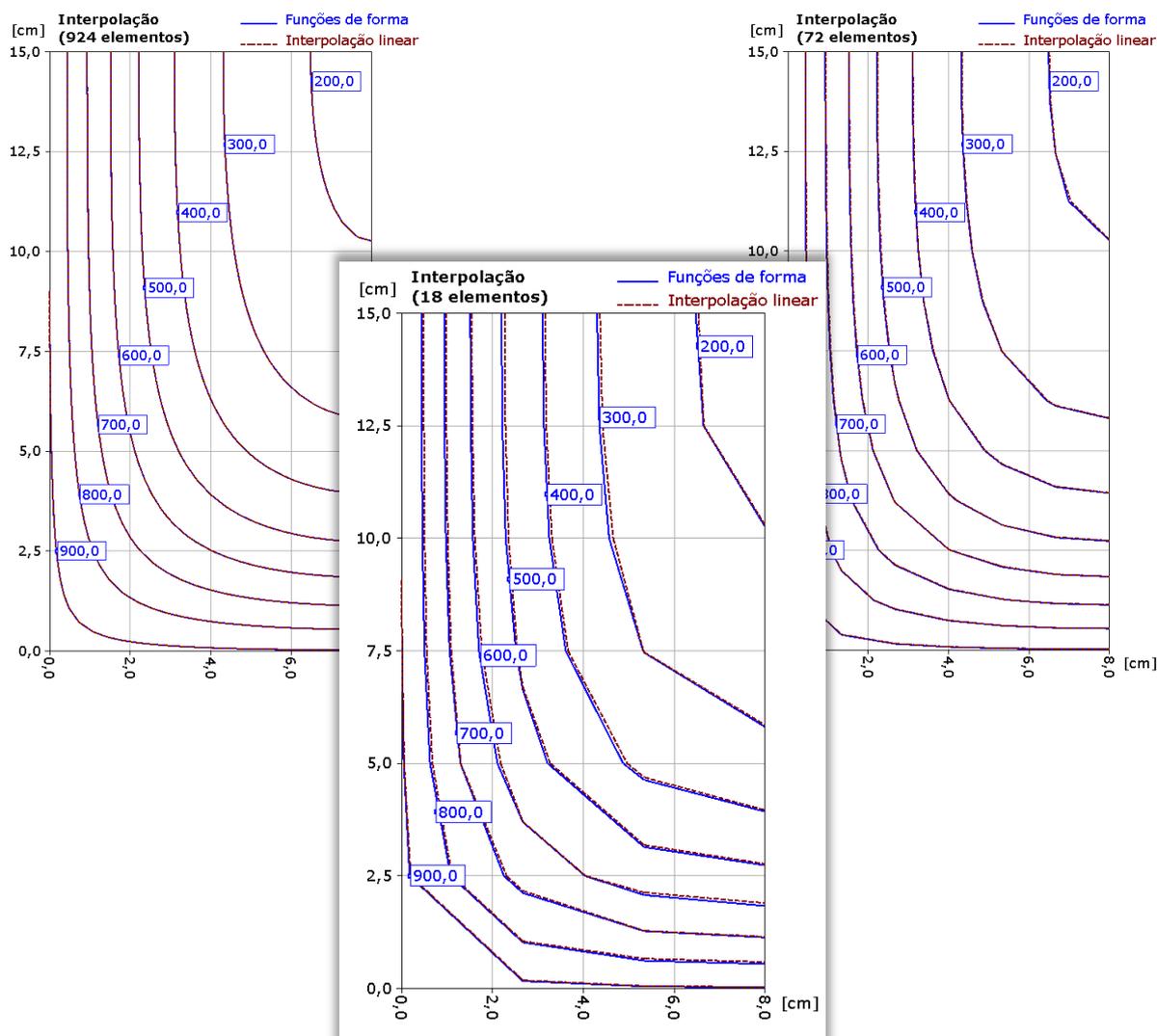


Figura 4.12 – Comparação dos resultados obtidos através dos dois métodos de interpolação

Como se pode observar, quando a secção é discretizada em 924 elementos não se verifica qualquer diferença. Aliás, a diferença entre os dois métodos numa discretização em 72 elementos é insignificante. Mesmo numa discretização em 18 elementos chega a ser irrelevante, como se pode ver na figura anterior. No entanto, esta questão não se coloca pois o programa apenas efetua a interpolação com recurso às funções de forma mas, serve o presente estudo para verificar que também não é este o motivo da diferenciação entre os resultados obtidos pelo Fire Analysis System e o EC2-1-2-A.

Conclui-se que não existe justificação para esta diferenciação dos resultados. É fundamental conhecer o modelo de cálculo adotado na elaboração dos perfis de temperatura apresentados no Anexo A da Parte 1-2 do Eurocódigo 2 para perceber se existe algum motivo concreto.

4.8 Influência das propriedades térmicas na distribuição da temperatura

Como já foi dito anteriormente, neste trabalho vai avaliar-se apenas a influência do calor específico, do teor de água e da condutibilidade térmica na distribuição da temperatura numa secção ao longo do tempo.

4.8.1 Influência da condutibilidade térmica

A escolha de uma das duas curvas da condutibilidade térmica, apresentadas no EC2-1-2, tem influência na distribuição da temperatura e, por conseguinte, no dimensionamento das secções de betão.

Considerando qualquer ponto da secção transversal, após a análise da influência que ambas as curvas da condutibilidade térmica exercem na expressão da temperatura, verifica-se que, para o mesmo tempo de exposição ao fogo, a curva do limite superior fornece valores mais elevados da temperatura do que a curva do limite inferior. Seria de esperar este resultado pela análise das curvas da condutibilidade térmica (Gráfico 4.3, página 47) que, para o mesmo valor de condutibilidade térmica, o valor da temperatura é mais elevado na curva do limite superior. Mas, se era de esperar este resultado, então para quê estudá-lo? Bem! Por um lado existe a necessidade de quantificar (pelo menos qualitativamente) a diferença entre os dois resultados, por outro, o Anexo Nacional português do EC2-1-2 estipula o limite superior da condutibilidade térmica do betão como propenso a ser adotado para betões de massa volúmica normal ou betões de alta resistência, apropriando o uso dos perfis de temperatura indicados no Anexo A aos betões leves. É de salientar que as temperaturas determinam a capacidade resistente da secção através das leis constitutivas do material e das deformações térmicas equivalentes a deformações inicialmente impostas. Portanto, não é indiferente usar uma ou outra curva.

Como resultado desta observação achou-se pertinente apresentar os perfis de temperatura relativos ao limite superior da condutibilidade térmica, uma vez que o Anexo A do EC2-1-2 apenas apresenta os resultados para o limite inferior. Assim, apresentam-se essas curvas, no Anexo A deste documento numa perspectiva de comparação com os perfis de temperatura originados a partir da curva do limite inferior da condutibilidade térmica. Nos perfis apresentados, varia apenas a condutibilidade térmica, mantendo-se todas as outras variáveis constantes e com os mesmos valores indicados no mesmo Anexo.

4.8.2 Influência do teor de água

Nos elementos de betão, quando expostos a uma situação de incêndio, o teor de água contribui beneficemente, uma vez que quanto mais seco o betão estiver, maior é o gradiente de temperatura. Significa isto que para um determinado tempo de exposição ao fogo e para um dado ponto da secção, a temperatura nesse ponto é tanto maior quanto menor for o teor de água no elemento de betão. Esta situação pode ser visualizada na Figura 4.13 que representa uma seção de betão exposta durante 30 minutos ao fogo e na Figura 4.14 que representa as isotérmicas de 500 °C para exposições de 30, 60 e 90 minutos.

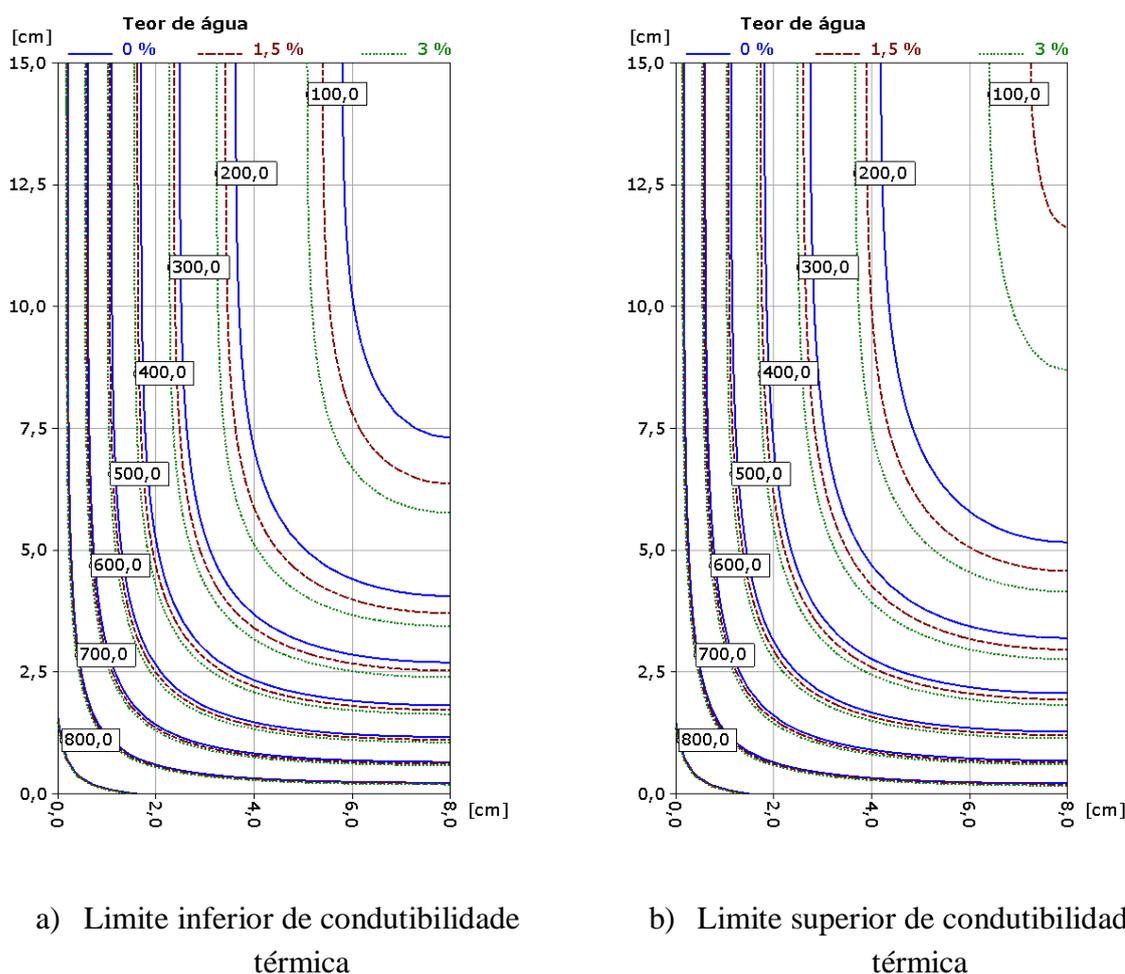


Figura 4.13 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm²] – R30

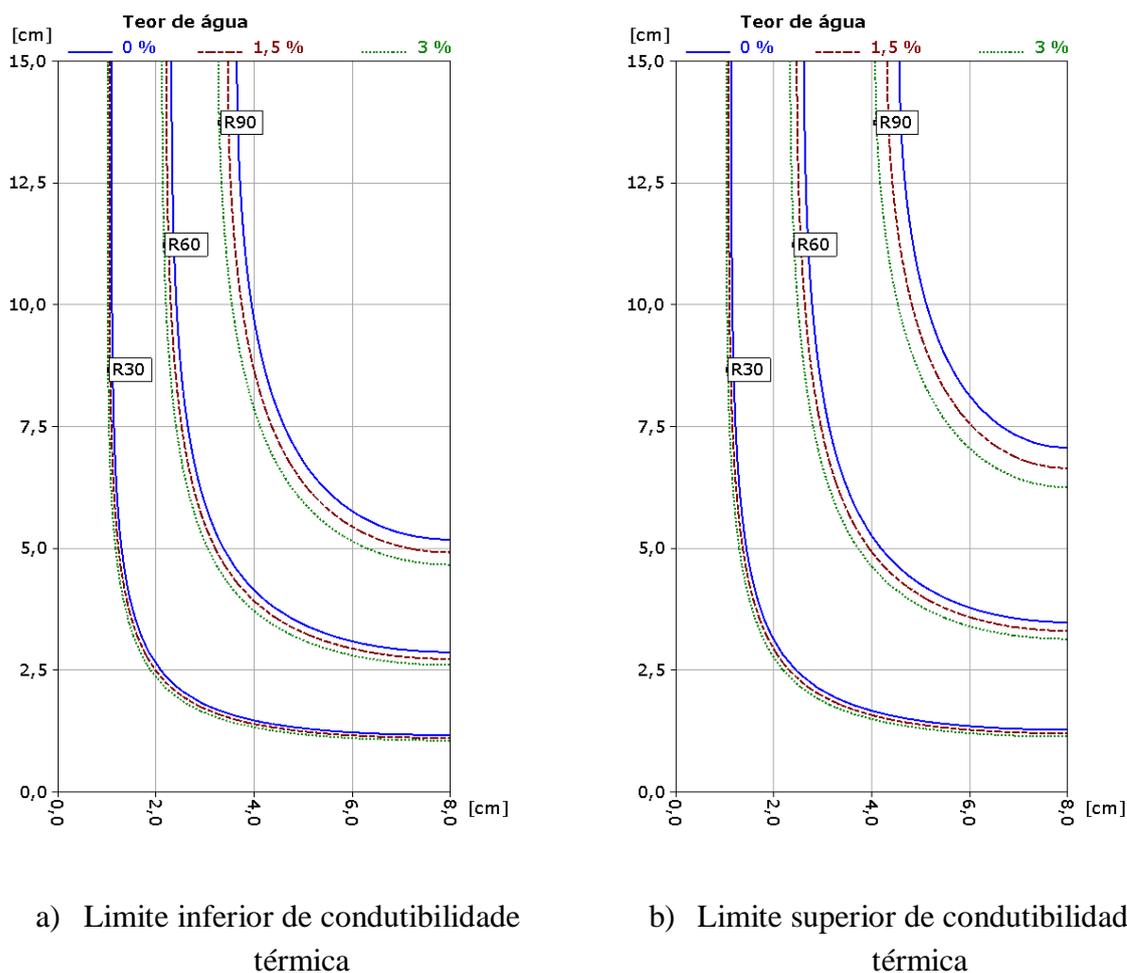


Figura 4.14 – Isotérmicas de 500 °C para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm²]

De forma a quantificar a influência do teor de água na distribuição da temperatura mostra-se, na Tabela 4.4, a comparação entre as profundidades de penetração da temperatura resultantes dos diferentes teores de água, de 0 % e 3 %, tendo por base as Isotérmicas de 500 °C (apresentadas na Figura 4.14) e, como referência, o teor de água de 1,5 %.

Condutibilidade térmica		Limite inferior		Limite superior	
		0 %	3 %	0 %	3 %
Tempo de exposição	Teor de água				
	R30	+0,55 %	-0,51 %	+0,67 %	-0,58 %
	R60	+1,31 %	-1,06 %	+1,83 %	-1,69 %
R90	+2,37 %	-2,30 %	+3,11 %	-3,03 %	

Tabela 4.4 – Profundidade das isotérmicas de 500 °C relativamente ao teor de água de 1,5 %

Na tabela anterior, o sinal “+” significa mais profundo e o sinal “-” significa menos profundo relativamente à curva de 1,5 % de teor de água.

4.8.3 Influência do calor específico

Referir a influência do calor específico é o mesmo que referir, de uma forma indireta, a influência da utilização de diferentes materiais na composição do betão, nomeadamente, a utilização de agregados calcários ou agregados siliciosos. Como referido no ponto 4.2.1 o Eurocódigo 2 assume o mesmo valor de calor específico para ambos os materiais. Desta forma não é possível determinar a influência do calor específico na distribuição da temperatura numa secção de betão através do EC2-1-2. Esta comparação só é possível usando o Manual da ASCE. Por esse motivo, este estudo vai ser realizado com recurso às curvas de calor específico e de condutibilidade térmica propostas pelo Manual da ASCE, identificadas anteriormente na secção 4.2 deste documento.

Não é objetivo deste trabalho efetuar um estudo exaustivo sobre o método usado pelo Manual da ASCE. Por isso, fica aqui uma breve comparação dos resultados com o EC2-1-2. Assim, da Figura 4.15, podemos retirar duas conclusões importantes:

- Os resultados apresentados no Anexo A do EC2-1-2 são idênticos aos resultados provenientes do Manual da ASCE para materiais calcários.
- O calor específico dos materiais, nomeadamente materiais calcários e siliciosos, não exerce grande influência nos resultados.

Acrescentam-se, ainda, algumas observações que podem ser feitas acerca dos resultados: a isotérmica dos 500 °C, ao fim de 30 minutos de exposição, para materiais siliciosos (ASCE) é totalmente coincidente com a curva do limite inferior da condutibilidade térmica do EC2-1-2 (teor de água de 1,5 %). À medida que aumenta o tempo de exposição, aumenta também o gradiente entre as mesmas curvas. Já as curvas dos materiais calcários (ASCE) vão mantendo-se sempre próximas das do limite inferior da condutibilidade térmica apresentadas pelo EC2-1-2.

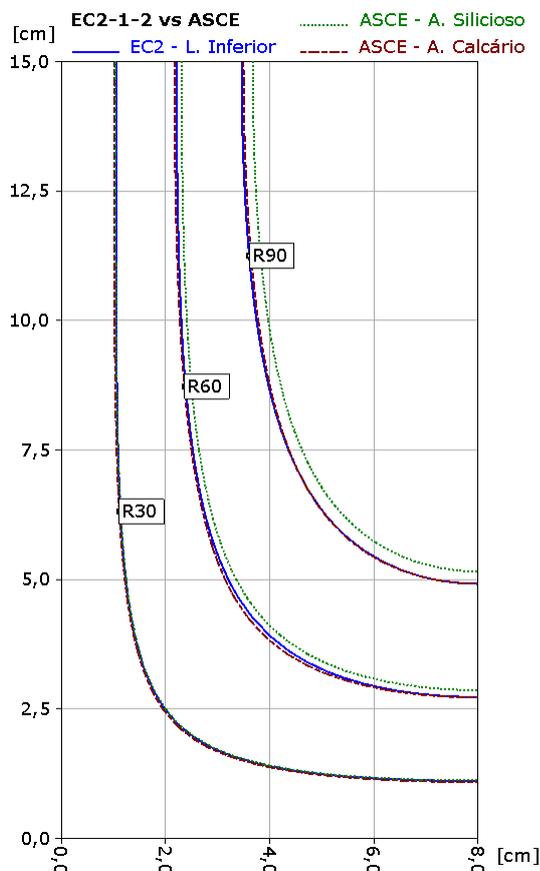
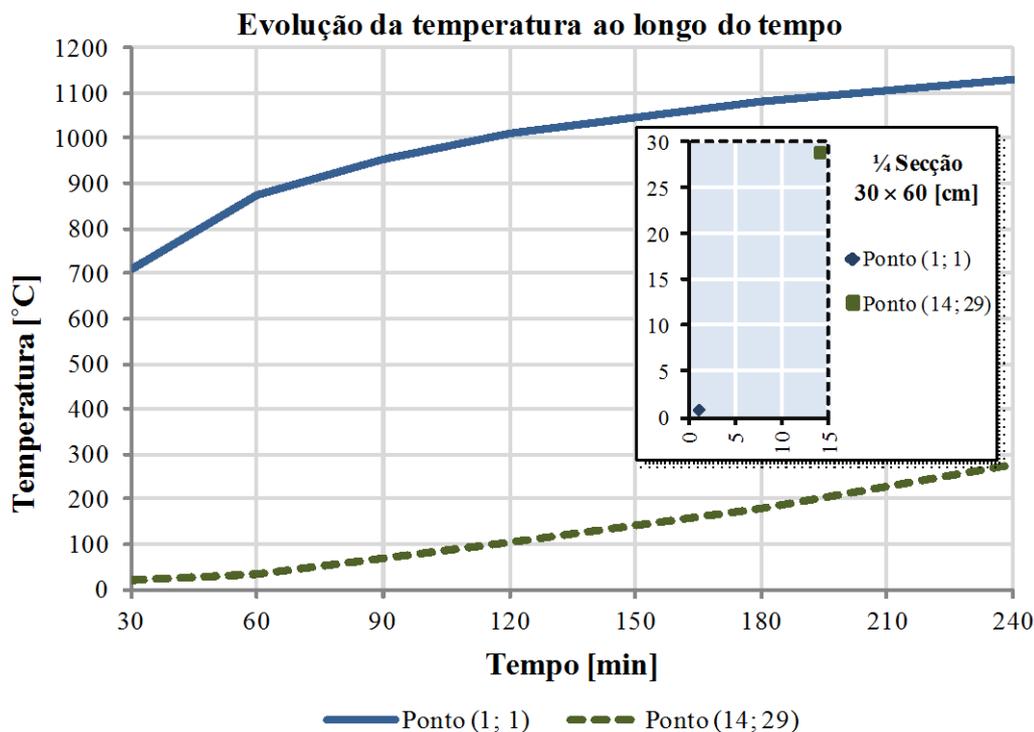


Figura 4.15 – Comparação entre o EC2-1-2 e o Manual da ASCE: Isotérmicas de 500 °C para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm²]

4.9 Evolução da temperatura num ponto ao longo do tempo

Este capítulo surge na sequência da implementação do módulo de análise da temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo em qualquer ponto de uma secção no Fire Analysis System. Após a análise de alguns pontos verificou-se que enquanto uns seguiam uma lei exponencial, outros pontos seguiam uma lei logarítmica do aumento de temperatura ao longo do tempo. Como exemplo, no Gráfico 4.6, são indicadas duas curvas: uma, referente ao ponto (1; 1), tem um crescimento logarítmico; a outra, referente ao ponto (14; 29), tem um crescimento exponencial.



Ponto [cm]		Tempo [min]					
		30	60	90	120	180	240
X	Y	Temperatura [°C]					
1	1	710,303	872,976	955,140	1009,444	1082,196	1131,689
14	29	20,740	35,436	67,666	104,326	181,146	279,317

Gráfico 4.6 – Evolução da temperatura ao longo do tempo em dois pontos

Após esta constatação lançaram-se as seguintes questões: Existe algum ponto da secção que tenha um aumento linear de temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo? Se existir, onde se localiza esse ponto? Como se determina esse ponto? Qual a sua utilidade/aplicabilidade prática?

Para responder a estas questões, analisou-se a secção da viga 60×30 [cm²] com as mesmas propriedades térmicas e sujeita às mesmas condições que as indicadas no EC2-1-2-A. Após uma análise exaustiva, representou-se, no Gráfico 4.7, a localização geométrica dos pontos que sofrem um aumento (aproximadamente) linear de temperatura (representados através de uma linha) e as regiões onde esse aumento é não linear. Os pontos pertencentes à zona do gráfico preenchida a cheio sofrem um aumento logarítmico da temperatura e os pontos pertencentes à zona com padrão quadrangular estão sujeitos a um aumento exponencial da temperatura ao longo do tempo.

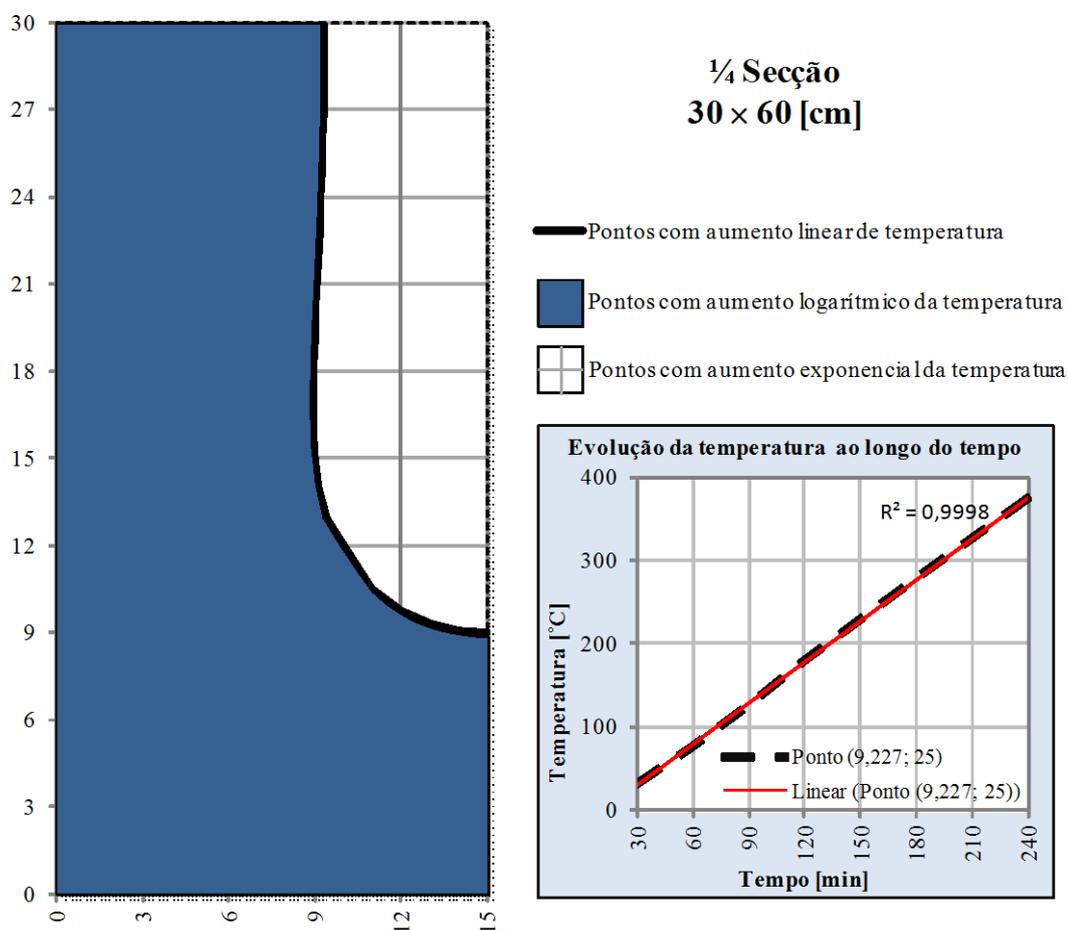


Gráfico 4.7 – Representação do tipo de aumento da temperatura ao longo do tempo

A linearidade do aumento da temperatura com o passar do tempo de exposição ao fogo num determinado ponto foi verificada com recurso à linha de tendência, como está representado no canto inferior direito do gráfico anterior. Nesse sentido, reservaram-se os valores que apresentavam um coeficiente de correlação, R^2 , superior a 0,999, pois a correlação é perfeita – os pontos estão sobre uma linha reta – quando $R^2 = 1$. Os Pontos usados para construir a curva identificada anteriormente encontram-se discretizados na Tabela 4.5.

Ponto [cm]		Tempo [min]						Correlação R ²
X	Y	30	60	90	120	180	240	
		Temperatura [°C]						
9,322	30,000	31,271	75,683	124,502	176,202	273,566	367,169	0,9998804
9,318	29,000	31,296	75,752	124,605	176,345	273,777	367,463	0,9998808
9,306	28,000	31,370	75,959	124,917	176,773	274,440	368,345	0,9998816
9,287	27,000	31,488	76,287	125,420	177,472	275,517	369,809	0,9998830
9,261	26,000	31,652	76,744	126,120	178,459	277,058	371,873	0,9998840
9,227	25,000	31,869	77,347	127,051	179,782	279,150	374,626	0,9998843
9,188	24,000	32,123	78,055	128,179	181,383	281,756	378,014	0,9998832
9,143	23,000	32,421	78,892	129,529	183,336	284,967	382,144	0,9998799
9,094	22,000	32,752	79,836	131,104	185,641	288,830	387,032	0,9998731
9,044	21,000	33,099	80,851	132,861	188,284	293,334	392,668	0,9998612
8,994	20,000	33,454	81,945	134,825	191,317	298,567	399,133	0,9998427
8,952	19,000	33,763	83,004	136,871	194,621	304,389	406,270	0,9998152
8,921	18,000	34,004	84,020	139,011	198,256	310,850	414,138	0,9997767
8,906	17,000	34,145	84,979	141,238	202,287	317,968	422,730	0,9997240
8,924	16,000	34,077	85,675	143,296	206,423	325,371	431,686	0,9996562
8,993	15,000	33,713	85,975	144,999	210,485	332,775	440,694	0,9995713
9,127	14,000	33,063	85,946	146,455	214,550	340,196	449,742	0,9994702
9,366	13,000	32,091	85,461	147,424	218,198	347,072	458,261	0,9993600
10,000	12,026	29,861	81,523	142,768	214,945	346,460	459,165	0,9992300
11,000	10,460	30,036	83,910	148,234	223,924	359,326	474,152	0,9991485
12,000	9,706	31,284	86,219	151,489	227,673	364,257	479,803	0,9991635
13,000	9,280	32,667	88,258	153,788	229,662	366,609	482,432	0,9992028
14,000	9,056	33,664	89,628	155,196	230,673	367,693	483,613	0,9992354
15,000	8,983	34,037	90,152	155,740	231,069	368,105	484,040	0,9992468
Mínimo		29,861	75,683	124,502	176,202	273,566	367,169	0,9991485
Máximo		34,145	90,152	155,740	231,069	368,105	484,040	0,9998843

Tabela 4.5 – Pontos da curva com aumento linear de temperatura ao longo do tempo

Nesta tabela, são também indicadas as temperaturas nesses pontos ao fim de diferentes períodos de tempo de exposição, o que permitiu determinar o coeficiente de correlação (última coluna da tabela) para aferir a linearidade do crescimento da temperatura ao longo do tempo.

Na curva apresentada pode verificar-se a existência de uma “barriga” identificada no Gráfico 4.8.

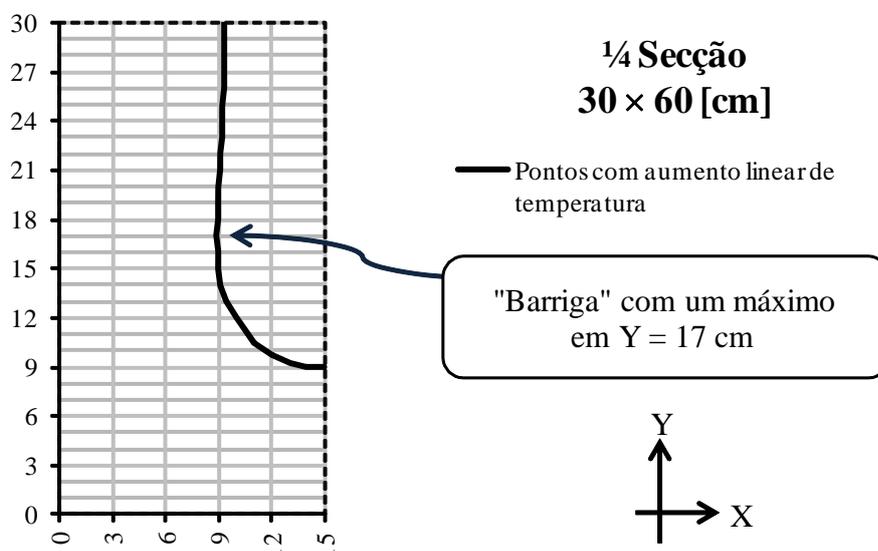


Gráfico 4.8 – Identificação da “Barriga” na curva dos pontos com aumento linear de temperatura ao longo do tempo

A que se deve esta “barriga”? Bem! O tempo dedicado a este estudo foi relativamente curto pois trata-se de um módulo acrescentado *a posteriori* por se entender ser de grande utilidade, por exemplo, para determinar a temperatura na zona das armaduras. De resto, foi a curiosidade do autor que trouxe este assunto à discussão, através das questões enunciadas no segundo parágrafo deste capítulo.

A existência desta “barriga” pode dever-se ao método de determinação dos pontos. Sabe-se que não é o mais correto, mas foi o que exigiu menor esforço de cálculo. Expõe-se, aqui, a forma como foram determinados esses pontos.

À partida tem-se um sistema complexo com três variáveis, $P = F(X; Y; R^2)$ – quer dizer: o ponto é determinado em função das coordenadas X e Y e do coeficiente de correlação, R^2 , entre a temperatura e o tempo de exposição.

A estratégia foi a de fixar uma das coordenadas e depois ajustar a outra para a melhor correlação temperatura-tempo de exposição.

Desta forma começou-se por fixar a ordenada $Y = 30$ cm. Depois, para cada abcissa X verificou-se a correlação e reservou-se a abcissa X que fornecia a melhor correlação. Seguidamente fixou-se outro Y ($Y = 29$) e procedeu-se da mesma forma. O processo foi análogo para os restantes pontos indicados na Tabela 4.5.

Para se obterem os pontos com as melhores correlações deveria fixar-se a abcissa X obtida e procurar a outra ordenada Y que correspondesse a um coeficiente de correlação superior ao encontrado. Entrava-se, desta forma, num ciclo iterativo que levaria muito tempo a resolver.

A título de exemplo, observe-se a Tabela 4.6. O ponto (9,227; 25,000) foi obtido por imposição da ordenada Y = 25. Se após obtida a abcissa continuássemos o processo, escolhendo para essa abcissa uma nova ordenada e depois outra abcissa e assim sucessivamente até alcançar um melhor coeficiente de correlação temperatura-tempo de exposição, obteríamos o ponto (9,228; 25,023) indicado na mesma tabela.

O mesmo procedimento poderia ser usado para outros pontos. No entanto, como esta procura não está implementada no programa (ainda!), o processo teria que ser manual e, por isso, dispendioso em termos de tempo.

Ponto [cm]		Tempo [min]						Correlação R ²
X	Y	30	60	90	120	180	240	
		Temperatura [°C]						
9,227	25,000	31,869	77,347	127,051	179,782	279,150	374,626	0,9998842628
9,228	25,023	31,863	77,330	127,023	179,743	279,091	374,550	0,9998842633

Tabela 4.6 – Comparação entre a correlação de um ponto de ordenada imposta e outro obtido por aproximações sucessivas

Por último, qual a aplicabilidade prática deste conhecimento? A determinação da correlação que gere as variações de temperatura no tempo nos diferentes pontos da secção pode ser importante para determinar a localização ótima das armaduras na secção, uma vez que uma análise de sensibilidades poderá exigir a equação que aproxima essas variações de temperatura.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de uma aplicação que fornecesse os perfis de temperatura em qualquer secção e em qualquer instante de tempo. Por limitação do tempo disponível para um trabalho desta natureza – Dissertação de Mestrado Integrado –, restringiu-se, à partida, o desenvolvimento da análise a secções retangulares e circulares.

A análise térmica foi conseguida por aplicação de métodos numéricos com recurso a elementos finitos bidimensionais de 8 nós do tipo *serendipity*. Estes métodos são essências para a resolução de problemas deste tipo, de transferência de calor, porque algumas propriedades térmicas do material ou mesmo os coeficientes de transferência de calor dependem, de uma forma não linear, da temperatura e do tempo, portanto, em regime transitório.

A definição dos elementos finitos para a secção circular foi verdadeiramente desafiadora mas resultou numa malha simples onde a numeração dos nós é realizada precisamente da mesma forma que a numeração dos nós para a secção retangular. Desta forma conseguiram-se vantagens óbvias em termos de programação.

A solução do problema de transferência de calor passou pela resolução das equações que regem o problema físico na sua formulação fraca com recurso ao método dos resíduos pesados proposto por Galerkin que estabelece que as funções de peso são as funções de forma dos elementos.

A este respeito há ainda a dizer que apesar de os resultados não serem exatos, eles podem ser tão aproximados quanto se queira. Para o utilizador da aplicação desenvolvida, essa aproximação traduz-se na definição dos elementos finitos: quanto maior for a divisão da secção, melhor será o resultado.

A curva de incêndio usada para definir a temperatura ao longo do tempo foi a curva padrão ISO 834.

Estabelecidos estes pressupostos, e notando que algumas conclusões importantes foram apresentadas ao longo dos capítulos anteriores convém referir aqui, de uma forma sucinta, as principais conclusões a reter deste trabalho.

Assim, compararam-se os resultados com os perfis de temperatura propostos pelo Anexo A da Parte 1-2 do EC2 e concluiu-se que o modelo desenvolvido apresenta ótimos resultados nessa comparação.

Quanto à influência das propriedades térmicas na distribuição da temperatura conclui-se o seguinte:

- relativamente à condutibilidade térmica, a curva do limite superior fornece valores mais elevados da temperatura do que a curva do limite inferior;
- quanto ao teor de água, a temperatura num determinado ponto da secção é tanto maior quanto menor for o teor de água no elemento de betão;
- no que diz respeito ao calor específico, o EC2 utiliza o mesmo valor de calor específico tanto para materiais calcários como para siliciosos. Já o Manual da ASCE faz essa distinção. No entanto, na prática, essa distinção não é relevante. Contudo, pode-se afirmar que comparando os perfis de temperatura, surgem valores mais elevados para um mesmo ponto de uma secção quando se usam materiais siliciosos em contraste com materiais calcários.

Quando se analisa a evolução da temperatura ao longo do tempo, verifica-se que a zona periférica da secção tem um aumento logarítmico da temperatura enquanto a zona central tem um crescimento exponencial.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Como inspiração para desenvolvimentos futuros, sugerem-se duas situações distintas: uma com componente prática e a outra, maioritariamente teórica. A primeira corresponde à implementação de novos módulos no programa desenvolvido; a segunda sugere o seguimento de determinado estudo.

Assim, para otimizar a utilidade do programa desenvolvido sugere-se a implementação de novos módulos:

- um módulo que permita modelar outras secções ou um módulo que modele uma secção genérica;
- um módulo de análise a partir das condições propostas pelo Manual da ASCE;
- um módulo que permita a implementação de outras curvas de incêndio;
- um módulo que permita o estudo de outros materiais para além do betão;
- um módulo para simular problemas termodinâmicos.

O Capítulo 4 termina com uma questão pertinente e o último parágrafo sugere, ele próprio, a continuação do estudo das correlações que gerem as variações de temperatura ao longo do tempo nos diferentes pontos da secção. Supõe-se que essas correlações possam ser importantes para otimizar a localização das armaduras na secção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1 [DS] Dissertação/Tese de Mestrado

- [DS1] Bernardes, Filipe da Silva (2008). “Análise Termodinâmica de Pilares de Aço e Mistos de Aço e Betão em caso de Incêndio”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [DS2] Ribeiro, José Carlos Lopes (2004). “Simulação Via Método dos Elementos Finitos da Distribuição Tridimensional de Temperatura em Estruturas em Situação de Incêndio”. Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas.
- [DS3] Vila Real, Paulo Jorge de Melo Matias Faria de (1988). “Modelação por Elementos Finitos do Comportamento Térmico e Termo-Elástico de Sólidos Sujeitos a Elevados Gradientes Térmicos”, Tese apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Estrutural pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

6.2 [PB] Publicação

- [PB1] Ferreira, C., Barros, H., Albino, C. e Vila Real, P. “Influência da condutibilidade e da humidade nas temperaturas e na resistência ao fogo de secções de betão armado”. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. LNEC. 2012.
- [PB2] Ferreira, C., Barros, H., Albino, C. e Vila Real, P. “Thermal Comparative Analysis for Fire Design of Reinforced Concrete Elements – Influence of EC2 parameters”. International Conference on Recent Advances in Nonlinear Models – Structural Concrete Applications (CoRAN2011), Coimbra, Portugal, 669-680. 2011.
- [PB3] Huang, H. C. e Usmani, A. S. “Finite elemento analysis of heat transfer”. Springer-Verlag London Limited, 1994.
- [PB4] Kodur, V. K. R., Dwaikat, M. “A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams”, Cement & Concrete Composites, 2007.

6.3 [RG] Regulamento

- [RG1] CEN, 2000 – Concrete– Part 1: Specification, performance, production and conformity, European Standard EN 206-1, *Commission of the European Communities*, Bruxelas, 2000.
- [RG2] CEN, 2002 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, European Standard EN 1991-1-2, *Commission of the European Communities*, Bruxelas, 2002.
- [RG3] CEN, 2003 – Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – structural fire design, European Standard prEN 1992-1-2, *Commission of the European Communities*, Bruxelas, 2003.

6.4 [SI] Site de Internet

- [SI01] Átomo e meio. <<http://atomoemeio.blogspot.com/2009/05/espectro-electromagnetico.html>>. Acesso em 10 de Novembro de 2011.
- [SI02] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao_de_Calor_em_Edificacoes.pdf>. Acesso em 10 de Novembro de 2011.
- [SI03] Métodos numéricos. <<http://www.uv.es/diaz/mn/fmn.html>>. Acesso em 30 de Setembro de 2011.
- [SI04] Universidade Federal do Paraná. <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9.html>>. Acesso em 08 de Novembro de 2011.
- [SI05] University of Colorado Boulder. <<http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/IFEM.Ch18.d/IFEM.Ch18.pdf>>. Acesso em 15 de Novembro de 2011.
- [SI06] Wikipédia. <[http://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Francisco_\(Calif%C3%B3rnia\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Francisco_(Calif%C3%B3rnia))>. Acesso em 29 de Setembro de 2011.

6.5 [TD] Tese de Doutoramento

[TD1] Caldas, Rodrigo Barreto (2008). “Análise Numérica de Estruturas de Aço, Concreto e Mistas em Situação de Incêndio”. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia de Estruturas", Belo Horizonte.

7 ANEXOS

A – Influência da condutibilidade térmica na distribuição da temperatura

Este anexo apresenta os perfis de temperatura para as vigas e pilares cujas secções transversais estão indicadas no Anexo A da Parte 1-2 do Eurocódigo 2.

Pretende-se analisar a influência da condutibilidade térmica na distribuição da temperatura ao longo da secção. Esta vai ser a única variável, mantendo-se todas as outras propriedades constantes ao longo da análise.

A.1. Propriedades constantes na análise

As figuras baseiam-se nos valores indicados a seguir:

- o calor específico do betão é o correspondente à curva cujo teor de água é 1,5 %;
- a emissividade da superfície do betão é de 0,7;
- o coeficiente de convecção é $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

A.2. Geometria

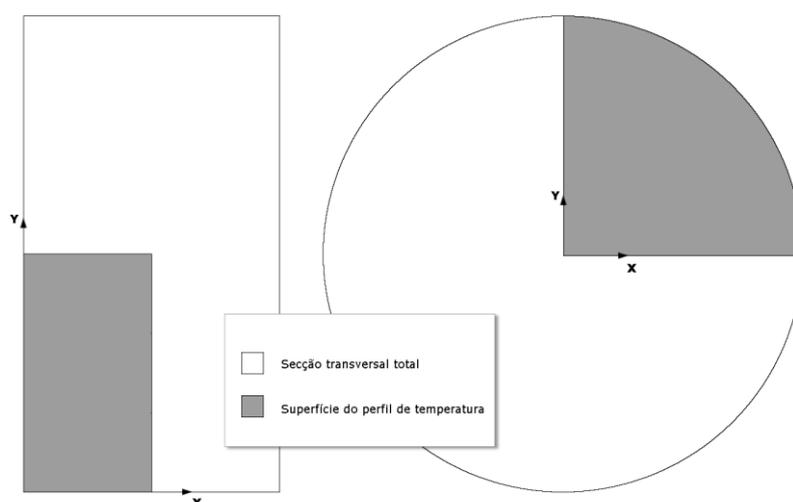


Figura A.1 – Superfícies para as quais são apresentados os perfis de temperatura

A.3. Perfis de temperaturas

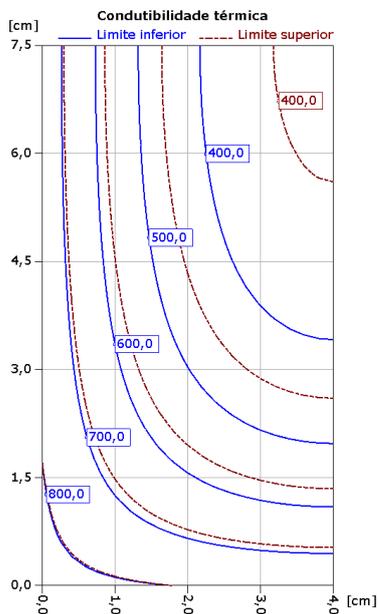


Figura A.2 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 15 \times 8$ [cm²] – R30

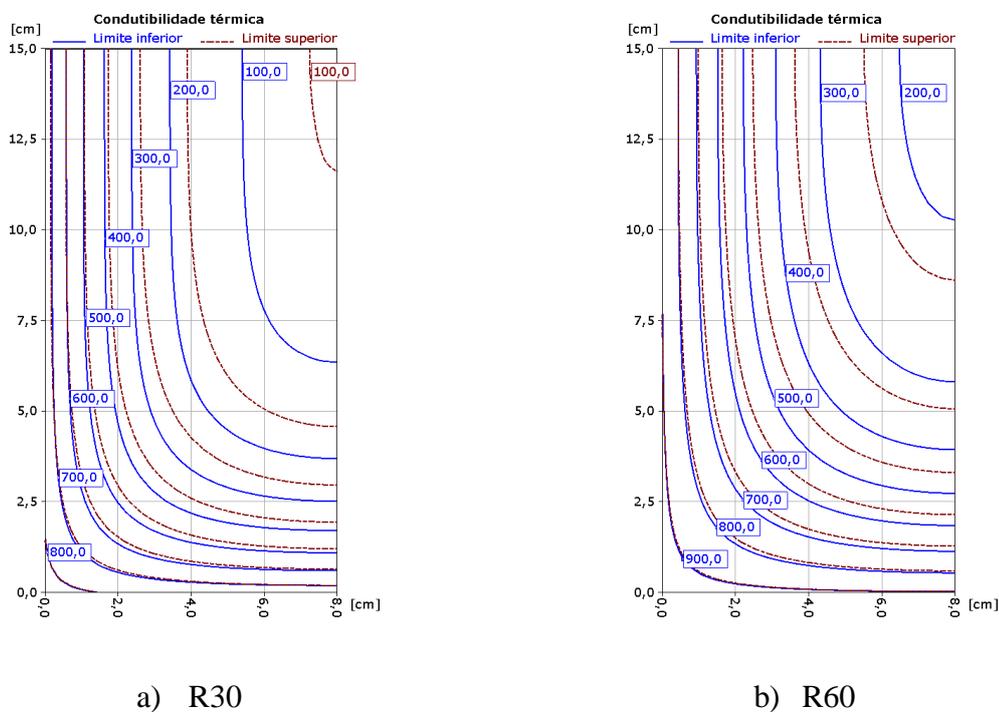


Figura A.3 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm²]

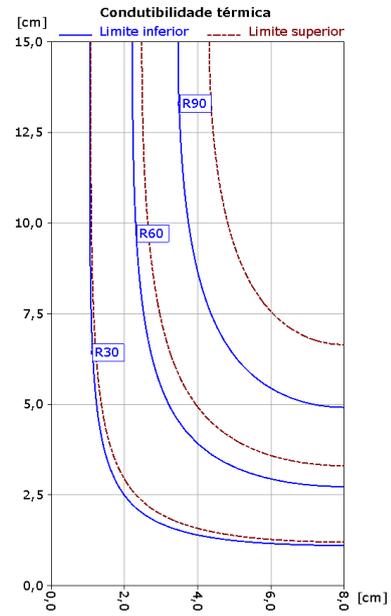
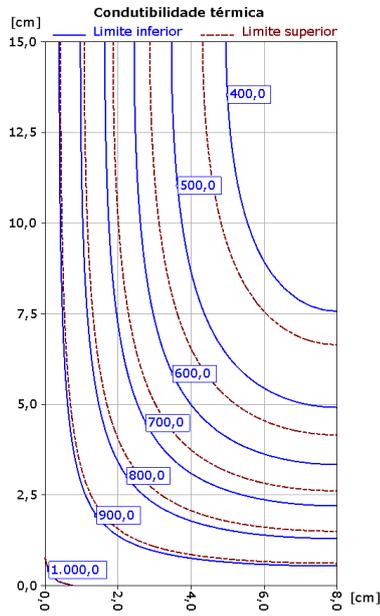
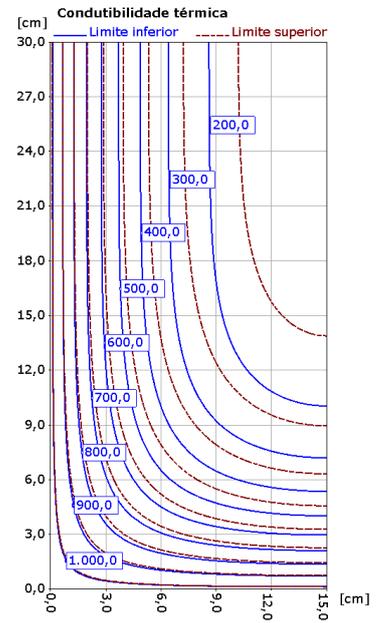
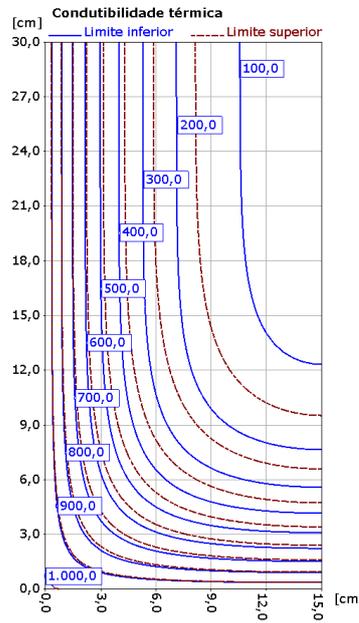
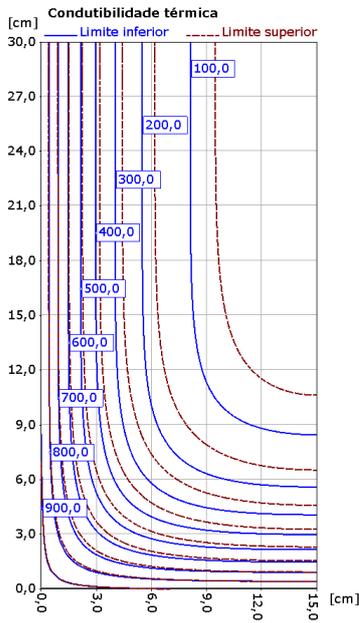


Figura A.4 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm²] – R90

Figura A.5 – Isotérmicas de 500 °C para uma viga $h \times b = 30 \times 16$ [cm²]

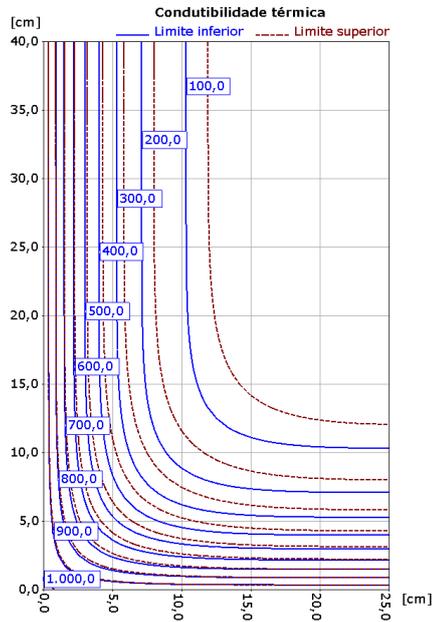


a) R60

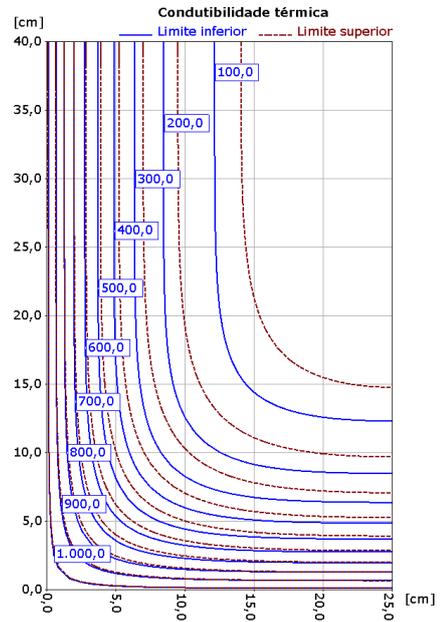
b) R90

c) R120

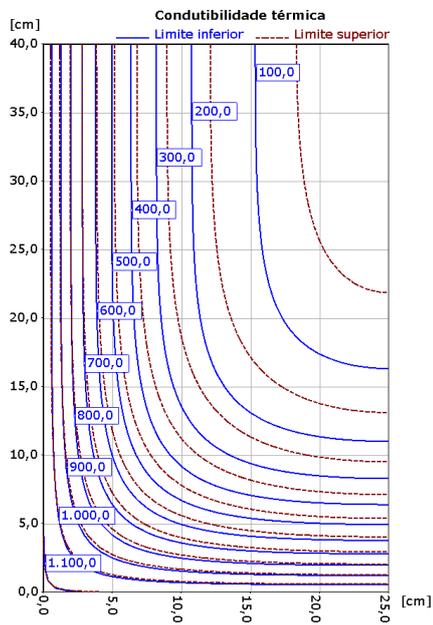
Figura A.6 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 60 \times 30$ [cm²]



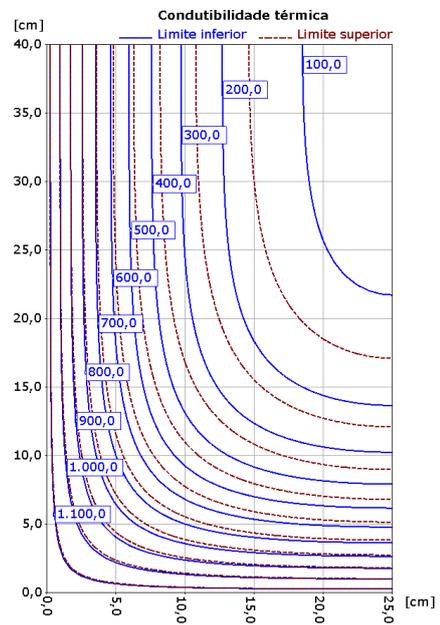
a) R90



b) R120

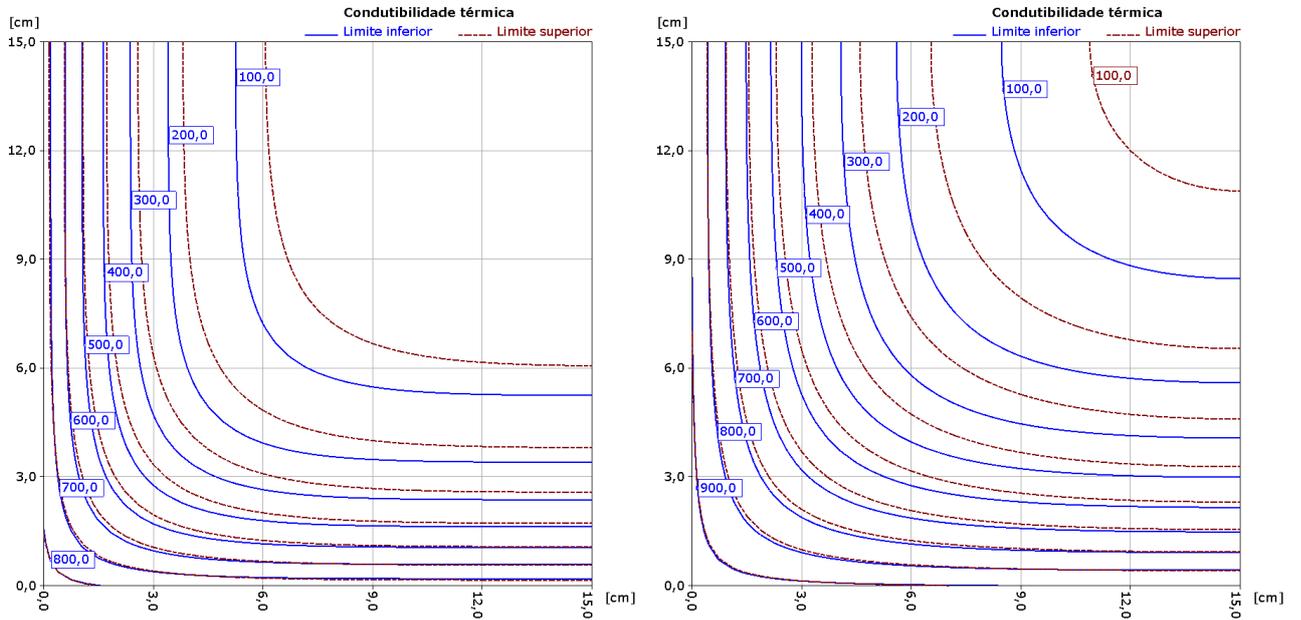


c) R180



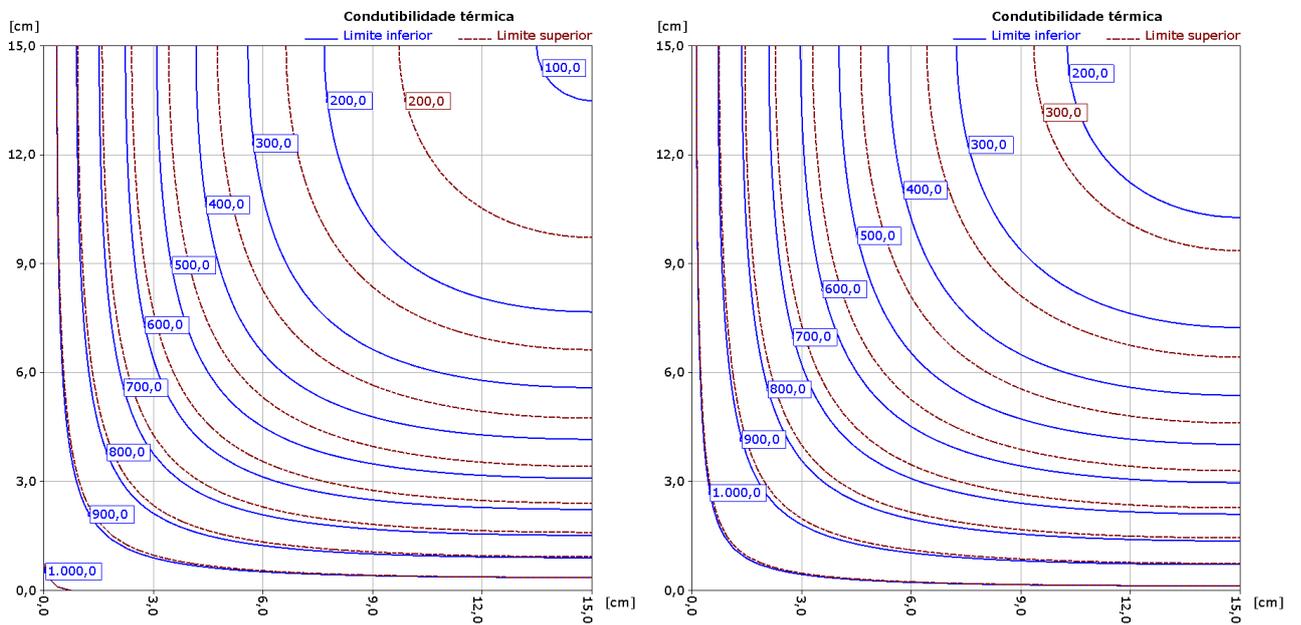
d) R240

Figura A.7 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga $h \times b = 80 \times 50$ [cm²]



a) R30

b) R60



c) R90

d) R120

Figura A.8 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar $h \times b = 30 \times 30$ [cm²]

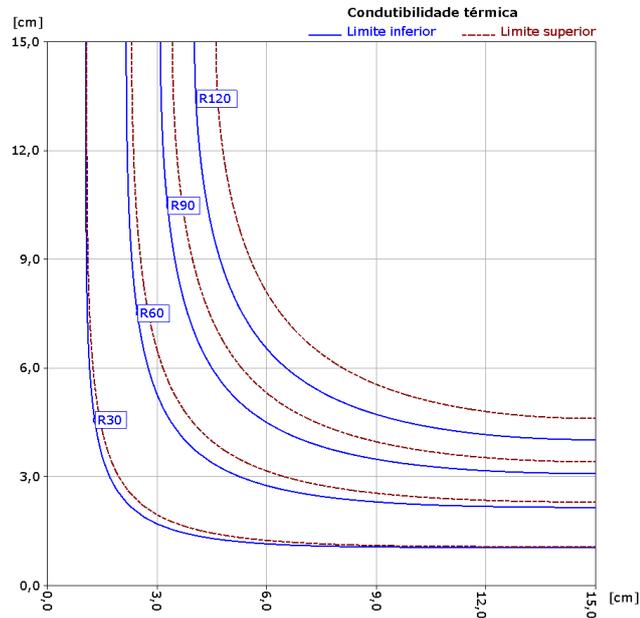


Figura A.9 – Isotérmica de 500 °C para um pilar $h \times b = 30 \times 30$ [cm²]

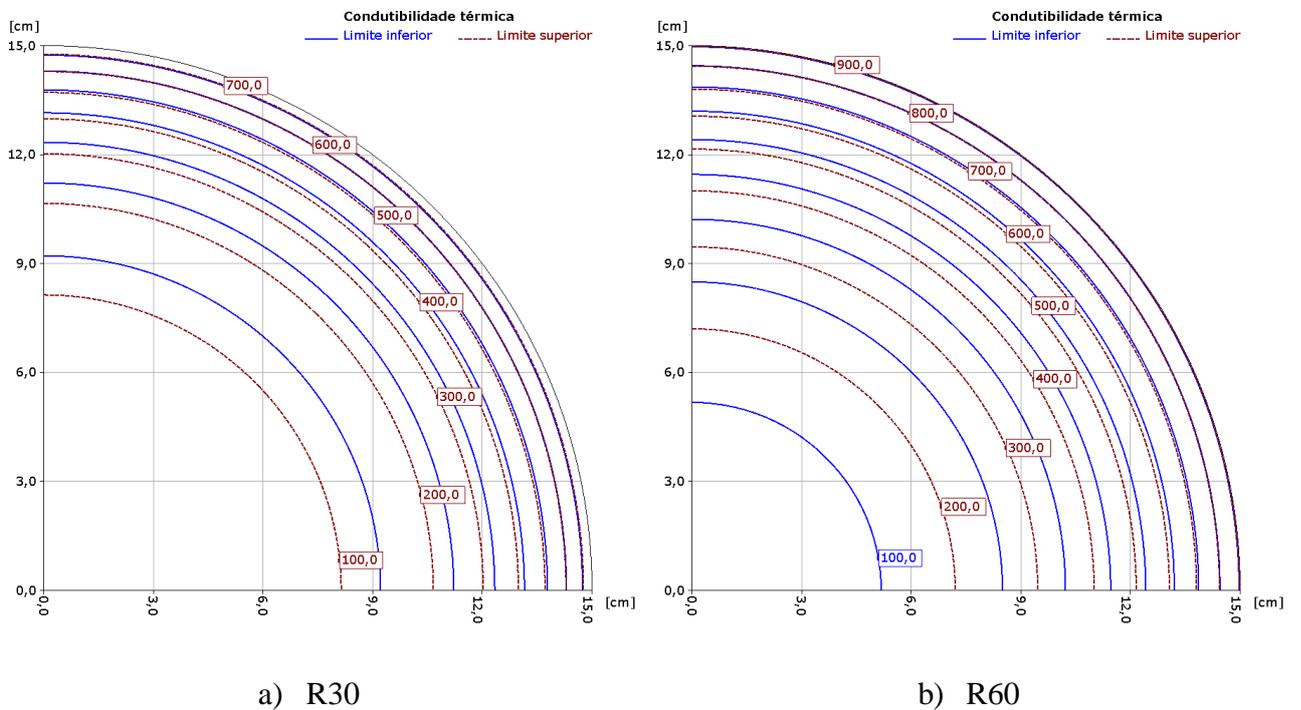


Figura A.10 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar circular com diâmetro de 30 cm

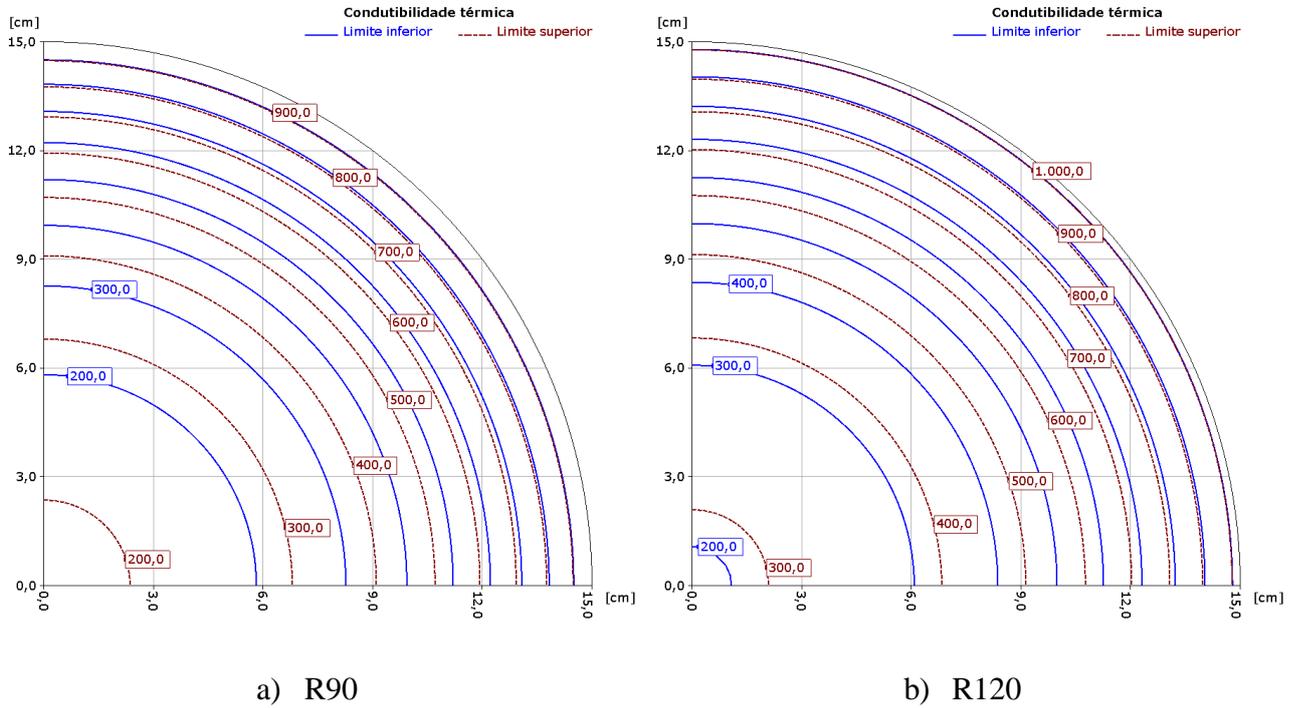


Figura A.11 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar circular com diâmetro de 30 cm

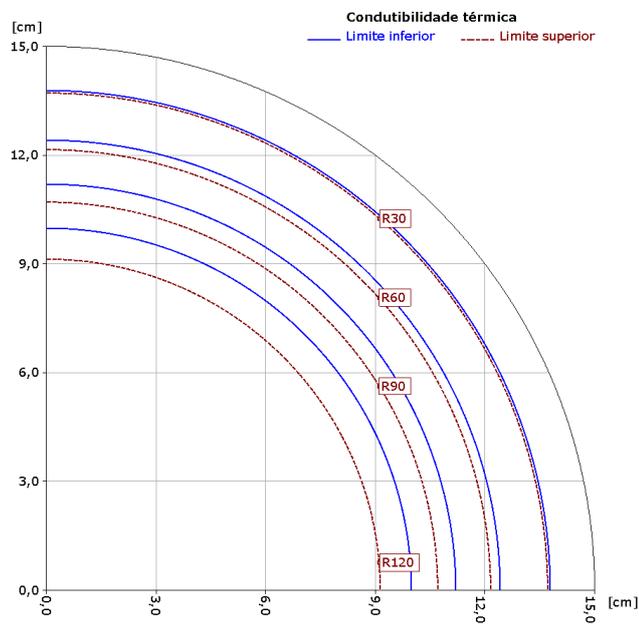


Figura A.12 – Isotérmica de 500 °C para um pilar circular com diâmetro de 30 cm