

## **CONTROLO DE FUMO EM ÁTRIOS DE GRANDE ALTURA**



**Carlos Fernandes**  
Mestre em SCIU,  
UC - Coimbra,  
Lisboa,  
Portugal



**João Viegas**  
Investigador  
Principal  
Laboratório Nacional  
de Engenharia Civil,  
Lisboa,  
Portugal.

### **SUMÁRIO**

A maioria das vítimas mortais resultantes de situação de incêndio são atribuídas à inalação de fumo em detrimento das queimaduras. Para além disso, a redução de visibilidade devida ao fumo constitui o maior perigo nos incêndios em átrios e pátios interiores cobertos, pelo que deve constituir um dos aspectos a ter em conta na instalação de controlo de fumo a adoptar. É pois fundamental que o projectista de segurança contra incêndio possa clarificar a natureza do escoamento do fumo no átrio. Pretende-se com este artigo apresentar as abordagens possíveis recorrendo-se à modelação numérica pela utilização de CFD e à modelação física pela utilização de água salgada em modelo reduzido, à escala, do átrio objecto de estudo.

**Palavras-chave:** Desenfumagem, átrios, CFD, modelação com água salgada

### **1. INTRODUÇÃO**

A complexidade da arquitectura dos átrios, com formas irregulares, passadiços e passeios, espaços adjacentes não compartimentados e elevadores abertos torna imprescindível a existência de caminhos de evacuação libertos de fumo durante o tempo suficiente para que se conclua a evacuação dos ocupantes do edifício. O projecto dos sistemas de controlo de fumo assume assim uma importância fulcral na segurança deste tipo de espaços.

Para possibilitar uma melhor caracterização do escoamento do fumo nestes espaços procedeu-se à simulação computacional de um incêndio num átrio de 32 m de altura e à sua comparação com os resultados de uma

modelação física deste fenómeno em escala reduzida, utilizando para isso o escoamento da água salgada (mais densa) num tanque de água doce (menos densa). Nesta comunicação apresentam-se os resultados desta investigação.

## 2. ESTUDOS PRECEDENTES CONDUZIDOS EM ÁTRIOS

O problema do estudo do escoamento do fumo em átrios tem sido objecto de diversos estudos utilizando variadas técnicas. Dada a importância crescente dos átrios no Japão, e sendo alguns deles projectados sem compartimentação relativamente ao espaços adjacentes, tornou-se necessário agilizar a execução de modelos à escala para estudar o escoamento do fumo no átrio. Tsujimoto [1] efectuou duas modelações à escala 1/25 e 1/10 para, com fogo real e aparelhagem diversa de medida e de registo, verificar a lei de escala do movimento de fumo num átrio.

Tsujimoto pretendia verificar experimentalmente a lei de escala da potência calorífica  $Q$ , e do tempo  $t$ , cuja natureza se traduz na relação com o comprimento representativo  $L$ , de acordo com as expressões:

$$\frac{Q_{modelo}}{Q_{real}} = \left( \frac{L_{modelo}}{L_{real}} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{t_{modelo}}{t_{real}} = \left( \frac{L_{modelo}}{L_{real}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Após as comparações dos resultados, Tsujimoto concluiu que os perfis da temperatura e da velocidade da camada de fumo eram idênticos nos dois modelos, embora existissem diferenças na temperatura da camada de fumo do modelo quando se abria uma das aberturas do modelo à escala maior.

Klote, John H. [2], sendo co-autor da Norma NFPA 92 B [3], publicou em 1994, um trabalho onde desenvolvia, entre outros aspectos, as bases para a modelação numérica do incêndio num átrio, utilizando CFD. Nesse trabalho destaca-se as considerações sobre a necessidade de sistemas de desenfumagem mecânica quando os átrios possuem dimensão suficiente para suportar o enchimento de fumo sem colocar em risco a evacuação dos ocupantes. É referido igualmente a ineficácia do uso de detectores pontuais de fumo relativamente aos detectores lineares.

Satoh, H [4], construiu à escala um modelo de átrio, alto e estreito de modo a poder ser utilizado para vários átrios desde que se enquadrassem geometricamente naquela classificação. Assim foram encontradas três possíveis classificações para átrios, sendo a de “Alto e Estreito”, “Cúbico” e o “Átrio de Centro Comercial”. São três as variáveis que determinam esta classificação, a altura  $H$ , a área em planta  $A$  e o Volume, em que este último é comparado com a relação  $H^2/A$ .

Chow, Wan K.[5], procedeu ao estudo dos átrios que se desenvolvem linearmente em planta recorrendo a CFD, designadamente o CFAST 2.0. O primeiro átrio que foi estudado possuía um volume de 7500m<sup>3</sup> e um comprimento de 50m. Chow criou uma divisão crescente multicelular deste átrio até ao máximo de 15 divisões, valor máximo suportado pelo CFAST 2.0. Foram efectuadas mais 3 simulações para átrios maiores com 15000m<sup>3</sup>, 22500 m<sup>3</sup> e 30000 m<sup>3</sup>.

Para proceder à verificação do processo de enchimento de fumo de um átrio real com as dimensões de 11,9 m x 22,4 m e 27 m de altura, num outro trabalho, Chow W. K. [6] utilizou os critérios definidos na NFPA 92B [3] para a fonte de calor utilizando para o efeito uma bacia de gasóleo posicionada no meio do átrio, com 1.2m de diâmetro, tendo obtido uma potência calorífica para o ensaio de 654 kW . Foi confirmada a aplicabilidade das equações para a determinação da altura da camada de fumo e reforçada a importância do dimensionamento dos sistemas de controlo de fumos com base na avaliação de desempenho.

Lougheed, G.D [7], utilizou um compartimento de grandes dimensões, com 13.1 m x 17.2m x 12.2 m que foi apetrechado com a instrumentalização de medição de temperatura, velocidade e de concentração de CO2 para estudar os equipamentos de controlo de fumos quer para insuflação, quer para a extracção. Verificou-se a adequabilidade de caudais de extracção em função do volume dos produtos da combustão, bem como o posicionamento dos insufladores de ar novo e dos extractores de fumo.

Num outro seu trabalho [8], é evidenciado o efeito negativo que num átrio pode causar a insuflação de ar abaixo da camada de fumo, provocando o efeito “plugholing” que diminui a eficiência do sistema de exaustão de fumo, Figura 1.

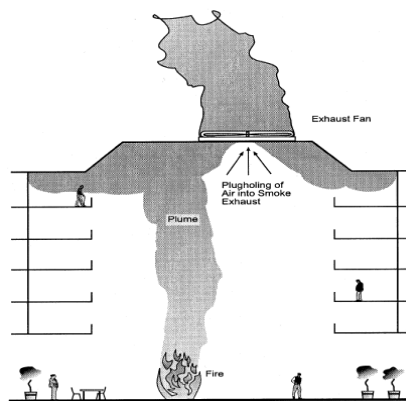


Figura 1 – O efeito *Plugholing*

Meroney, Robert N. [9] salienta o tratamento especial que merecem os átrios relativamente à segurança contra incêndios, reconhecendo que os modelos computacionais de zona são impotentes para permitir alcançar os resultados adequados ao dimensionamento dos sistemas de segurança ao incêndio. Recomenda por isso no seu estudo o emprego de modelos de campo onde os factores em presença, como por exemplo, o efeito do vento exterior pode ser modelado.

Em edifícios “verdes” são promovidos o baixo consumo de energia o emprego de matérias recicláveis, a ventilação natural, entre outros. De acordo com Chow W.K [10], nos aspectos relativos à segurança contra incêndios dever-se-á cumprir as condições de evacuação verificando os tempos de enchimento de fumo do átrio e a sua compatibilidade com o tempo necessário para a evacuação. Devem adoptar-se sistemas de exaustão sempre que necessário. Por outro lado, Chow ressalva que se deve exercer um esforço na Gestão de Segurança como medida compensatória à ausência de outros sistemas de segurança.

Gutiérrez-Montes [11], conduziu um ensaio em escala grande de um incêndio em átrio utilizando uma infraestrutura existente no Murcia Atrium Fire Tests em Murcia Espanha.

Desde o trabalho inicial de Steckler [12], o modelo com água salgada incorporou o conjunto de métodos disponíveis para os investigadores que desejam investigar os fluxos originados por diferença de densidade ou de temperatura, tal como ocorrem no meio ambiente ou em situação de incêndio.

Fleischmann [13] investigou a velocidade de propagação do fumo em compartimentos sujeitos a fogo utilizando modelos com água salgada.

Diversos trabalhos experimentais em modelos com água salgada foram efectuadas para o escoamento de água salgada no seio de água doce através de uma abertura horizontal conforme Epstein [14] e Linden [15]. Também o estudo comparativo entre o escoamento natural e o forçado de água salgada no seio de água doce foi realizado em 1989 por Epstein [16].

O comportamento do escoamento de fumo em grandes aberturas horizontais e verticais sujeitas a fenómenos de impulsão gerado pela interacção entre os gases quentes do fumo e a temperatura ambiente foi objecto de estudo de B. Gera [17].

Estes estudos mostram que é necessário promover uma adequada desenfumagem deste tipo de espaços, de outra forma o fumo pode condicionar fortemente a evacuação dos ocupantes durante um incêndio. Para além disso, mostram que as características geométricas dos átrios têm uma importância determinante para o escoamento do fumo. Por essa razão entendeu-se ser relevante o desenvolvimento de um estudo, incorporando simulações computacionais e modelação física, para uma tipologia de átrio corrente em novos edifícios em Portugal.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Generalidades

O átrio objecto do presente estudo encontra-se inserido num edifício de escritórios. Conforme o RJSCIE [18] o edifício corresponde à Utilização-tipo III «Administrativos», e é constituído por 2 pisos de estacionamento, piso -2 e piso -1 e 8 pisos de escritórios, piso 0 ao piso 7. O edifício possui uma área em planta de cerca de 800 m<sup>2</sup>, possuindo efectivo inferior a 1000 e uma altura inferior a 28m, podendo ser classificado como sendo da 2ª Categoria de Risco. Os pisos de escritórios apresentam a mesma configuração em altura e são servidos em termos de acessibilidade pelo átrio que ocupa a posição central do edifício, conforme Figura 2.



Figura 2 – Planta de piso tipo 0 a 7 e planta do átrio

O átrio desenvolve-se do piso 0 à cobertura e possui uma altura de 30,00m e uma área em planta de 148 m<sup>2</sup>, possibilitando o acesso em cada piso, aos elevadores, às vias verticais de evacuação e aos escritórios. Considera-se que além dos pisos de estacionamento, também os pisos de escritórios se encontram protegidos por sistema de automático de extinção de incêndios (sprinkler's), tal não acontecendo no átrio.

#### 3.2 Modelação com água salgada

Nos últimos anos, a modelação física com água salgada tornou-se uma forma comum de estudar fenómenos no campo da dinâmica do fogo. O modelo com água salgada pode ser usado para fornecer uma visão dum cenário de fogo real, utilizando-se para o efeito uma análise adimensional.

A modelação com água salgada é relativamente barata e segura quando comparada com outras alternativas e tem sido usada extensivamente por diversos investigadores para uma vasta gama de aplicações.

Os modelos com água salgada são geralmente feitas em escala reduzida e construídos a partir de materiais de construção vulgares, como folha de acrílico.

Se se comparar com a modelação física à escala real, tendo em conta o que acontece ao compartimento de fogo após o ensaio, é relevante a vantagem económica que apresenta o recurso a modelos com água salgada.

Sob o ponto de vista ambiental também a modelação com água salgada apresenta nítida vantagem dado que o ambiente de ensaio é muito limpo e a visualização do escoamento é muito mais fácil. Em modelos em que se utiliza fogo real, em ambientes de alta temperatura, a recolha de dados de leitura precisos é difícil e o equipamento pode, facilmente, ficar danificado.

Steckler [12] realizou experiências no sentido de estudar o escoamento extremamente complexo do fumo no interior de uma navio de guerra, tendo construído um protótipo à escala 1/20 no qual o escoamento do fumo era simulado pelo escoamento de água salgada em água doce. Quer no caso do escoamento do fumo quer no caso do escoamento da água salgada como já foi referido ambos os escoamentos são gerados pela impulsão. Neste caso as equações de conservação de massa, da conservação da quantidade de movimento e da conservação da energia são adimensionalizadas usando para isso como escalas de comprimento, o pé-direito do compartimento,  $H$ , a dimensão característica da fonte  $L$ , uma escala de velocidades  $v_c$ , definida pela expressão (3) e uma escala de perturbação da massa volúmica, ou temperatura, definida pela expressão (4)

$$v_c = \left( \frac{Q_0 g}{\rho_0 c_p T_0 H} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{v_c^2}{gH} \quad (4)$$

Assume-se nesta análise que as mudanças na densidade (para além das responsáveis pela impulsão) podem ser ignoradas (Hipótese de Boussinesq válida enquanto como a diferença de densidade entre líquidos é pequena, menos de 10%).

De acordo com Steckler [12] as formulações adimensionalizadas para as equações de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia num ponto  $xg$  do volume de gás afastado das fronteiras num determinado tempo  $tg$ , são indicadas em (5) a (7).

$$\nabla^* \cdot \bar{\mathbf{u}}^* = 0 \quad (5)$$

$$\frac{D\bar{\mathbf{u}}^*}{Dt^*} + \nabla^* \bar{p}^* - \theta^* \bar{\mathbf{k}} = \left( \frac{1}{Re} \right) \nabla^{*2} \bar{\mathbf{u}}^* \quad (6)$$

$$\frac{D\theta^*}{Dt^*} = GQ^* + \left( \frac{P}{Re} \right) \nabla^{*2} \theta^* \quad (7)$$

No Quadro 1, apresentam-se as variáveis adimensionais na analogia fogo/água salgada em que  $H$ ,  $L$ ,  $h$  e  $l$  representam a altura e comprimento no protótipo e modelo,  $U$  representa a velocidade característica do fluido no protótipo,  $\zeta$  representa uma escala da perturbação da massa volúmica (ou temperatura) do fluido no protótipo,  $\rho_0$ ,  $T_0$ ,  $g$ ,  $\mu$ ,  $k$  e  $c_p$  representam a massa volúmica, a temperatura inicial, a aceleração da gravidade, a viscosidade, a condutividade térmica e o calor específico a pressão constante do fluido, respectivamente, no protótipo e  $Y$  representa a fracção mássica de sal.

O modelo físico do átrio foi executado à escala 1:100, em folha de acrílico. Um conjunto de três bombas permitiu obter caudais de 5ml/s e 15ml/s que foram usadas para introdução de água salgada no modelo, simulando a fonte de calor e para a extracção de água salgada do interior do modelo, simulando a extracção mecânica dos produtos da combustão.

De acordo com as formulações adimensionalizadas por Steckler [12], os caudais de água salgada no modelo equivalem à potência calorífica no protótipo nas seguintes condições sendo o factor de escala = 100.

Quadro 1 – Variáveis adimensionais na analogia fogo água salgada

Variável adimensional	Definição da variável adimensional		Variável adimensional	Definição da variável adimensional	
	Protótipo	modelo		protótipo	modelo
$\Theta^*$	$\frac{(T - T_0)}{T_0 \zeta}$	$\frac{Y}{\zeta}$	P	$\frac{\mu c_p}{k}$	$\frac{\mu}{\rho_0} \mathfrak{D}$
$t^*$	$\frac{t_g U}{H}$	$\frac{t_s U}{h}$	$\zeta$	$U^2 / gH$	$U^2 / gh$
$\bar{u}^*$	$\frac{\bar{u}}{U}$	$\frac{\bar{u}}{U}$	U	$\left( \frac{\dot{Q}_0 g}{\rho_0 c_p T_0 H} \right)^{1/3}$	$\left( \frac{\dot{m}_0 g}{\rho_0 h} \right)^{1/3}$
$\bar{p}^*$	$\frac{\bar{p}}{\rho_0 U^2}$	$\frac{\bar{p}}{\rho_0 U^2}$	Re	$\frac{\rho_0 UH}{\mu}$	$\frac{\rho_0 U h}{\mu}$
$\nabla^*$	$H \nabla$	$h \nabla$	G	$(H/L)^3$	$(h/l)^3$
$\bar{x}^*$	$\frac{\bar{x}_g}{H}$	$\frac{\bar{x}_g}{h}$			

Os valores que caracterizam o modelo estão indicados no quadro 2 e os cenários de incêndio simulados estão indicados no quadro 3.

$$U_{prototipo} = \left( \frac{2gH\dot{Q}_0}{A\rho_\infty c_p T_\infty} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$U_{modelo} = \left( \frac{2gh\dot{m}_0}{a\rho_0} \right)^{1/3} \quad (9)$$

$$U_{prototipo} = \text{factor de escala} \times U_{modelo} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_0 = 1,2 \times 100^4 \dot{m}_0 T_\infty \quad (11)$$

Quadro 2 – Potência calorífica equivalente

Caudal de água salgada [ml/s]	Caudal mássico de sal $\dot{m}_0$ [kg/s]	$T_\infty$ [K]	Potência calorífica, $\dot{Q}_0$ [MW]
5,0	0,0005	293	17,6

Quadro 3 – Cenários água salgada

Cenário	Potência simulada da fonte de calor	Sistema de Desenfumagem
1	18,2 MW	Natural
2	18,2 MW	Extracção Mecânica (3x15m <sup>3</sup> /s)

### 3.3 Modelação numérica

No presente estudo foi utilizado o Fire Dynamics Simulator (FDS) desenvolvido pelo National Institute of Standard's and Techonology-EUA (NIST).

No contexto deste estudo preliminar procurou utilizar-se um programa de CFD largamente difundido e de utilização corrente que tenha evidenciado largamente a sua adequação à simulação de situações de incêndio em edifícios, por um lado, e, por outro lado, dispor de uma ferramenta que, também devido à sua extensa utilização, tenha sido expurgada sistematicamente dos erros que inevitavelmente ocorrem na implementação de programas de computador tão complexos e que podem alterar significativamente os resultados. Para além disso seria de todo conveniente a utilização de um programa “amigo do utilizador” cuja utilização, alteração das condições iniciais e de fronteira e a extracção e visualização dos resultados fosse fácil. Estas condições eram preenchidas pelo programa designado por *Fire Dynamics Simulator* (FDS) [19]. Este programa foi extensivamente verificado e validado para cenários de incêndio.

A modelação em que se baseia o FDS está detalhada em [19] e é sucintamente descrita seguidamente, com base nessa publicação. O modelo hidrodinâmico baseia-se na resolução das equações de conservação da massa, quantidade de movimento, da energia e da conservação de substâncias, adopta a forma das equações de Navier-Stokes adequada a escoamentos incompressíveis. As equações do modelo hidrodinâmico são modeladas numericamente através da técnica das diferenças finitas com um algoritmo explícito de segunda ordem no espaço e no tempo. A turbulência é modelada através da formulação de Smagorinsky do modelo “Large Eddy Simulation” (LES).

O modelo base do átrio foi concebido de modo a poder suportar as diversas variações que caracterizam os diversos cenários simulados e possibilitar posteriormente estabelecer comparações com o modelo físico com água salgada (Figura 3).



Figura 3 – Modelação do átrio

Foram concebidas duas malhas de cálculo com a mesma dimensão aplicadas simetricamente ao modelo, também ele simétrico (Figura 3). Procurou-se com esta medida diminuir os tempos de simulação, possibilitando a afectação simultânea dos dois processadores do computador utilizado ao cálculo. As características constam do Quadro 4.

Quadro 4 – Coordenadas do domínio de simulação

Cenários	Malha 1						Malha 2					
	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	y <sub>0</sub>	y <sub>1</sub>	z <sub>0</sub>	z <sub>1</sub>	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	y <sub>0</sub>	y <sub>1</sub>	z <sub>0</sub>	z <sub>1</sub>
Malha 20cm	-11,0	0	-1,0	14,0	-0,4	31,0	0	11,0	-1,0	14,0	-0,4	31,0
Malha 40 cm	-11,2	0	-0,8	14,0	-0,8	31,2	0	11,2	-0,8	14,0	-0,8	31,2
Malha 80 cm	-10,4	0	-1,6	13,6	-0,8	31,2	0	10,4	-1,6	13,6	-0,8	31,2
1 e seguintes	-11,0	0	-1,0	14,0	-0,4	31,0	0	11,0	-1,0	14	-0,4	31,0

A norma NFPA 92B recomenda, para os átrios, o valor de 2,11 MW na situação mais desfavorável.

Já o CEN/TR 12101:5, não apresentando valores característicos específicos para o fogo de projecto em átrios, recomenda que para edifícios de escritório, dotados com sistema automático de extinção de incêndios standard (sprinkler's) o valor 225 kW/m<sup>2</sup> para Q, o fluxo de calor, de 16 m<sup>2</sup> para Af, a área de fogo e de 14 m para P, o perímetro de fogo. Resulta, neste caso a utilização de um fogo de 4,08 MW.

Nas simulações em modelo numérico efectuadas foram utilizados os valores de 4,08MW e de 2,61MW,variando as suas posições relativas no átrio.

Na laje de tecto do átrio encontram-se localizadas, para desenfumagem, 3 aberturas horizontais que, de acordo com o cenário de simulação, funcionam como abertura para desenfumagem natural ou como extractor, (Figura 4).

As aberturas na laje de tecto do átrio possuem uma área total igual a 5% da área de pavimento do átrio, conforme RJSCIE [18].

No piso 0 existem para além das portas de acesso aos escritórios as portas do alçado principal que se encontram abertas ou fechadas de acordo com o cenário. No Quadro 5 indicam-se as características dos vários cenários simulados numericamente.



Figura 4 – Eixos x e y das malhas de cálculo e aberturas na laje de tecto do átrio

Quadro 5 – Cenários da simulação numérica

CENARIOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	18	19	20
HRRPUA [kW/m <sup>2</sup> ]	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	5947.7	5947.7
Afogo [m <sup>2</sup> ]	16.00	16.00	10.24	10.08	16.00	10.08	10.08	10.08	10.24	16.00	16.00	10.24	10.24	2.88	2.88
Q̇ [MW]	4.08	4.08	2.61	2.57	4.08	2.57	2.57	2.57	2.61	4.08	4.08	2.61	2.61	18.16	18.16
POSIÇÃO FONTE DE CALOR	Centro	Centro	Centro	Escr R/C	Canto	Escr R/C	Escr R/C	Escr R/C	Centro	Centro	Centro	Centro	Centro	Centro	Centro
Nº Exutores	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Área Exutores [m <sup>2</sup> ]	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	2.54	2.54	2.54	2.54
Atotal exutores [m <sup>2</sup> ]	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.61	7.61	7.61	7.61
DESENFUMAG	Natural	3x0.5 m <sup>3</sup> /s	Natural	3x0.5 m <sup>3</sup> /s	3x0.5 m <sup>3</sup> /s	Natural	3x1.5 m <sup>3</sup> /s	3x3.0 m <sup>3</sup> /s	Natural	Natural	3x0.5 m <sup>3</sup> /s	3x0.5 m <sup>3</sup> /s	3x12.6 m <sup>3</sup> /s	Natural	3x15.0 m <sup>3</sup> /s
PORTAS R/C	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechad	Fechad	Fechad	Fechad	Aberta	Aberta	Aberta
Tempo simulação [s]	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Tempo CPU [h]	25.61	51.39	32.63	58.30	52.02	50.30	58.11	33.61	36.87	66.69	39.53	37.68	71,7	12	6,8
dím Célula Cúbica [m]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,40	0,40
Nº Células	1295250	1295250	1295250	1295250	1295250	1295250	1295250	1295250	1295250	1295251	1295250	1295250	1295250	165760	165760



## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Simulação numérica

As simulações foram comparadas entre si, tendo sido estabelecido diversas combinações, apresentando-se algumas dessas combinações. Assim, compararam-se os resultados obtidos no cenário 6, no qual a fonte de calor estava posicionada no hall do escritório do r/c esq, com os obtidos no cenário 9, no qual a fonte de calor estava posicionada ao centro do átrio. Em ambos os cenários a desenfumagem é natural e a potência da fonte de calor é 2,6 MW. Na figura 5 comparam-se os resultados obtidos para a temperatura, verificando-se que, quando a fonte de calor se posiciona ao centro, os valores de temperatura alcançados, na vertical do exutor 1 são superiores.

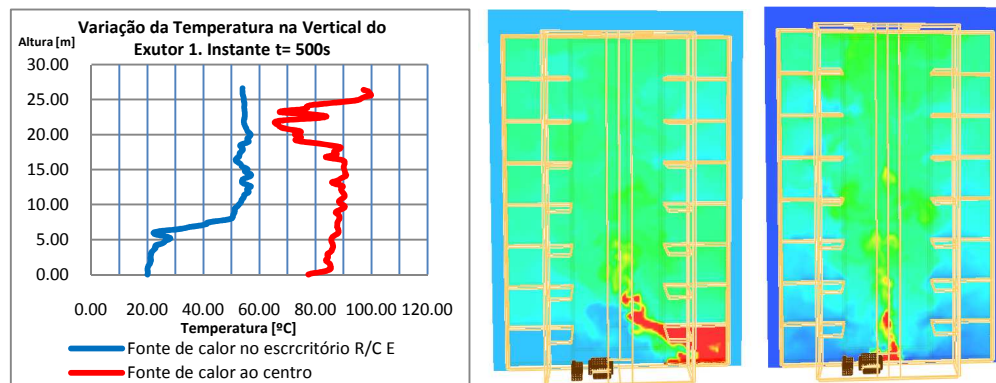


Figura 5 – Perfil de temperatura na vertical do exutor 1 e campos de temperatura nos cenários 6 e 9

Verifica-se que, quando a fonte de calor se encontra colocada no escritório do r/c esq, o escoamento do fumo através da abertura de comunicação com o átrio condiciona fortemente as condições ambientais no átrio. Enquanto no cenário 9 (fonte de calor centrada no átrio) o fumo escoava numa pluma axissimétrica que só é perturbada quando a pluma passa a ter uma forte interacção com as galerias circundantes ao átrio (acima da cota 18 m, como se observa no gráfico da temperatura), no cenário 6 o escoamento através da abertura entre o escritório e o átrio cria uma pluma que tem um carácter mais dispersivo do fumo do que no cenário 9; por essa razão a camada quente tem uma temperatura mais uniforme, que é registada no perfil de temperatura à vertical do exutor de fumo como sendo mais baixa do que a registada no cenário 9. Note-se que a pluma, no cenário 9, se encontra muito próxima da linha ao longo da qual se regista a temperatura.

Apresenta-se igualmente a comparação dos resultados obtidos no cenário 1, com sistema de desenfumagem passiva, e no cenário 2, com sistema de desenfumagem activa.

Em ambos os cenários o fogo liberta uma potência de 4 MW e está localizado no centro do átrio; no cenário 2 a desenfumagem é do tipo admissão natural e exaustão mecânica, com o caudal volúmico de extracção de 3x0,5 m<sup>3</sup>/s. Pela análise dos gráficos da Figura 6, verifica-se que no cenário 2, onde foi utilizado o sistema de desenfumagem activa, os valores da temperatura são superiores. O caudal de exaustão de fumo no topo do átrio tem valores mais baixos para a desenfumagem activa do que os que são originados pela desenfumagem passiva no presente exemplo, conduzindo assim a um transporte do calor mais limitado para o exterior, no caso de desenfumagem activa, e, assim, a uma temperatura mais elevada. Verifica-se, a título de exemplo, que a temperatura registada na porta de comunicação com o átrio do escritório do 3º Esq já não é compatível com a

exposição dos ocupantes em evacuação, o que mostra que uma desenfumagem mecânica com um dimensionamento insuficiente pode ter consequências muito negativas para a evacuação.

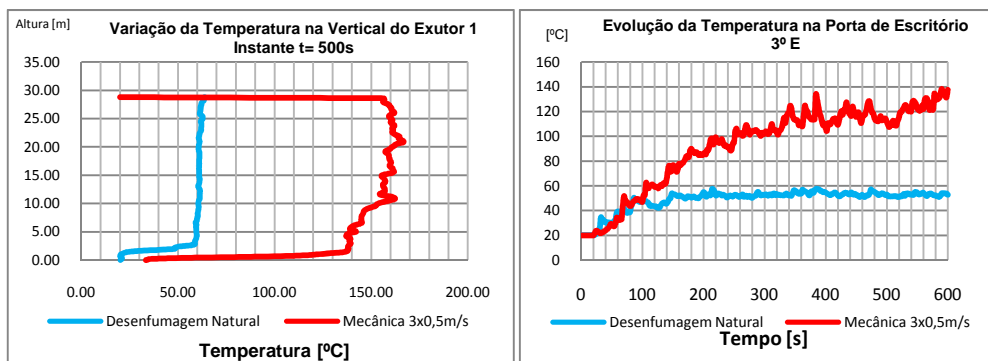


Figura 6 – Perfil de temperatura à vertical do Exutor 1 e temperatura na porta do 3º Esq

#### 4.2 Modelação com água salgada

O cenário 19 (Quadro 5) da simulação computacional é seguidamente comparado com o cenário 1 (Quadro 3) da modelação com água salgada). Para o cenário 19 e para o cenário 1, ambos com desenfumagem natural e uma potência da fonte de calor de 18,2 MW, pode-se verificar, as diferenças de opacidade dos “fumos” num modelo e noutro\*. Apesar disso, é notória a semelhança dos escoamentos da pluma para os instantes representados, correspondentes à Figura 7.

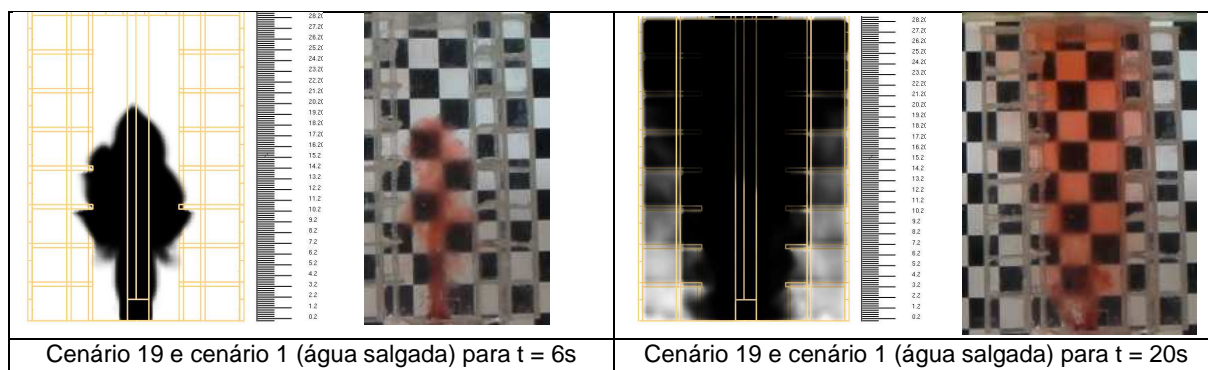


Figura 7 – Comparação modelação numérica com modelação com água salgada

\* Estas diferenças de opacidade são devidas essencialmente a não ser possível adoptar uma escala gráfica de opacidade para a representação dos resultados obtidos em CFD compatível com os resultados obtidos nos ensaios com água salgada.

## 5. CONCLUSÕES

A realização do presente trabalho evidencia a impossibilidade de se encontrarem soluções únicas para o controlo de fumo dos átrios e pátios interiores cobertos. É natural pois que, acima dos 12m de altura para um pátio interior coberto, a regulamentação portuguesa em vigor obrigue à adopção de sistemas de desenfumagem activa baseados no desempenho.

Entre outros aspectos, a necessidade de evacuação segura do átrio obriga à manutenção de uma altura livre de fumos, nos percursos de evacuação, durante o tempo necessário à sua conclusão. Em átrios estreitos, como o modelado, o escoamento de fumo ocupa toda a secção desde o início, baixando muito a cota de interface entre a camada quente e fria.

A modelação física do incêndio, sendo a mais tradicional, ocupa desde há muito um lugar destacado no conjunto de ferramentas dos investigadores. No entanto, simular um incêndio, com fogo real, mesmo a uma escala reduzida, é complexo e em determinadas situações inatingível. A modelação com água salgada, do átrio, objecto do presente estudo, consumiu um conjunto reduzido de materiais e equipamentos de insignificante qualidade técnico-laboratorial. Produziu-se uma ferramenta que ajuda a compreender o escoamento do fumo no átrio e em comparação com os resultados da simulação computacional permite credibilizar os resultados globais obtidos.

Das diversas simulações realizadas com recurso a CFD, verificou-se que para o átrio em causa a potência da fonte de calor, a sua posição relativa e o tipo de desenfumagem adoptado constituem factores que influenciam claramente as condições de segurança ao incêndio. Assim quando a fonte de calor se encontra ao centro do átrio verifica-se o agravamento dos efeitos do fogo, relativamente ao seu posicionamento no hall do escritório. A utilização do sistema de controlo de fumo, obrigatório neste caso uma vez que a altura do átrio é superior a 12 m, pode causar efeito contrário àquele que será o objectivo de utilização, caso os valores dos caudais de extracção estejam abaixo dos valores que se obtêm na desenfumagem por meios passivos.

A semelhança verificada nas comparações dos resultados obtidos com modelação CFD e com os ensaios com água salgada constituem factor de motivação para se promover estes últimos, valorando-se a simplicidade, a rapidez e a economia de recursos associada à realização destes últimos.

Este estudo evidencia ainda que a modelação efectuada, quer utilizando-se um dado modelo computacional, quer um modelo físico (com água salgada, por exemplo), poderá ser utilizada para confirmar as prescrições regulamentares transversalmente aplicáveis às diversas utilizações-tipo dos edifícios e recintos.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Tsujimoto, M. et al - *A scaling law of smoke movement in atrium* – NISTIR, USA, 1999.
- [2] Klote, John H. - *Method of Predicting Smoke Movement in Atria with Application to Smoke Management*-, NISTIR5516, NIST, Maryland, EUA, 1994.
- [3] NFPA 92B - *Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas* - , NFPA, Quincy, MA, USA, 2000.
- [4] Satoh, H et al, - *Modeling on Temperature and Ventilation induced by a Model Fire in a Tall and Narrow Atrium Space* -, NISTIR6030, NIST, EUA, 1997.
- [5] Chow, Wan K - *Simulation of fire environment for linear atria in Hong Kong* -, Journal of Architecture, Junho 1997, pp 80-87, 1997.
- [6] Chow W. K. et al. - *Natural Smoke Filling In Polyu/Ustc Atrium* -, Journal of Architecture, Setembro 2000.
- [7] Lougheed, G.D et al. - *Large-scale physical model studies for an atrium smoke exhaust system* - , NRCC 42570, National Research Council Canada, 1999.
- [8] Lougheed, G.D et al. - *The Smoke hazard from a fire in high spaces* - National Research Council Canada, 1999.

- [9] Meroney, Robert N. et al. - *Smoke and fire in building atria* - Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, 2004.
- [10] Chow W.K et al. - *Evacuation with smoke control for atria in green and sustainable building* -, Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China, 2005.
- [11] Gutiérrez-Montes, et al. - *Experimental Data and Numerical Modelling of 1.3 and 2.3 MW Fires in a 20 m Cubic Atrium* -, Building and Environment 44, pp. 1827–1839, 2009.
- [12] Steckler, K., Baum, H. e Quintiere, J. - *Salt water modeling of fire induced flows in multicompartment enclosures* -, Twenty-first Symposium on Combustion, 1986.
- [13] Fleischmann, C., Pagni, P. e Williamson, R. - *Salt Water Modeling of Fire Compartment Gravity Currents*”. *Fire Safety Science* – Proceedings of the Fourth International Symposium, 1994.
- [14] Epstein, M., - *Buoyancy-driven Exchange Flow Through Small Openings in Horizontal Partitions* -, Journal of Heat Transfer, 1988.
- [15] Linden, P. F., - *The Fluid Mechanics of Natural Ventilation* -, Annual Review of Fluid Mechanics, 1999.
- [16] Epstein, M. and Kenton, M.A., - *Combined Natural Connection and Forced Flow Through Small Openings in Horizontal Partitions with Special Reference to Flows in Multi-Compartment Enclosures* -, Journal of Heat Transfer, 1989.
- [17] Gera, B., Sharma, K., Ravi, M. and Ghosh, A. - *Fresh-salt water experimental studies for buoyant flow behavior in large vertical and horizontal ceiling openings* -, 2003.
- [18] Decreto-Lei n.º 220/08, - *Regime Jurídico da Segurança contra Incêndio em Edifícios* -, 12 de Novembro de 2008.
- [19] McGrattan, - *Fire Dynamics Simulator (Version 4.06): Technical Reference Guide* - Building and Fire Research Laboratory and National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2005.