

UTILIZAÇÃO DE JATOS PLANOS PARA CONTROLO DE FUMO: VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

João Alves Dias
Departamento de Edifícios, LNEC

João Carlos Viegas
Departamento de Edifícios, LNEC



RESUMO

Esta comunicação apresenta a validação preliminar de um modelo numérico baseado nas equações da mecânica e da termodinâmica de fluidos para aplicações de controlo de fumo. Verifica-se que o uso de cortinas de ar para compartimentação virtual é uma boa solução para manter a estanquidade ao fumo ao local sinistrado quando devidamente aplicado. Pretende-se neste trabalho apresentar a validação de um modelo adequado para apoio ao projeto e à verificação de desempenho de sistemas de controlo de fumo baseados na aplicação de cortinas de ar. Os resultados numéricos apresentam uma boa concordância com as medições dos ensaios à escala real.

ABSTRACT

This communication shows the numerical validation of the computational fluid dynamics model for smoke control applications. The implementation of air curtains in order to maintain smoke tightness is suitable when properly applied to avoid the physical compartment. This study aims to validate the numerical model to support the design and the performance verification of smoke control systems based on air curtains. The numerical results show a good agreement with the full scale experimental data.

Palavras-chave: Jatos Planos / Controlo de fumo / Cortina de ar / OpenFOAM.

1. INTRODUÇÃO

O uso de cortinas de ar é corrente na separação de ambientes com climas diferentes em que há necessidade de reduzir ou controlar as trocas de calor e de massa e de reduzir a contaminação entre diferentes compartimentos. No caso de incêndio, a elevada temperatura do fumo que estratifica na parte superior dos compartimentos, em contraste com as temperaturas mais baixas que ocorrem na camada inferior fria, gera um forte gradiente de pressão que não encontra paralelo nas aplicações de cortinas de ar em climatização, tornando particularmente exigente a aplicação de cortinas de ar no controlo de fumo em caso de incêndio. Não obstante, o uso de cortinas de ar na vertente de desenfumagem, quando aplicadas em conjunto com outros sistemas de controlo de fumo, permite assegurar a estanquidade do vão ao fumo. Diversos modelos CFD do tipo comercial têm sido utilizados com sucesso neste tipo de aplicações. O programa OpenFOAM tem sido alvo de inúmeros desenvolvimentos, e em particular tem atualmente disponível diversos “solvers” e bibliotecas adequados para fenómenos de transferência de calor, radiação e combustão, tendo sido utilizado no âmbito deste estudo.

2. ENSAIOS

Com o objetivo de avaliar a estanquidade do fumo num compartimento foi construída no interior de um hangar a instalação experimental à escala real (ver Fig. 1). O compartimento é construído com uma estrutura de aço e painéis de gesso cartonado, resistentes ao fogo, com 10 mm de espessura. O compartimento tem as dimensões em planta de 5,0 m x 4,0 m e tem 2,8 m de altura, reproduzindo aproximadamente as dimensões do compartimento utilizado como referência nas simulações CFD. Está dotado de uma abertura para o exterior (porta) de 0,9 m de largura e 2,0 m de altura. O compartimento está dotado de um ventilador de exaustão de caudal variável (regulado através de variador de velocidade) com capacidade de projeto de escoar caudais aproximadamente até 4,25 m³/s. A abertura de exaustão está localizada na parte superior da parede oposta à porta e tem as dimensões 0,625 m x 0,535 m. O caudal de exaustão no compartimento é medido através de um Tubo de Prandtl intercalado na conduta de exaustão a montante do ventilador, que foi calibrado para o efeito nessa posição, e referenciado pela frequência imposta no variador de velocidade. Existe um termopar colocado na admissão do ventilador, junto do Tubo de Prandtl e outro termopar colocado na exaustão do compartimento. Estes termopares permitem avaliar continuamente o arrefecimento do fumo na conduta de ligação do compartimento ao ventilador de forma a ser possível corrigir o valor do caudal volúmico efetivamente exaurido do compartimento. O

protótipo do ventilador que gera a cortina de ar foi instalado sobre o lintel da porta no lado exterior do compartimento, na configuração de jato vertical descendente. A velocidade do escoamento do ar na cortina é controlada pelo ajustamento da frequência num variador de velocidade e a velocidade é medida continuamente por um anemómetro de fio quente localizado na origem do jato. As medições deste anemómetro foram correlacionadas com a velocidade média jato por calibração prévia. A velocidade da cortina na origem varia (para os vários ensaios) entre 12,6 m/s e 20,8 m/s. A fonte de calor é constituída por uma tina, com 720 mm de diâmetro, dentro da qual é colocada a gasolina (“pool fire”). O consumo de gasolina é avaliado através da variação do peso do conjunto da fonte de calor, medido por uma célula de carga calibrada intercalada no seu apoio inferior. Este método de medição da potência calorífica libertada foi calibrado por análise do teor de oxigénio nos produtos da combustão (“oxygen depletion”). A fonte de calor está localizada no ponto (2115; 3250) do plano X0Z (ver Fig. 2). Foram dispostos no interior do compartimento 12 termopares do tipo K instalados sobre as paredes e 60 termopares do tipo J situados em três colunas verticais. Existe uma quarta coluna colocada junto da porta, no lado exterior ao jato, que se destina a avaliar a estanquidade ao fumo na porta. Existe ainda um conjunto de anemómetros que medem a velocidade do exterior da porta e no jato. Em cada ensaio procurou-se reduzir a velocidade do escoamento da cortina e o caudal de exaustão do compartimento até atingir o limite da estanquidade ao fumo da cortina.

Os ensaios confirmaram o potencial da cortina de ar com jato vertical descendente para limitar o escoamento do fumo para o exterior na porta, em conjunto com a exaustão do fumo a partir do interior do compartimento. Adicionalmente, foram realizados 3 ensaios com a cortina de ar inativa, para se obterem condições de referência do ambiente interior no cenário de incêndio com a cortina de ar inativa.

Na Fig. 2 (à esquerda), sem cortina de ar inativa, observa-se um caudal considerável de fumo para o exterior da cortina e à direita a cortina de ar ativa evidenciando a capacidade de vedação.

3. MODELO NUMÉRICO

O openFOAM tem disponíveis diversos “solvers” e modelos para fenómenos de transferência de calor e massa. Nesta comunicação é utilizado o “solver buoyantSimpleFoam” que assume um modelo incompressível, estacionário e adaptado para modelar o efeito da impulsão. Este modelo, ainda em fase de desenvolvimento, não modela a combustão, radiação e a concentração de partículas. Assim, foi utilizada a abordagem simplificada baseada na

caracterização da combustão como uma fonte de calor volumétrica, deduzida das suas perdas de calor por radiação. A modelação com uma fonte de calor volumétrica conduz ao cálculo do campo de temperaturas por modificação do termo fonte na equação de energia, não entrando em consideração com a modelação da combustão (formação de produtos da combustão e cinética química) nem com a transmissão de calor por radiação.

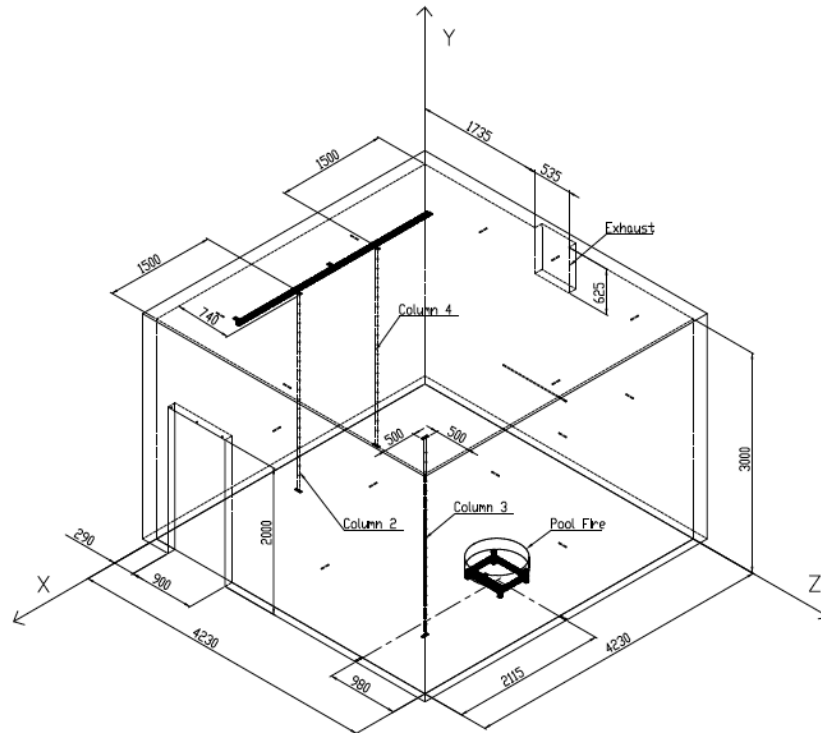


Fig. 1 – Compartimento do ensaio experimental

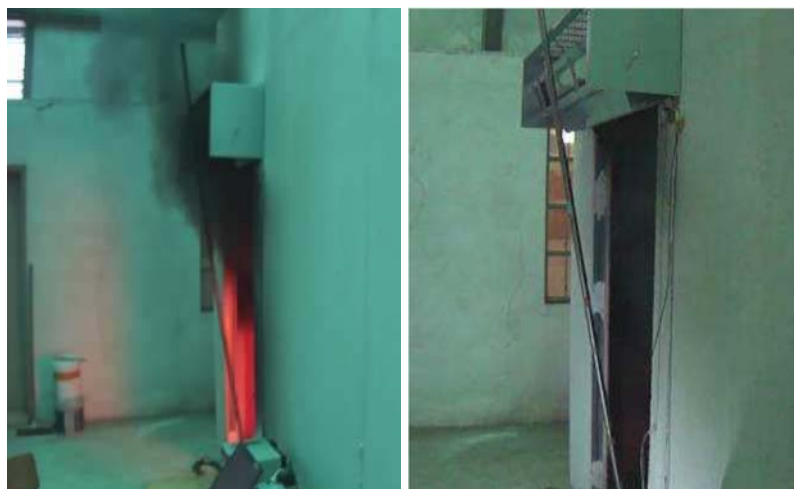


Fig. 2 – Ensaio com a cortina de ar não ativa (Esquerda) e com cortina de ar ativa (Direita).

A potência calorífica convectada foi estimada com base na temperatura do fumo na exaustão (Viegas e Cruz 2015). Assim, determinou-se que o valor da potência convectada, nos ensaios correspondentes às simulações realizadas, atinge cerca de 40% da potência calorífica total libertada.

O volume associado à fonte de calor, representativo do volume ocupado pela chama, foi estimado com base na altura da chama (L_f), determinada pela equação empírica que correlaciona a altura de chama no instante em que é atingido a potência calorífica libertada máxima e o diâmetro da tina do manual da SFPE (Gunnar 2002).

$$L_f = -1,02D + 0,235\dot{Q}_c^{2/5} \quad (1)$$

onde D é o diâmetro da tina de 720 mm e Q_c a potência convectada. Determinou-se uma altura de 1,6 m.

Para o fecho das equações de Reynolds, foi utilizado o modelo de turbulência k - ϵ padrão com as constantes típicas (Launder e Spalding 1974). Este modelo de duas equações assume que as tensões turbulentas são linearmente relacionadas com a taxa de deformação da viscosidade turbulenta e assume a isotropia das tensões turbulentas. Este modelo, tem sido largamente aplicado com sucesso, em modelos com cenários de fogo, e escoamentos com recirculações. Apesar de ser um modelo simplista por comparação com outros modelos, é altamente recomendável em termos de tempo de computação.

Os coeficientes de sub-relaxação foram todos fixados em 0,7. As condições iniciais da turbulência, k e ϵ , foram determinadas considerando uma intensidade de turbulência no bocal do jato de 1% tendo sido determinado o valor de k e ϵ inicial de 0,01.

Foi utilizado um modelo em regime estacionário tendo em vista estabelecer e validar parâmetros iniciais como condições de fronteira, modelos de turbulência, e esquemas numéricos. Nos esquemas numéricos foram utilizados esquemas de diferenças a montante de primeira ordem. O acoplamento entre pressão e velocidade, disponível para escoamentos em regime estacionário, é realizado através de um método iterativo, com o algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) (Versteeg e Malalasekera 2007). Os esquemas numéricos que transformam as variáveis algébricas utilizado é o PCG (Preconditioned Conjugate Gradient) para pressão e o PBiCG (Preconditioned Bi-Conjugate Gradient) para as restantes variáveis (U , h , k , ϵ). O critério adotado para a convergência da solução foi estabelecido com base nos seguintes critérios: 1) os resíduos inferiores a 10^{-6} ; 2) o perfil de temperaturas nas diversas colunas, permanece constante ao longo das sucessivas

iterações; 3) o caudal mássico na exaustão permanece constante ao longo das sucessivas iterações, condição indicativa de que a temperatura na exaustão permanece constante. Com base nestes critérios, verificou-se que a simulação convergiu sempre abaixo das 50000 iterações. Nas condições de fronteira do tipo parede foi aplicado uma condição sem escorregamento definindo as velocidades a zero e fronteiras adiabáticas para o cálculo da temperatura nas paredes, i.é, impondo um gradiente de temperatura nulo. Na fonte de calor volumétrica foi imposto uma taxa de calor libertada constante uniformemente distribuída em todo o volume.

Com vista a avaliar a capacidade do modelo numérico foram efetuados três procedimentos de validação: simulação do jato plano, simulação sem cortina ativa e simulação com cortina ativa. Nas simulações com e sem cortina ativa, foram realizados ensaios tendo em vista a obtenção de uma potência calorífica semelhante.

4. VALIDAÇÃO DO JATO PLANO

O jato plano vertical descendente foi validado em regime isotérmico num domínio de cálculo bidimensional de dimensões 2 m x 2 m, sendo discretizado através de uma malha cartesiana, com distribuição uniforme dos elementos.

Com o objetivo de verificar o comportamento do modelo numérico na simulação de jatos planos foram realizadas três simulações para velocidades, U_0 , de 1 m/s, 19,9 m/s (ambas com uma inclinação do jato relativamente ao plano da porta de 0º) e 19,9 m/s com inclinação de 22º e espessura do jato de 25 mm (em todos os casos). Os perfis dos resultados numéricos foram comparados sistematicamente com a solução analítica do jato plano livre Eq. (2):

$$U = 3,4 \left(\frac{b_0}{2x} \right)^{0,5} U_0 e^{-57(y/z)^2} \quad (2)$$

onde U é a velocidade longitudinal do jato, b_0 é a largura na origem e U_0 a velocidade do jato na saída do difusor. Esta equação representa o campo de velocidade longitudinal média (temporal) e os resultados das simulações correspondem ao módulo da velocidade, pelo que incluem a componente transversal ao escoamento provocada pelo arrastamento do ar. Não é espectável que o jato simulado seja diretamente comparável com a solução analítica, porém a sua comparação contribui para avaliar a precisão dos resultados numéricos.

Na Fig. 3 apresenta-se o perfil de velocidades para as três simulações considerando a velocidade de saída do jato de 1m/s (alíneas a) a c)), 19,9 m/s (alíneas d) a f)) e 19,9 m/s com

inclinação de 22° (alíneas f) a h)) para três secções: a 0,5 m, 1,0 m e 1.5 m em relação à saída do jato. Verifica-se que o perfil de velocidades nas secções próximas à saída do jato é muito conservativo resultando em velocidades superiores à solução analítica. Este facto obriga a que o ar arrastado pelo jato seja menor, pelo que se traduz num perfil menos preenchido, comparativamente ao jato teórico na zona de escoamento desenvolvido. Este efeito, em zonas próximas do difusor, torna-se menos pronunciado em simulações do jato com velocidades elevadas e em simulações de jato livre inclinado, devido à falsa difusão numérica provocada pelo desalinhamento do jato relativamente à discretização do domínio de cálculo e pelo diminuto número de elementos face aos esquemas numéricos utilizados. A implementação de outros modelos de turbulência adequados para este tipo de aplicações (k-w SST, RSM, por ex.) pode minimizar este efeito. Contudo, dado o aumento do tempo cálculo pelo que pode ser proibitivo computacionalmente.

Verifica-se que com o aumento da distância à origem, o perfil de velocidades é concordante com a solução analítica (ver Fig. 3).

5. VALIDAÇÃO SEM CORTINA DE AR ATIVA

A validação do ensaio sem cortina foi realizada no sentido de verificar o comportamento do modelo numérico em descrever as condições de referência do ambiente interior do cenário de incêndio.

No sentido de avaliar a independência da solução relativamente à malha foram realizadas simulações com três tipos de malhas estruturadas, com 400340 (malha 01), 427740 (malha 02) e 705680 (malha 03) elementos. A malha 02, foi realizada tendo em vista uma otimização do número de elementos. Assim foi incrementando o número de elementos na zona da porta e na zona da fonte de calor volumétrica face à malha 01. Verifica-se genericamente que o perfil de temperatura dos resultados numéricos é similar aos perfis medidos. Na coluna de termopares na porta, esta discrepância é maior, provavelmente devido ao efeito do aquecimento direto por radiação dos termopares a cota mais baixa, que têm vista para a fonte de calor por se encontrarem fora da camada de fumo. Adicionalmente, verifica-se que os perfis de temperatura entre a malha 02 e a malha 03 são similares, pelo que se verifica a independência da solução com estas malhas.

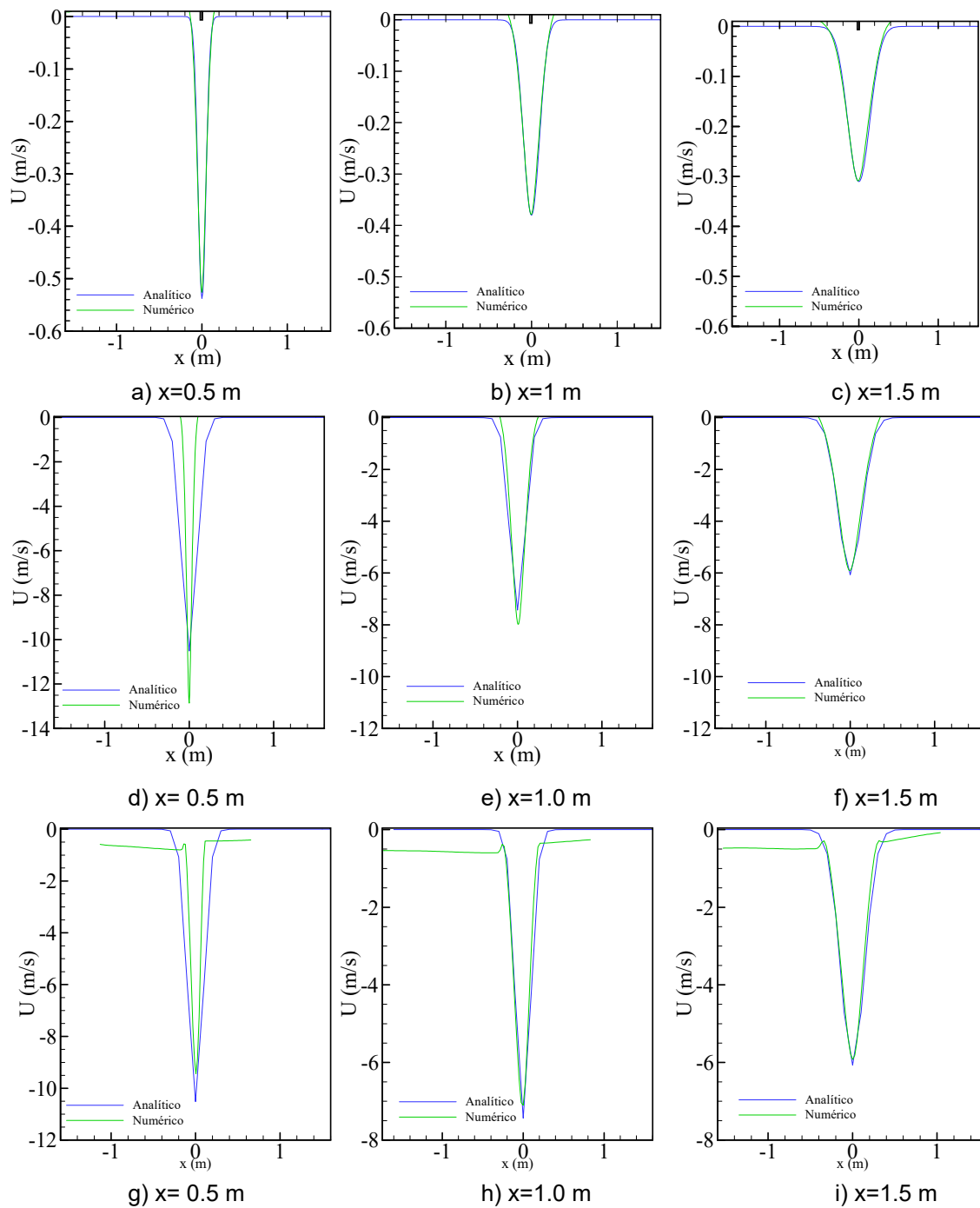


Fig. 3 – Comparação dos perfis de velocidade com a solução analítica: jato vertical com $U_0=1,0$ m/s - alíneas a) a c); jato vertical com $U_0=19,9$ m/s- alíneas d) a f); jato inclinado com $U_0=19,9$ m/s e inclinação de 22° - alíneas g) a i).

6. SIMULAÇÃO COM CORTINA DE AR ATIVA

Esta comunicação foca-se no desempenho e aplicação do uso de cortinas para garantir a estanquidade ao fumo. A estanquidade é garantida através de um equilíbrio de forças entre a pressão dentro do compartimento e a variação da quantidade de movimento associado ao jato. A validade e aplicação subjacente a este tipo de aplicações, já foi alvo de inúmeras análises de sensibilidade através de ensaios experimentais em água salgada (Viegas e Hildebrando 2014) e ensaios de fogo (Viegas e Hildebrando 2016). A discretização utilizada para a simulação com cortina de ar ativa foi construída com base na malha 02, referida na secção anterior e com base na malha utilizada na validação do jato plano.

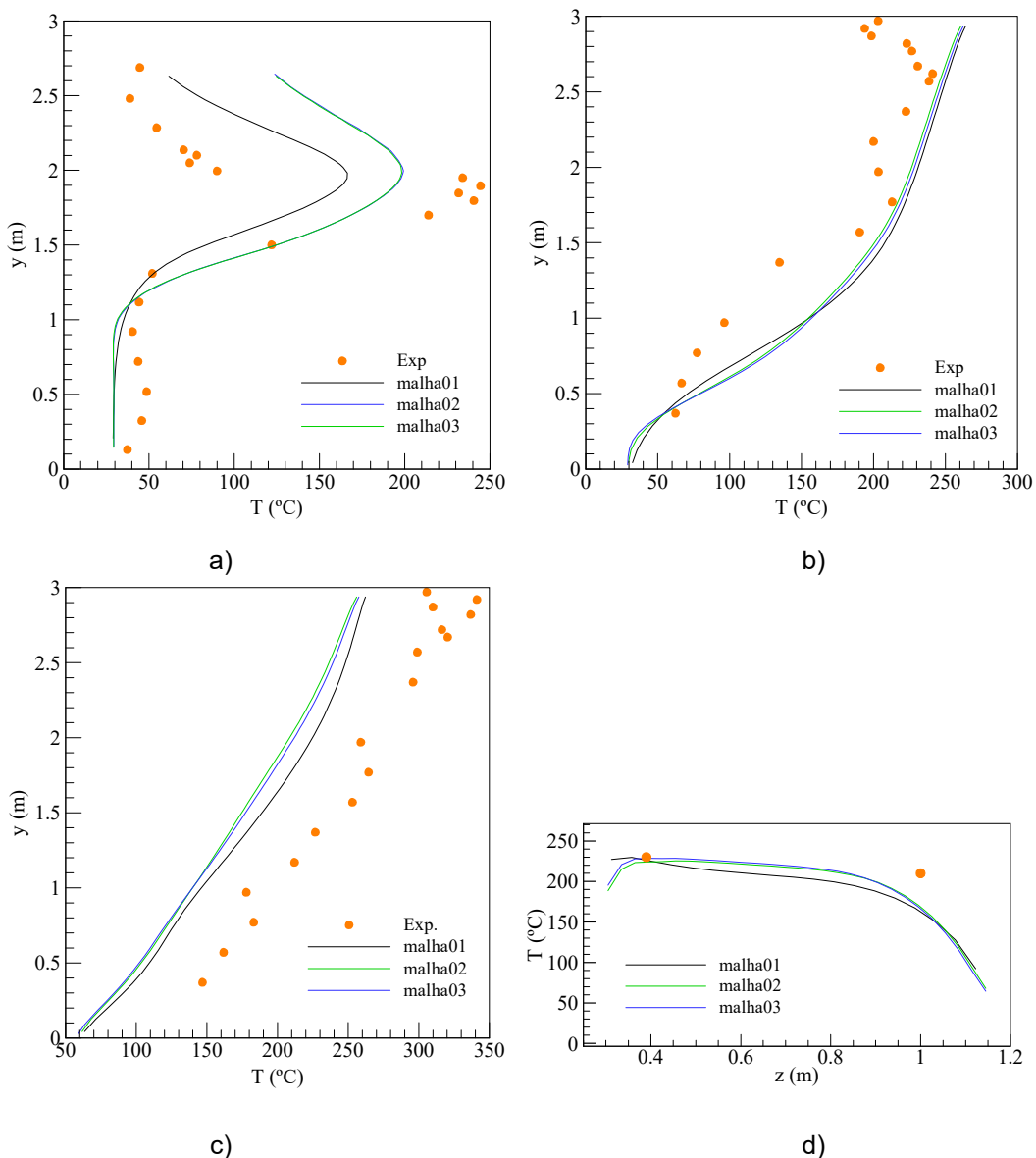


Fig. 4 – Perfis de temperatura sem cortina ativa: a) coluna 1; b) coluna 2; c) coluna 3; d) termopares no lintel da porta

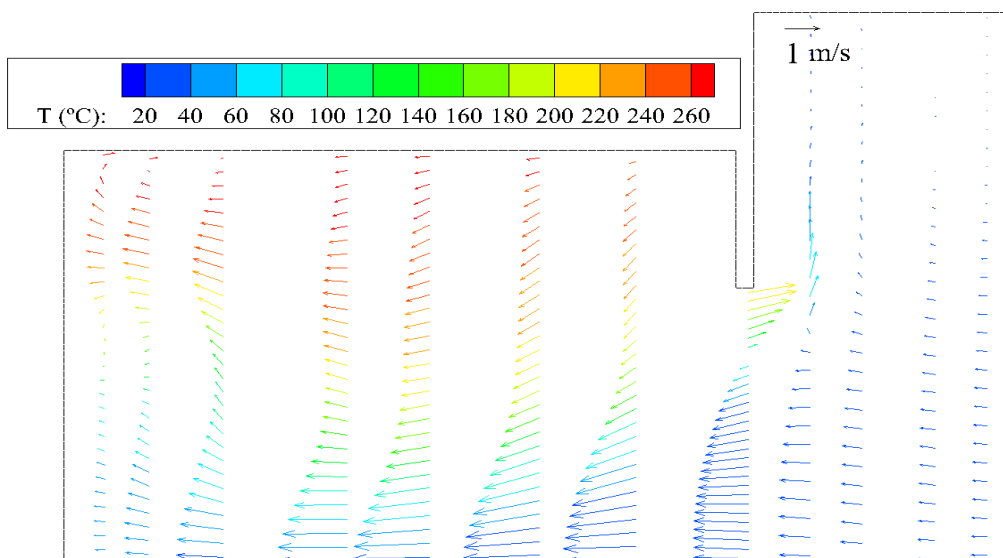


Fig. 5 – Representação dos vetores de velocidade representativo do escoamento sem cortina ativa no plano longitudinal da porta

Na Fig. 6 apresenta-se a comparação dos perfis de temperatura das simulações numéricas com os dados medidos. Verifica-se que os resultados numéricos têm o mesmo comportamento dos perfis de temperatura medidos experimentalmente. Contudo, verifica-se que o campo de temperaturas simulado na zona abaixo da camada de fumo, particularmente na coluna de termopares na porta é largamente inferior aos valores medidos. Esta discrepância é devida ao facto da radiação não ser simulada. Não obstante, esta diferença não é tão pronunciada no campo de temperaturas junto ao teto devido à opacidade do fumo em que o efeito da radiação não é tão intenso.

Nota-se que a utilização de cortina prejudica a estratificação térmica. Não obstante, na Fig. 7 verifica-se que é possível garantir parcialmente a estratificação térmica, à semelhança dos ensaios experimentais.

7. CONCLUSÕES

Verifica-se que através de uma otimização do caudal de exaustão, dentro dos valores regulamentares, e do jato com ar novo da cortina é possível garantir a estanquidade da abertura exterior ao fumo. Conclui-se que o modelo simula corretamente o escoamento convectivo na porta pelo que é capaz de avaliar a estanquidade ao fumo. Contudo, verifica-se a necessidade de implementação de um modelo de combustão (formação de produtos da

combustão e cinética química) e da transmissão de calor por radiação dos produtos da combustão para se melhorar a simulação dos campos de temperatura e de velocidade no interior do compartimento.

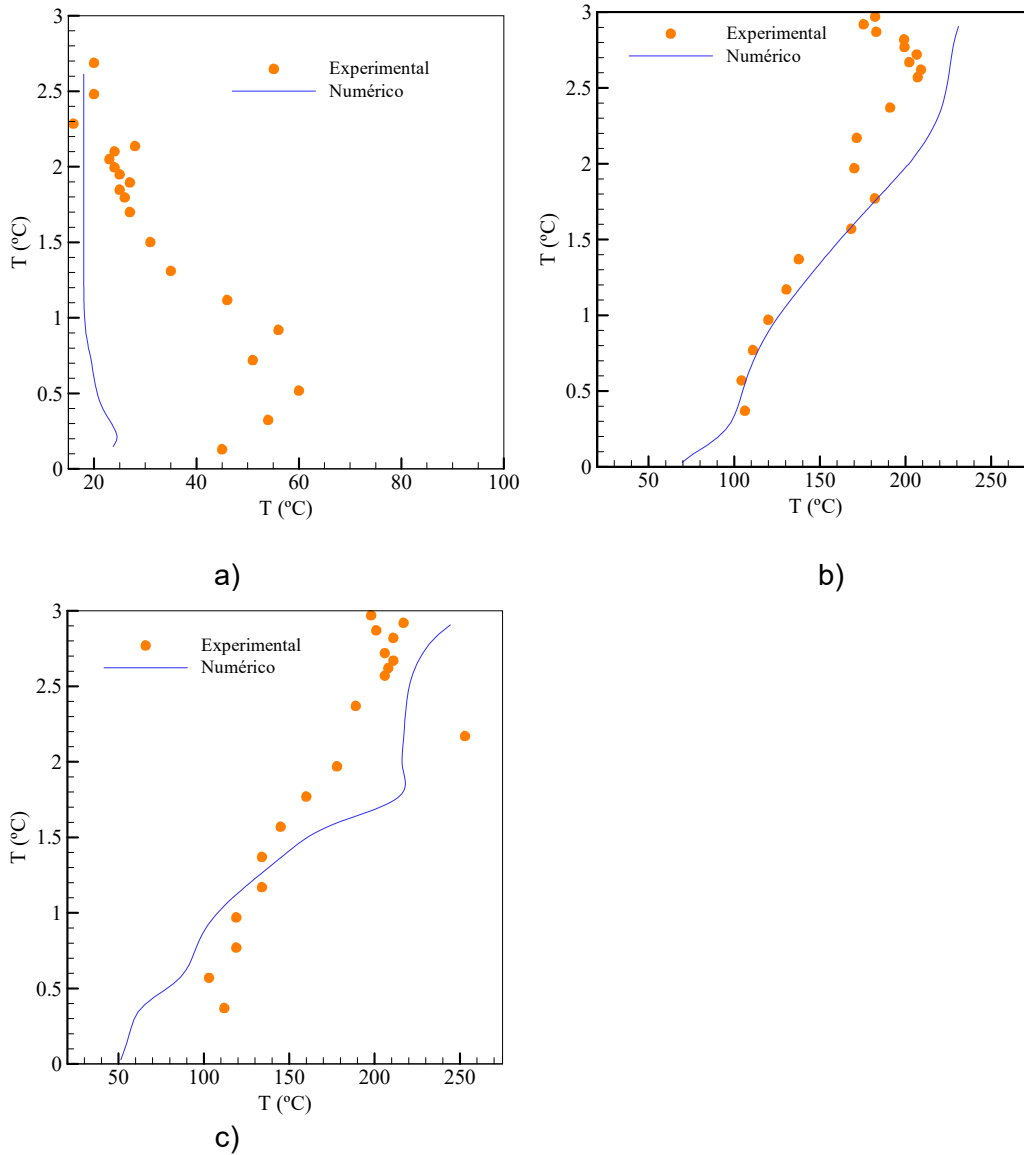


Fig. 6 – Perfis de temperatura sem cortina ativa: a) coluna 1; b) coluna 2; c) coluna 3;

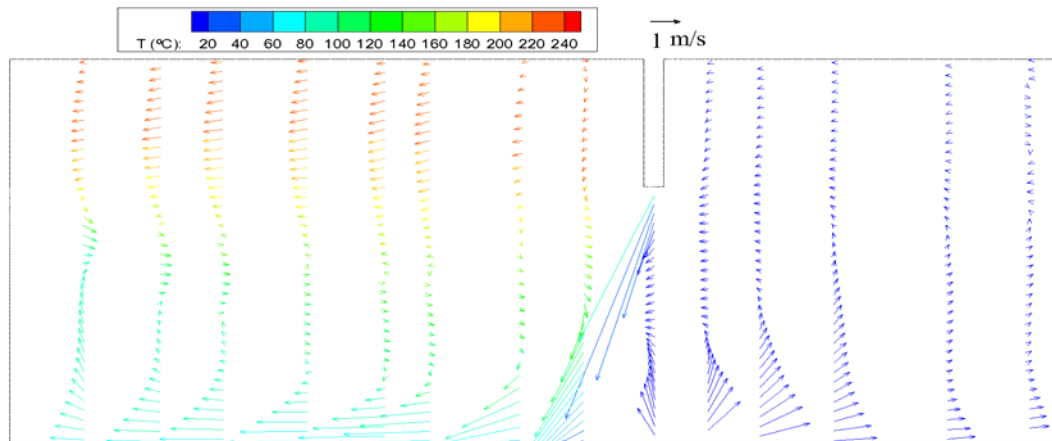


Fig. 7 – Vectores de velocidade representativos do escoamento com cortina ativa

8. BIBLIOGRAFIA

- Blevins, R.D. 1984. Applied fluid dynamics handbook. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, USA.
- Gunnar H. et al. 2002. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., vol. 2.1, National Fire Protection Association.
- Launder, B.E., Spalding, D.B. 1974. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 3 (2): 269–289. doi:10.1016/0045-7825(74)90029-2.
- Versteeg, H. K., e Malalasekera, W. 2007. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Harlow, England: Pearson Education Ltd.
- Viegas J.C., Cruz H. 2014. Saltwater experiments of air curtains to smoke control in fires. V Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia. MEFTE 2014, 11–12 Setembro, Porto, Portugal.
- Viegas, J.C. e Cruz H. 2014. Computational simulation on the performance of air plane jets for smoke control. 4.as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos, 6-7 novembro de 2014, Bragança, Portugal.
- Viegas, J.C. e Cruz, H. 2015. Full-size experiments of air curtains for smoke control in case of fire. IFireSS – International Fire Safety Symposium, 20th-23rd April, Coimbra, Portugal.
- Viegas J. C., Cruz, H. 2016. Full-size experiments of air curtains for smoke control in case of fire: Final results. 5.as Jorninc – Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos. 1 e 2 Junho de 2016, Lisboa, Portugal.
- Krajewski G. and Wegrzynski 2015. Air curtain as a barrier for smoke in case of fire: Numerical modelling. Bulletin of the polish academy of sciences technical science, Vol. 63, Nº 1, 2015. DOI: 10.1515/bpasts-2015-0016.