

INFILTRAÇÃO DE AR ATRAVÉS DE PORTAS DE ACESSO A CÂMARAS FRIGORÍFICAS.

Verificação Experimental de Previsões Analíticas e através de CFD

JOÃO GONÇALVES ^{1,2}
JOSÉ COSTA ²
ANTÓNIO FIGUEIREDO ²
ANTÓNIO LOPES ²

¹ CI&DETS, Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viseu.
² ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.

Resumo

Neste trabalho apresenta-se a medição experimental da taxa de infiltração de ar num espaço arrefecido (câmara frigorífica à escala laboratorial), através da utilização da técnica de gases traçadores. Os resultados obtidos foram confrontados com as previsões dadas por três modelos analíticos e também com os obtidos por simulação numérica CFD.

Como consequência da infiltração de ar “quente” para o interior da câmara frigorífica, a temperatura média no seu interior vai aumentando – diminuído o diferencial de temperatura, pelo que se trata claramente de um processo transiente. Uma vez que os modelos analíticos têm subjacente a condição de regime permanente, confirma-se que estes não são adequados para avaliar a taxa de infiltração. Por outro lado, os resultados obtidos por via numérica apresentam uma boa concordância com os resultados experimentais, mostrando que o modelo é apropriado para avaliar a infiltração de ar na câmara frigorífica.

1. Introdução

Sempre que se abre a porta de acesso de uma câmara frigorífica, seja em operações de rotina ou em operações de carga e descarga, como consequência da diferença de temperatura é inevitável a troca de ar entre o interior e o exterior. Isto implica obviamente um aumento da carga de refrigeração.

Esta infiltração causa vários problemas, dos quais: perda de qualidade dos produtos devido a flutuações de temperatura; aumento dos custos de funcionamento do sistema de frio, uma vez que terá de funcionar durante mais tempo; problemas de segurança, devido ao gelo que se forma nas entradas.

Os estudos que estabelecem a teoria da convecção natural através de aberturas, provocada pelas forças de impulsão devido à diferente densidade de fluidos a diferentes temperaturas, foram realizados há mais de 70 anos. Desde aí, vários investigadores têm contribuído com o desenvolvimentos de novos modelos, sendo que todos eles se baseiam na teoria de um escoamento ideal não tendo em conta a viscosidade e efeitos térmicos, resultando geralmente numa previsão da infiltração superior ao real.

Dos vários modelos analíticos disponíveis na literatura para o cálculo da infiltração, serão aqui analisados três deles e que se descrevem de seguida:

(i) Modelo de Fritzsche & Lilienblum [1]

O modelo assume caudal volumétrico de ar igual que entra e sai de um compartimento. Os autores introduziram um factor de correcção que tem em conta a contracção do escoamento devido à abertura. A infiltração – inf [m^3/s] – é calculada através de:

$$Inf = 0.333K_{F,L}A(gh)^{0.5} \left[\frac{(\rho_i - \rho_e)}{\rho_i} \right]^{0.5} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right)^{0.333}} \right]^{1.5} \quad (1)$$

Sendo o factor de correcção dado por: $K_{F,L} = 0.48 + 0.004(T_e - T_i)$

Onde, h e A representam a altura e a área da porta, respectivamente, g a aceleração da gravidade, T_i e ρ_i referem-se à temperatura e massa volúmica do ar interior, T_e e ρ_e as respectivas propriedades do ar exterior.

(ii) Modelo de Gosney & Olama [2]

No caso de um dos compartimentos ser arrefecido, o caudal volumétrico que entra será diferente do que abandona esse mesmo compartimento. Contudo, a massa de ar no espaço arrefecido permanecerá constante, uma vez que, quer o volume, quer a densidade do ar no espaço interior, permanecem constantes. Gosney & Olama propuseram uma equação que considera a conservação do caudal mássico:

$$Inf = 0.221A(gh)^{0.5} \left[\frac{(\rho_i - \rho_e)}{\rho_i} \right]^{0.5} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_e} \right)^{0.333}} \right]^{1.5} \quad (2)$$

(iii) Modelo de Pham & Oliver [3]

Pham e Oliver conduziram um estudo do fluxo de ar através de aberturas de espaços arrefecidos, tendo proposto a seguinte expressão para o cálculo da infiltração, a fim de concordar com os resultados obtidos:

$$\dot{V}_{RP} = 0.226A(gh)^{0.5} \left[\frac{(\rho_i - \rho_e)}{\rho_i} \right]^{0.5} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right)^{0.333}} \right]^{1.5} \quad (3)$$

A aplicabilidade dos modelos analíticos acabados de descrever apresenta algumas limitações, nomeadamente: não tem em conta a relação entre a dimensão da porta e da altura e comprimento do espaço; não tem em conta os efeitos tridimensionais do escoamento, uma vez que admitem que o escoamento se dá apenas segundo a direcção perpendicular à porta; não tem em conta efeitos de viscosidade e admitem condições de escoamento em regime permanente.

Em câmaras frigoríficas pequenas, como o volume de ar é reduzido e as mudanças de ar são mais frequentes, o fenómeno é claramente transiente. Contrariamente, em câmaras grandes o fenómeno pode ser considerado aproximadamente em regime permanente, nomeadamente quando a porta é mantida aberta durante intervalos de tempo reduzidos. A modelação CFD pode prever as variações de temperatura, em função do tempo, dentro do espaço arrefecido e na sua vizinhança circundante.

O objectivo deste trabalho consiste na medição experimental da taxa de infiltração de ar admitida para o interior de uma câmara frigorífica específica (à escala laboratorial) e comparação com as previsões obtidas pela aplicação de modelos analíticos e, ainda, através de simulação numérica, utilizando a Mecânica de Fluidos Computacional (CFD).

2. Instalação Experimental

Nesta instalação foram realizados alguns ensaios para a caracterização do campo de escoamento nas imediações da porta de acesso a uma câmara frigorífica. Foram também medidos os campos de temperatura e avaliadas as trocas gasosas entre estes dois espaços.

2.1. Geometria

A instalação experimental (à escala laboratorial) consiste em duas salas, aproximadamente com as mesmas dimensões $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ cada uma, ligadas entre si por uma porta com 0.6 m de largura e 1 m de altura (cf. figura 1), e centrada segundo a largura das salas. Pretende-se que uma das salas represente a câmara frigorífica, e que a outra represente o exterior cujas propriedades se pretende controlar (esta, por razões construtivas, sensivelmente mais pequena). As duas salas foram construídas numa base de madeira e revestidas internamente com placas de um material isolante (poliestireno). As paredes da sala que simulam a câmara frigorífica (sala fria), têm uma espessura de 7cm – 6cm de isolante + 1cm contraplacado marítimo no exterior; a outra, que se espera estar a temperaturas mais próximas do exterior, foi construída apenas com placas de material isolante com 6cm de espessura. A porta de ligação entre as salas, com abertura de deslocamento vertical (tipo guilhotina), foi construída em madeira e forrada com material isolante – 1cm madeira + 3cm de isolante. Embora seja difícil assegurar a estanquicidade pretendida, quer relativamente ao exterior, quer relativamente às próprias salas, todas as fissuras (pelo menos as visíveis), foram obstruídas com poliuretano expandido. O chão foi isolado com 6cm de material isolante e coberto com uma folha de madeira rectificada (chão flutuante).

A climatização da sala arrefecida foi feita com recurso a um sistema de refrigeração (com o evaporador localizado no centro do tecto da sala), e a sala quente aquecida com um termo-convector eléctrico.

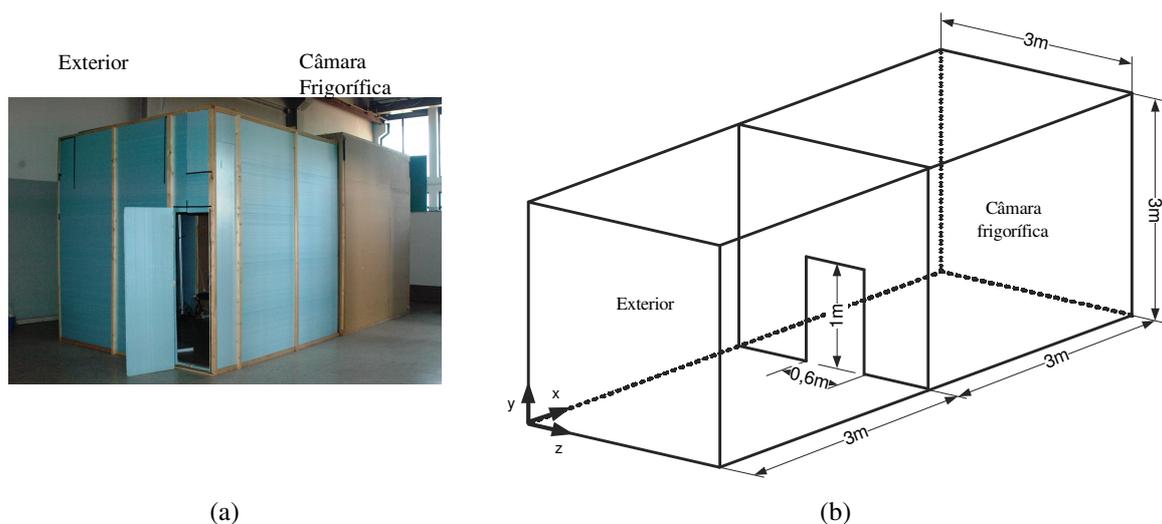


Figura.1. (a) Instalação experimental com dois compartimentos; (b) Esquema da instalação com indicação das dimensões relevantes.

2.2. Medição da velocidade e temperatura

A medição da temperatura na sala “dita” fria foi feita recorrendo a 15 termopares (tipo K), distribuídos de uma forma homogênea por todo o compartimento. Para a medição da temperatura na sala que representa o exterior, utilizaram-se 14 sondas omnidireccionais de medição simultânea de velocidade e temperatura. Estas sondas serviram também para medir o perfil de velocidades no plano da porta.

Para a monitorização e registo das propriedades físicas, recorreu-se a um sistema de aquisição de dados, constituído por uma placa de expansão “EXP 32”, duas placas de aquisição “DAS 1600”, um computador e um programa de aquisição de dados.

2.3. Taxa de infiltração

Para a determinação da taxa de infiltração, foi utilizada a metodologia dos gases traçadores. Esta técnica é largamente utilizada para avaliar as trocas de ar através de aberturas entre dois compartimentos. Segundo o método de decaimento (aqui utilizado), no início de cada ensaio, uma pequena quantidade de gás (CO₂, neste caso) é libertado no compartimento arrefecido. Para garantir uma certa uniformidade da concentração de gás, e também da temperatura, foram utilizados ventiladores em ambos os espaços. Após serem estabelecidas as condições de temperatura pretendidas, os ventiladores eram desligados e o sistema de aquisição colocado em modo de registo. Aproximadamente 30s depois, a porta de ligação era aberta e a concentração média de CO₂ na sala arrefecida medida em contínuo. O equipamento utilizado para a sua monitorização foi um analisador de CO₂ da marca SENSOTRON, modelo PS32.

A taxa de infiltração na sala arrefecida pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$Inf = \frac{V}{t} \ln \left(\frac{C_i - C_{ext}}{C_f - C_{ext}} \right)$$

Em que V (m³) representa o volume da sala arrefecida, C_i é a concentração de CO₂ antes da abertura da porta, C_f após a porta ser fechada, C_{ext} refere-se à concentração de CO₂ no exterior, e t o tempo em que a porta é mantida aberta.

3. Modelo CFD

Um modelo numérico tridimensional foi implementado utilizando um código comercial ANSYS-CFX.

O modelo tridimensional de estudo é constituído por dois compartimentos colocados a diferentes temperaturas e ligados entre si através de uma porta (cf. figura 2). As dimensões do domínio coincidem com as da geometria experimental.

Uma vez que é evidente a existência de um plano de simetria, assim, e para poupar tempo de cálculo, apenas foi simulado metade do domínio.

A metodologia baseou-se na simulação numérica transiente e tridimensional de um escoamento turbulento de ar (considerado gás ideal), desenvolvido no domínio das duas salas, inicialmente a temperaturas diferentes, separadas por uma porta de ligação, que subitamente é aberta. As soluções a obter baseiam-se na resolução das equações, escritas em médias temporais de Reynolds, da continuidade, momento e energia. Para a modelação da turbulência foi utilizado o modelo k-. O esquema de advecção utilizado foi o esquema de elevada resolução. O esquema transiente utilizado – que define o algoritmo de discretização dos termos transientes – foi o modelo de segunda ordem de Euler. No controlo da convergência foi considerado um máximo de 3 iterações por passo de tempo, e um resíduo máximo de 1.0E⁻⁴.

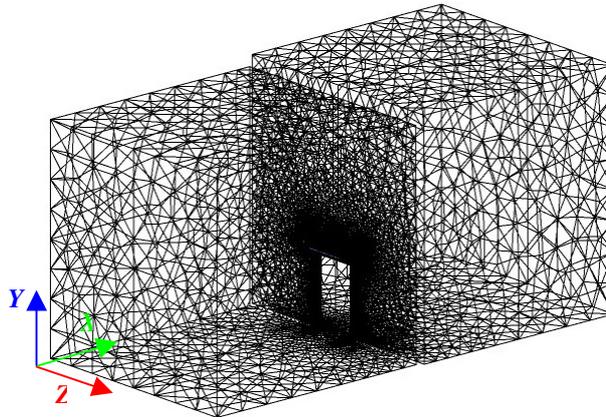


Figura 2. Esquema da grelha de cálculo refinada na zona da porta.

Como condições iniciais, considerou-se velocidade zero imposta a todo o domínio e temperatura de 5°C para o compartimento arrefecido e 30°C para o compartimento aquecido. A fim de contabilizar as trocas de ar que se dão entre os dois compartimentos, utilizou-se uma metodologia similar à técnica de gases traçadores, utilizada nos ensaios experimentais. Assim, foi “criado” um segundo fluido fictício com as mesmas propriedades do ar, designado *gás traçador*, com uma fracção mássica inicial uniforme de 0.075 na “sala arrefecida” e de zero no “ambiente exterior”.

Todas as paredes foram consideradas adiabáticas e imposta a condição de não aderência.

Foi também assumido que: o interior do domínio de cálculo não tem massa térmica (sem fontes de calor ou seja produtos); a humidade não tem influência na troca de calor; o ar é apenas trocado pela porta (câmara estanque, excepto a porta).

Relativamente à grelha de cálculo, foi utilizada uma grelha não estruturada e, uma vez que se espera uma maior variação das grandezas nas imediações da porta, a malha foi refinada nestas zonas (cf. figura 2). Foi feito um estudo de independência da malha e, uma vez que se trata da simulação de um fenómeno transitório, efectuou-se também uma análise relativamente ao passo de avanço no tempo, tendo-se utilizado um passo de tempo de 0.1s.

4. Apresentação e discussão de resultados

Na figura 3 apresenta-se a taxa de infiltração em função do intervalo de tempo em que a porta é mantida aberta. Como se pode observar, a taxa de infiltração obtida experimentalmente varia consideravelmente ao longo do tempo. As flutuações que se observam no gráfico devem-se, provavelmente, quer à metodologia de captação do CO₂ pelo aparelho de analisador de gases, pois embora se tenha tentado minimizar este efeito através da captação de CO₂ em seis postos distintos, a concentração no domínio da sala arrefecida é bastante heterogénea, como se pode verificar pela figura 4, que mostra o campo de temperaturas, quer ao intervalo mínimo de medida do equipamento que é de 10s. Por outro lado, com o decorrer do tempo, vai-se atenuando a diferença de temperaturas entre os dois espaços, diminuindo também a taxa de infiltração.

Observa-se também que o modelo numérico consegue prever, com bastante precisão, qualitativamente e quantitativamente, a taxa de infiltração ao longo do tempo.

Uma vez que os modelos analíticos admitem condições de regime permanente, a taxa de infiltração mantém-se constante e independente do tempo após a abertura da porta. Como se pode observar, todos os modelos analíticos tendem a sobreavaliar a taxa de infiltração relativamente ao verificado experimentalmente. Contudo, os modelos de *Fritzsche & Lilienblum* e *Gosney & Olama* são os que melhor prevêm a infiltração máxima obtida experimentalmente, sendo capazes de dar uma boa estimativa para curtos períodos de tempo de porta aberta.

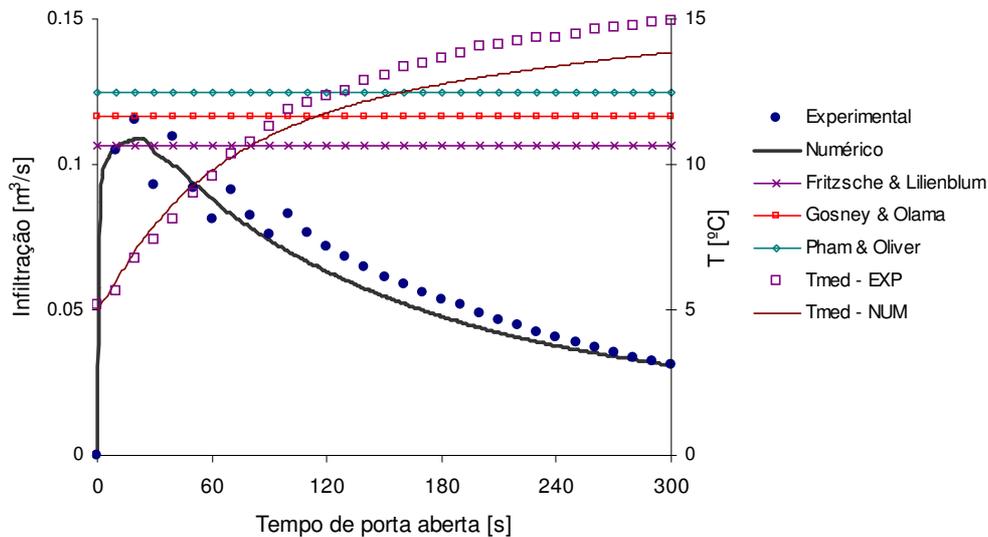


Figura 3. Evolução da infiltração de ar pela porta de acesso à câmara frigorífica e evolução da temperatura média interior por via experimental e numérica.

Uma vez iniciada a infiltração de ar pela porta – devido à diferença de densidades do ar interior e exterior – esta aumenta rapidamente, atingindo o seu máximo aproximadamente 20s após a abertura da porta. Com o decorrer do tempo, com a diminuição da diferença de temperaturas, decresce também a taxa de infiltração. Na figura 3 mostra-se ainda a evolução temporal da temperatura média do espaço arrefecido. Como se pode observar, a temperatura no interior aumenta rapidamente ao longo do tempo. A discrepância da evolução da temperatura obtida por via numérica e experimental pode dever-se ao facto de no modelo numérico todas as paredes serem consideradas adiabáticas enquanto que experimentalmente alguma energia é admitida para o espaço interior pelas paredes que não são completamente isolantes.

O acabado de referir pode também ser confirmado através da figura 4, que mostra o campo de temperatura e velocidade para os instantes de tempo de 30s e 120s após a abertura da porta.

Como seria de esperar, uma vez aberta a porta de ligação, o ar frio interior tende a sair pela parte inferior da porta, ao mesmo tempo que o ar quente entra no espaço arrefecido pela parte superior. Para ser garantida a conservação de massa no domínio das duas salas, e uma vez que a densidade do ar interior é superior à do ar exterior, consequência das suas temperaturas, seria de esperar que o ponto neutro (ponto de inversão do escoamento) se localizasse abaixo do ponto médio da altura da porta. Na verdade, verifica-se exactamente o contrário, isto é, numa fase inicial o ponto neutro situa-se ligeiramente acima da meia altura da porta. Verifica-se também que a magnitude da velocidade é maior na parte superior da porta. Com o decorrer do tempo, o escoamento perde vigor e o ponto médio tende para a meia altura da porta. Este facto pode ser confirmado pela observação da figura 4, em que a “esfera branca” representa a meia altura da porta, e também pela figura 5.

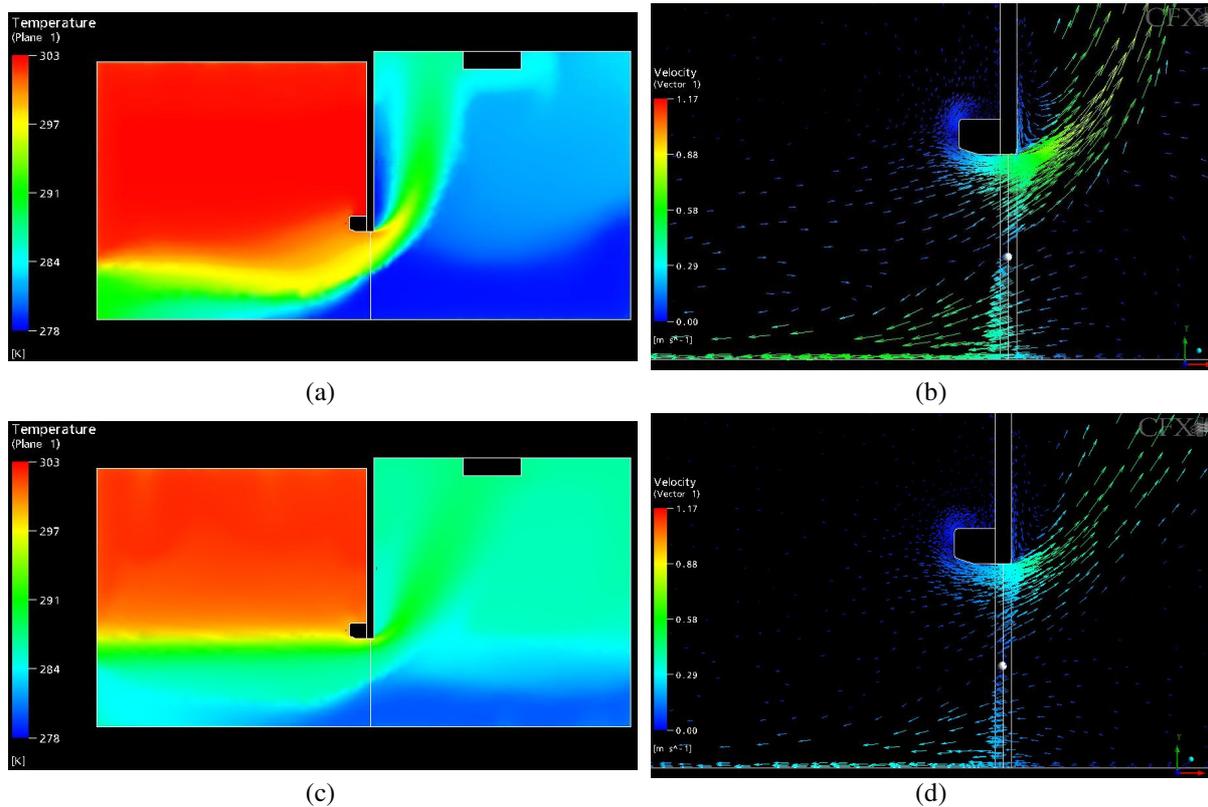


Figura 4. Campos de temperatura (a,c) e velocidade (b,d), para instantes $t=30s$ (a,b) e $t=120s$ (c,d) após a abertura da porta obtidos por via numérica, para um plano médio segundo a largura das salas.

Na figura 5 mostram-se os perfis verticais de velocidade, a partir da soleira da porta, obtidos experimentalmente com as 14 sondas termo-anemométricas colocadas no plano da porta, e também os valores obtidos por via numérica. Como se pode observar, verifica-se uma boa concordância dos resultados obtidos por ambas as vias. Este facto serve também para validar o modelo de cálculo.

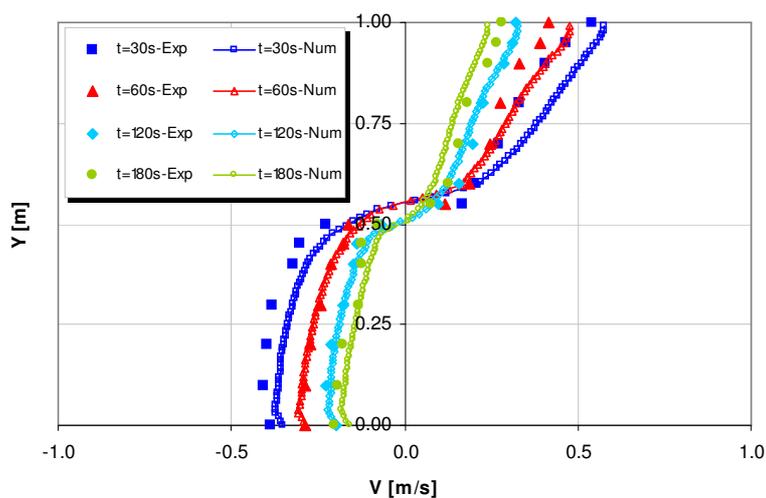


Figura 5. Perfis verticais de velocidade no plano da porta, obtidos por via experimental e numérica, para diferentes instantes de tempo após a abertura da porta.

5. Conclusões

Neste trabalho apresentou-se a medição experimental da taxa de infiltração de ar admitida para o interior de uma câmara frigorífica à escala laboratorial e os resultados confrontados, quer com as previsões obtidas através de modelos analíticos, quer, ainda, com os obtidos por simulação numérica.

Constatou-se que a infiltração de ar evolui ao longo do tempo em que a porta é mantida aberta, pelo que os modelos analíticos – que admitem condições de regime permanente – não são adequados para a determinação da taxa de infiltração. Contudo, os modelos de Fritzsche & Lilienblum e Gosney & Olama, dão uma boa estimativa para curtos períodos de tempo de porta aberta.

Verificou-se que os resultados da simulação numérica concordam com os obtidos por via experimental, pelo que se pode concluir que o modelo numérico consegue prever a infiltração de ar em câmaras frigoríficas, sendo capaz de prever também o campo de velocidades e de temperatura, quer no interior, quer na vizinhança exterior. Além disso, a modelação numérica pode prever a infiltração, mesmo no caso das portas estarem protegidas por dispositivos de vedação aerodinâmica, como é o caso de cortinas de ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FRITZSCHE C, Lilienblum W. Neue messungen zur bestimmung der kalterluste an kuhlraumturen. Kaltetechnik- Klimatisierung 1968;20:279–86.
- [2] GOSNEY WB, Olama HAL. Heat and enthalpy gains through cold room doorways. Proc Inst of Refrig 1975;72:31–41.
- [3] PHAM QT, Oliver DW. Infiltration of air into cold stores. Proc 16th Int Cons Refrig 1983;4:67–72.