

## VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional

*Universidade de Évora*

*14 a 16 de Abril de 2003*

### **ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE CÓDIGOS DE DFC NA MODELAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE REFRIGERAÇÃO ABERTOS**

Pedro Dinis Gaspar<sup>1</sup>, Alexandre Miranda<sup>2</sup>, R. A. Pitarma<sup>3</sup>

**Palavras chave:** Dinâmica de Fluidos Computacional, Códigos comerciais, Phoenics, Fluent, Refrigeração, Equipamentos expositores abertos.

#### **RESUMO**

De um modo progressivo os mais variados estudos no domínio da Engenharia têm vindo a apoiar-se, numa fase de pré-projecto ou de apoio ao projecto, nas previsões numéricas obtidas por códigos de Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC). No entanto, as previsões numéricas obtidas por estes códigos têm associadas algum grau de incerteza, quer seja pela definição dos modelos físicos em causa, quer pelas especificações e posteriores simplificações dos modelos matemáticos e numéricos que traduzem os diversos fenómenos físicos.

Neste artigo é genericamente avaliado e comparado o desempenho de dois modelos computacionais construídos com códigos comerciais de DFC (PHOENICS<sup>®</sup> e FLUENT<sup>®</sup>), mediante a confrontação das previsões numéricas das características térmicas de um equipamento refrigerado aberto com resultados experimentais obtidos pelos autores. Deste modo, pretende-se avaliar a robustez dos modelos computacionais desenvolvidos, assim como expor as vantagens e desvantagens intrínsecas de cada código, nomeadamente a facilidade de utilização, versatilidade, estrutura e metodologia de cálculo, além de evidenciar na globalidade as suas potencialidades e aplicabilidade.

---

<sup>1</sup> Assistente, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

<sup>2</sup> Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

<sup>3</sup> Professor Coordenador, Dept. de Engenharia Mecânica, E.S.T.G. - Instituto Politécnico da Guarda, Guarda.

## 1. INTRODUÇÃO

A movimentação de fluidos encontra-se disseminada pela maioria dos fenômenos físicos que ocorrem na natureza e as suas características, por vezes extremamente complexas, têm sido objecto de estudo através de análises teóricas, em geral insuficientes, e de métodos experimentais. Como consequência da crescente evolução tecnológica dos meios informáticos, esta análise poderá ser realizada através de simulações numéricas. Esta área de conhecimento denominou-se por Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) e tem sido utilizada em pesquisas nos mais diversos campos da engenharia, nas áreas de medicina, meteorologia, arquitectura, ambiente, entre outras, que de outro modo requereriam um trabalho de análise experimental demorado e um custo elevado. No entanto, a elaboração de um código isolado para a previsão de um determinado escoamento é complexa e demorada, o que justifica a utilização preferencial de códigos comerciais. No entanto, as previsões numéricas obtidas por estes códigos têm associado um grau de incerteza, resultante da definição do problema, até às especificações e posteriores simplificações dos modelos matemáticos e numéricos considerados para a descrição do fenómeno físico. Este estudo pretende avaliar e comparar genericamente dois dos códigos comerciais de DFC mais difundidos: PHOENICS<sup>®</sup> e FLUENT<sup>®</sup>, pela confrontação das previsões numéricas com resultados experimentais do desempenho térmico de um equipamento de refrigeração.

As técnicas de modelação matemática para simulação do comportamento térmico e do escoamento do ar em espaços refrigerados têm sido alvo de alguma investigação, embora a diversidade de casos possíveis a torne numa área com necessidade de maiores estudos para a avaliação das condições de funcionamento. As dificuldades vão desde a ocupação do espaço por produtos alimentares, normalmente com formas irregulares ou armazenados em qualquer tipo de embalagem, bem como pela diversidade de cargas térmicas existentes nos espaços, sendo o caminho percorrido pelo ar nas secções em estudo extremamente complexo. Assim sendo, é necessário ter em consideração os constrangimentos a que está sujeita a simulação do processo, além do esforço computacional relativo à modelação do escoamento e do processo de transmissão de calor. De seguida é efectuada uma referência a estudos que têm sido realizados com os códigos em comparação para a avaliação de propriedades e optimização de equipamentos no campo da refrigeração. Utilizando o código PHOENICS<sup>®</sup>, Hu *et al.* (1994) realizaram o estudo computacional da transmissão de calor convectiva turbulenta na região interior de um equipamento expositor refrigerado fechado. Foram simulados diversos casos distintos para a configuração do equipamento refrigerado em causa, de modo a avaliar o desempenho do aparelho. Os resultados mais significativos da simulação incidiram na avaliação da homogeneidade da distribuição de ar e o comportamento térmico presente no interior do espaço refrigerado. As simulações desenvolvidas permitiram concluir que a carga de produtos no interior de espaço influencia significativamente o escoamento e o comportamento térmico, em função da geometria e das propriedades térmicas dos produtos. A abertura de entradas mássicas nos painéis posteriores do equipamento, de preferência distribuídas aleatoriamente melhoram drasticamente a distribuição do fluxo de ar e o campo de temperaturas. Também, Wang e Visser (1991) apresentam uma simulação numérica do padrão tridimensional do escoamento em compartimentos refrigerados. Foram previstas as distribuições dos campos de velocidade, temperatura e humidade do ar. Com base na comparação entre os resultados numéricos e experimentais, foi validada a previsão do comportamento médio do escoamento sem se conseguir obter valores aproximados em todos os pontos do domínio, o que se traduziu numa boa simulação qualitativa, mas um pouco distante em termos quantitativos.

Uma sucursal de um dos maiores fabricantes europeu de electrodomésticos, fez uso do código FLUENT<sup>®</sup> para simular e otimizar a nova gama *No Frost* de frigoríficos e arcas congeladoras. A modelação dos equipamentos teve por objectivo a optimização do tamanho, forma e posicionamento das entradas mássicas de ar refrigerado, de modo a atingir as especificações de projecto das distribuições de temperatura e velocidades, mantendo simultaneamente um caudal mássico ar refrigerado reduzido, necessário à maximização da eficiência energética. Foram estudadas diversas configurações das áreas de entrada mássica de ar, sendo seleccionado o modelo computacional que mais se aproximou das especificações de projecto. Quando o protótipo foi construído, os resultados numéricos foram validados através da confrontação com resultados experimentais obtidos em 300 posições no interior dos compartimentos do frigorífico e do congelador. A aproximação entre as temperaturas experimentais e numéricas foi bastante aceitável. No Von Karman Institute foi desenvolvida uma análise em DFC com o código FLUENT<sup>®</sup> de múltiplas configurações possíveis de vitrinas refrigeradas de gelataria, com o objectivo de reduzir o arrasto convectivo de ar ambiente. Estes equipamentos, quando instalados em ambientes quentes e húmidos, são muito susceptíveis à formação de gelo na área do evaporador devido à entrada de ar ambiente para o compartimento refrigerado. Esta condição aumenta o consumo energético das unidades e em última instância força a interrupção de funcionamento para descongelação. Os resultados numéricos indicaram que a entrada de ar ambiente devia-se tanto à transmissão de calor por convecção natural derivada do sistema de anti-embaciamento dos vidros, bem como por convecção forçada devido ao deficiente direccionamento do fluxo de ar refrigerado. Foram também detectadas zonas de recirculação junto ao evaporador que elevavam a velocidade junto à zona vidrada, arrastando convectivamente o ar ambiente. Após a avaliação de vários casos de estudo do modelo computacional com diversas alterações geométricas e funcionais, foi determinado um modelo que permitia uma redução de 30 % da interacção térmica com o ar ambiente.

No entanto, poderão ser citados outros estudos numéricos na área de refrigeração, em que foram desenvolvidos códigos isolados, entre os quais, Pitarna (1998) que realizou a modelação matemática de câmaras frigoríficas de veículos com o propósito de estudar a distribuição de ar nos compartimentos, e Costa e Oliveira (2001) que realizaram um estudo numérico destinado a avaliar o desempenho da vedação aerodinâmica de um aparelho de cortina de ar, instalado entre dois compartimentos adjacentes a temperaturas distintas.

## 2. CARACTERÍSTICAS GENÉRICAS DOS CÓDIGOS TESTADOS

O código comercial PHOENICS<sup>®</sup> destina-se à simulação de problemas que envolvam escoamentos, com aparecimento no mercado em 1981, pelo que neste momento dispõe de variados modelos físicos, técnicas matemáticas e validação de resultados. No entanto, embora tenha sofrido diversas evoluções, os princípios de base e a fundamentação do código continuam semelhantes. A primeira versão do código FLUENT<sup>®</sup> surgiu em 1983, no entanto, a política da empresa que criou o código foi de absorver a concorrência mais directa e daí ganhar vantagens em termos de desenvolvimento do software, como também realizar sinergias com empresas de hardware e software de modo a obter benefícios em termos de pré e pós-processamento. Assim sendo, este código optou por outra metodologia de estruturação que lhe permitiu incorporar uma grande quantidade de modelos para diferentes processos físicos e químicos, atribuindo-lhe uma enorme versatilidade. Além disso, dedicou-se à funcionalidade e adaptabilidade do código, de modo a facilitar a utilização em função da simplicidade da interface utilizador-programa, bem como a satisfazer as necessidades de simulação do utilizador mediante a introdução de funções definidas por este.

Antes de iniciar a descrição das características genéricas de cada um dos códigos, é importante referir que relativamente ao código PHOENICS<sup>®</sup> foi utilizada a versão 3.1 não compilável datada de 1997, com uma licença académica, perpétua para plataforma de *hardware* e *software*: tipo PC com sistema operativo Windows NT. Relativamente ao código FLUENT<sup>®</sup>, foi usada a versão 6. compilável, disponível a partir de 2001, com uma licença académica, anual e para plataforma de *hardware* e *software*: tipo PC com sistema operativo Windows NT. À partida, a diferença mais significativa entre os códigos consiste na sua estrutura, pois enquanto o código PHOENICS<sup>®</sup> é composto por três funcionalidades distintas mas interligadas (pré-processamento, processamento de dados e pós-processamento), o código FLUENT<sup>®</sup> apenas incorpora as duas últimas. No código PHOENICS<sup>®</sup>, o pré-processamento consiste na definição do problema, que envolve a especificação da geometria dos objectos e espaços intervenientes, das propriedades termodinâmicas, de transporte e outro tipo de propriedades dos fluidos e sólidos envolvidos, bem como, a selecção dos modelos matemáticos que descrevem os diversos fenómenos a simular. É também prescrita a malha computacional ortogonal, podendo serem formadas malhas (ortogonais ou BFC) através de pacotes de *softwares* externos comerciais compatíveis, situação que também ocorre com o código FLUENT<sup>®</sup>. Este último não possui pré-processador incorporado, mas engloba o *software* GAMBIT<sup>®</sup>, onde são criadas as geometrias através da definição de vértices, arestas ou volumes, com diversos graus de complexidade em 2D ou 3D, permitindo a criação da respectiva malha, estruturada ou não, e a definição do tipo das condições de fronteira. Tanto a geometria como a malha também poderão ser importadas de diversos *softwares* externos. Comparando as potencialidades de pré-processamento, a geração de uma malha computacional ortogonal é muito mais simples no primeiro código mencionado, pois os limites dos objectos criados na geometria definem regiões da malha, no entanto, o *software* que acompanha o FLUENT<sup>®</sup> permite criar malhas segundo diversos esquemas de geração de malha, estruturadas ou não, o que poderá ser benéfico em função dos fenómenos físicos que se pretendem estudar numa dada geometria, pois é indispensável gerar uma malha computacional de grande qualidade para obter êxitos nas simulações de DFC.

No código PHOENICS<sup>®</sup>, ao *solver* compete a resolução iterativa das equações formuladas às diferenças finitas – volumes de controlo, discretizadas através de um dos esquemas de diferenciação disponíveis e resolvidas através do algoritmo de resolução SIMPLEST. No código FLUENT<sup>®</sup> é importada a geometria/malha e introduzidos os modelos matemáticos que descrevem os fenómenos físicos. Também é realizada a definição das propriedades dos fluidos e materiais, das condições operativas e as especificações das condições de fronteira. No *solver* estão disponíveis diversos esquemas de discretização para as equações diferenciais, distintos métodos de acoplamento da pressão-velocidade (SIMPLE, SIMPLEC e PISO), os factores de relaxação, a inicialização de valores e o tipo de monitorização da solução. Relativamente aos *solvers*, os códigos poderão considerar-se em situação de igualdade, pois embora algumas das possibilidades sejam idênticas, acabam por complementar-se nos distintos modelos matemáticos, esquemas de discretização e outras funcionalidades que possuem. Os dois códigos incorporam no programa fonte as funcionalidades de pós-processamento, no entanto, é atribuída uma maior capacidade de visualização, como de obtenção de resultados (valores locais) ao código FLUENT<sup>®</sup> devido às inúmeras opções disponíveis. Para os códigos podem ser encontrados pormenores relativos às suas especificações nos respectivos manuais de utilização.

### 3. MODELO MATEMÁTICO

Para estabelecer uma plataforma de comparação de resultados, o modelo matemático adoptado é semelhante nos dois casos de estudo, sendo descrito pelas equações de conservação de massa (Eq. 1), de conservação da quantidade de movimento (Eq. 2) e de conservação de energia (Eq. 3) para traduzir o escoamento turbulento, incompressível (mas dilatável) e bidimensional em regime permanente num sistema sem geração interna de energia e com diversas propriedades constantes em que é desprezada a dissipação viscosa. É assumida válida a hipótese de Boussinesq, sendo a massa específica do ar descrita pela equação de estado dos gases perfeitos.

$$\sum \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \sum_j \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i + \rho \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_l \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \cdot C_p \left( U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \right) \quad (3)$$

Para a modelação da turbulência é utilizado o modelo de turbulência k-ε standard, devido à capacidade de simulação de uma gama elevada de escoamentos com ajustamento mínimo dos coeficientes e pela sua relativa simplicidade de formulação. A popularidade do modelo, aliada ao consequente uso e validação trouxe à luz as suas vantagens bem como as suas deficiências, analisadas em pormenor por Launder e Spalding (1974). Este modelo de turbulência apresenta resultados muito aceitáveis, mas é restrito a regiões em que o escoamento é turbulento completamente desenvolvido, pelo que o escoamento afectado pela viscosidade nas proximidades das paredes é ligado através do uso de funções logarítmicas de parede. Estas fórmulas ligam as condições de fronteira das paredes às variáveis dependentes no nó da malha nas proximidade da parede, presumindo-se que estas pertencem à zona de fluido completamente turbulento. A descrição completa e os pormenores relativos à implementação do modelo de turbulência e das leis de parede pode ser encontrada em Rodi (1980).

### 4. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico intrinsecamente implementado nos dois códigos baseia-se na discretização das equações diferenciais por meio do método das diferenças finitas – volumes de controlo (Eq. 4), cuja formulação geral é dada por:

$$\rho \frac{\partial (U\phi)}{\partial x_i} - \Gamma_\phi \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi \quad (4)$$

Uma diferença significativa entre os modelos computacionais encontra-se na malha computacional, já que com o código PHOENICS<sup>®</sup> foi gerada uma malha ortogonal não uniforme com 12.000 volumes de controlo, enquanto que com o *software* GAMBIT<sup>®</sup> incluído no pacote do código FLUENT<sup>®</sup> foi gerada uma malha computacional não estruturada com 32.720 volumes de controlo. Tanto num caso como noutro, a malha é desfasada para as componentes da velocidade, tal que as propriedades escalares são calculadas no centro dos

volumes de controlo, enquanto as componentes da velocidade são calculadas nos pontos médios das faces dos volumes de controlo. O refinamento da malha considerado em todo o domínio de cálculo do modelo computacional gerado com o código FLUENT<sup>®</sup>, tem como objectivo fundamental obter uma malha cujos volumes de controlo, se aproximem o mais possível de elementos quadriláteros. No código PHOENICS<sup>®</sup>, a discretização dos termos convectivos nas equações de transporte relativas aos volumes de controlo, para todas as variáveis dependentes é realizada através do esquema de diferenciação híbrido (HDS), enquanto no código FLUENT<sup>®</sup> é utilizado o esquema *Upwind* (UDS) de 1ª Ordem para a energia cinética turbulenta e para a sua taxa de dissipação, e o esquema *Upwind* de 2ª Ordem para a quantidade de movimento e energia. A diferença entre os esquemas de discretização utilizados nos códigos surge em função das possibilidades de escolha. Embora tenha sido utilizado o esquema UDS num dos códigos, propício a provocar difusão numérica, como neste caso a malha é bastante mais refinada, julga-se que este facto tenha sido atenuado. O algoritmo utilizado para o acoplamento pressão-velocidade é diferente devido aos códigos não serem compatíveis. Assim o código FLUENT<sup>®</sup> faz uso do algoritmo SIMPLEC, enquanto o código PHOENICS<sup>®</sup> utiliza o algoritmo SIMPLEST, que possuindo o mesmo procedimento de cálculo, apresenta a particularidade de realizar o tratamento separado da influência dos termos convectivos e difusivos.

Os tipos de condições de fronteira impostas nos modelos computacionais são os vulgarmente utilizados em simulações numéricas. Qualquer um dos códigos possibilita ao utilizador a definição das condições de fronteira através da imposição das diversas variáveis dependentes a uma constante ou a uma expressão algébrica. Nas condições de fronteira de parede sólida é especificado o material, bem como as suas propriedades mecânicas e térmicas, enquanto nas condições de fronteira de entrada e saída de massa é definido o fluido de trabalho, a sua velocidade ou caudal, temperatura e outras propriedades mecânicas e térmicas.

Na simulação numérica do equipamento assumem-se as paredes isotérmicas com o valor da temperatura prescrito ao obtido experimentalmente. Nas entradas e saídas mássicas, foram impostas a velocidade, temperatura, energia cinética e a sua taxa de dissipação. Para simular a abertura ao ar ambiente do compartimento, foi utilizada uma condição de fronteira de pressão fixa, em que a direcção do escoamento é determinada em cada volume de controlo da superfície em função da diferença de pressão. No caso em que o escoamento seja direccionado para o interior do equipamento a temperatura ambiente externa foi prescrita. Foi simulada uma condição de fronteira do tipo fluxo imposto uniformemente distribuído, representativa da dissipação de calor pela iluminação interior do equipamento.

Os factores de relaxação utilizados para as diversas variáveis pretendem reduzir as variações bruscas no processo iterativo fomentando a estabilidade numérica e acelerando a convergência baseada na análise dos resíduos. No código PHOENICS<sup>®</sup> é permitida a utilização de dois tipos de relaxação: linear ou inercial. O código FLUENT<sup>®</sup> apenas permite a relaxação linear. Enquanto a relaxação linear consiste na introdução de um factor de modo a reduzir a diferença entre o valor da variável  $\phi$  calculada na iteração actual e iteração anterior, a relaxação inercial consiste na adição de um termo extra ao termo fonte da equação de volumes finitos. Assim, os factores de relaxação utilizados nos modelos computacionais divergiram em função da variável dependente em questão. A descrição pormenorizada dos méritos e deficiências dos esquemas de discretização, dos algoritmos de resolução e dos processos de relaxação pode ser encontrada em Patankar (1980).

## 5. APLICAÇÃO A UM CASO PRÁTICO E VALIDAÇÃO

De modo a evidenciar as diferenças existentes nos códigos utilizados, os modelos foram aplicados a um equipamento expositor refrigerado aberto vertical, comercializado pela *JORDÃO Cooling Systems*<sup>®</sup> na versão de charcutaria/lacticínios, por ser a categoria que apresenta o problema técnico da abertura ao ar ambiente. A configuração geométrica e funcional do equipamento pode ser observada em termos gerais na *Figura 3*. Um estudo experimental foi empreendido com o propósito de validar as previsões do modelo numérico através da confrontação de valores medidos e calculados dos campos de velocidade e da temperatura do ar. Maiores pormenores sobre as características do equipamento testado, assim como dos estudos experimental e numérico desenvolvidos podem ser obtidos em Gaspar (2002).

Os códigos de cálculo foram executados num computador pessoal com processador PENTIUM 2 a 350 [MHz] com 128 [Mb] de memória de RAM. Para ambos os códigos foi estipulado como critério de paragem um resíduo inferior a 1%. A evolução da convergência das diversas variáveis dependentes estabiliza num valor constante a partir de cerca das 8.000 iterações para o código PHOENICS<sup>®</sup>, enquanto que com o código FLUENT<sup>®</sup> o mesmo valor é obtido a partir de 1.000 iterações. As diferentes velocidades de convergência poderão dever-se ao método numérico de resolução, já que o código PHOENICS<sup>®</sup> faz uso do método TDMA conjugado com um algoritmo de ajuste automático dos factores de relaxação, enquanto que o código FLUENT<sup>®</sup> utiliza o método de Gauss-Seidel conjugado com um método algébrico de refinamento de malha. Neste aspecto, o modelo computacional desenvolvido com o código FLUENT<sup>®</sup> apresenta melhores prestações, já que mesmo possuindo uma malha bem mais refinada, o que implica um esforço computacional de cálculo superior, converge num número inferior de iterações. Esta vantagem poderá dever-se aos aceleradores internos de convergência da solução que o código dispõe.

### 5.1. Campos de velocidade

As previsões do campo de velocidade para a totalidade do domínio de cálculo não são apresentadas pois as visualizações são pouco claras devido ao refinamento da malha. Na globalidade, são previstas as baixas velocidades na zona de exposição dos produtos, bem como a velocidade máxima junto à grelha de insuflação. São também previstas diversas recirculações junto às extremidades das prateleiras e a entrada de ar ambiente para o interior do equipamento e a sua interacção com o ar refrigerado insuflado pela grelha. A ampliação do campo de velocidade na periferia da grelha de insuflação apresentada na *Figura 1*, indica que ambos modelos computacionais prevêem o mesmo tipo de distribuição da grandeza.

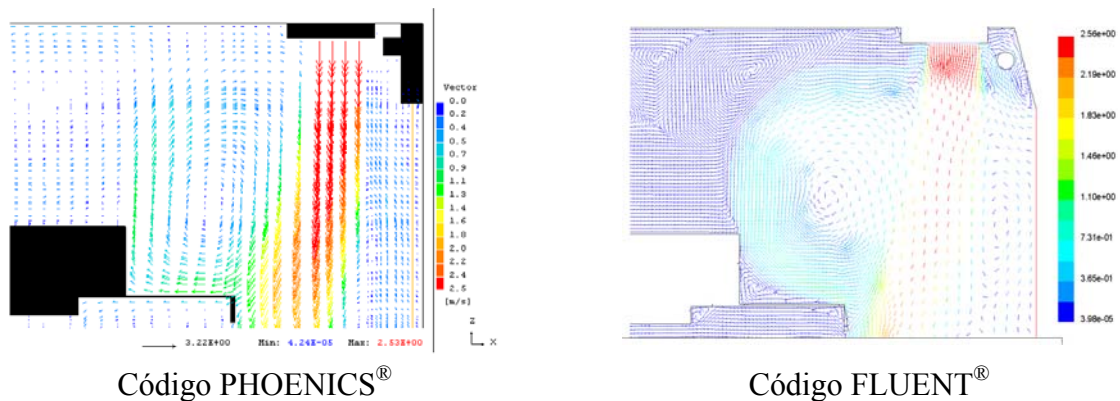


Fig. 1 – Previsão do Campo de Velocidade: Ampliação da periferia da grelha de insuflação.

A ampliação numa zona periférica da grelha de aspiração encontra-se exposta na *Figura 2*. Nas previsões dos dois modelos, é observável uma perda substancial de ar refrigerado para o ambiente. Neste caso, é evidente a perda de capacidade de bloqueio da cortina de ar devido à interação com o ar ambiente, já que a velocidade é bastante inferior.

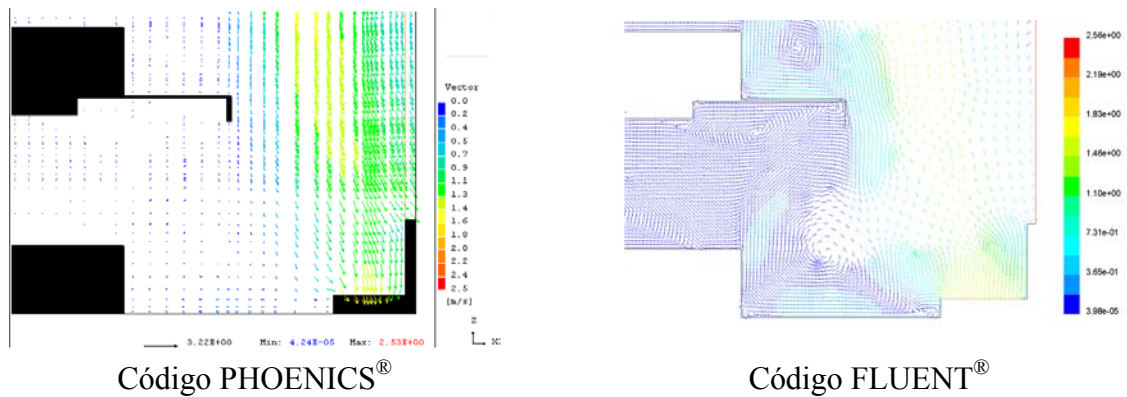


Fig. 2 – Previsão do Campo de Velocidade: Ampliação da periferia da grelha de aspiração.

## 5.2. Campo de temperatura

A *Figura 3* representa a distribuição de temperatura, em escala reduzida, no interior do espaço refrigerado. Permite analisar a eficácia da cortina de ar à entrada de ar ambiente para o interior do equipamento. Do mesmo modo, visualiza-se a interação do ar refrigerado injectado pela grelha de insuflação com o ar ambiente e a posterior saída da mistura pela zona inferior da abertura ao ar ambiente. Os dois modelos apresentam diferenças pontuais, embora em termos quantitativos os resultados estejam bastante aproximados. É perceptível a localização do ar refrigerado insuflado pela grelha de insuflação, bem como a sua entrada pela perfuração da frente interior. É representada uma zona crítica na parte inferior de exposição do equipamento, já que a temperatura prevista encontra-se no limite superior da temperatura de funcionamento do equipamento. Esta previsão é também função das temperaturas superficiais impostas para as paredes interiores do equipamento.

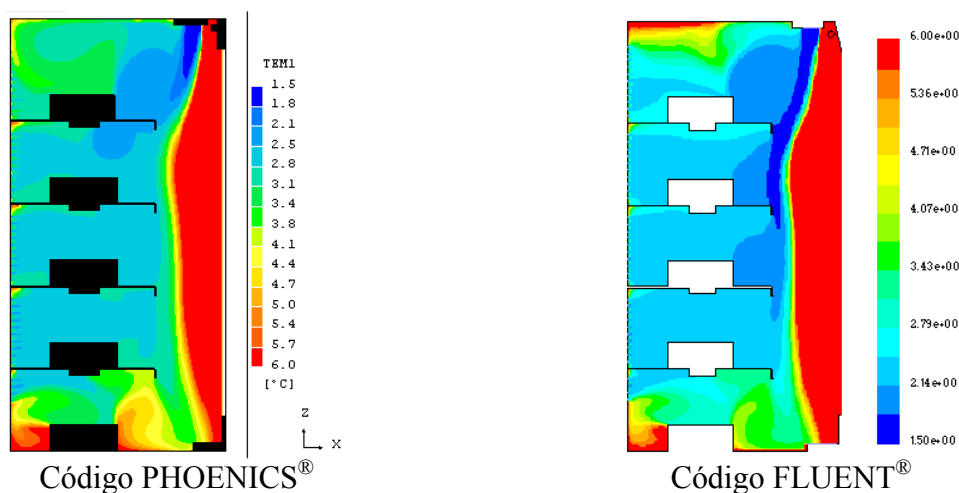


Fig. 3 – Previsão do Campo de Temperatura: Domínio computacional.

### 5.3. Validação experimental

Na *Figura 4* são expostos dois perfis comparativos entre as medições experimentais e as previsões numéricas. A comparação dos resultados evidencia uma tendência genérica muito aproximada da evolução das temperaturas, mas com ligeiras discrepâncias quantitativas. Da análise dos gráficos é possível retirar as seguintes conclusões relativamente às previsões obtidas:

O modelo computacional desenvolvido com o código PHOENICS<sup>®</sup> apresenta previsões numéricas mais aproximadas aos resultados experimentais na zona interior do equipamento. À medida que nos aproximamos da condição de fronteira que simula a abertura ao ar ambiente, as previsões obtidas com o modelo computacional desenvolvido com o código FLUENT<sup>®</sup> são mais aproximadas aos valores experimentais. Os desvios não se encontram uniformemente distribuídos no domínio, pois as grandes discrepâncias tanto para um modelo como para outro, encontram-se na região próxima da abertura frontal sendo o erro praticamente desprezável na zona interior.

Em termos médios globais, o código FLUENT<sup>®</sup> apresenta um erro absoluto de 1,7 [°C] enquanto o código PHOENICS<sup>®</sup> apresenta 2 [°C]. Dada a gama de temperaturas considerada, pode-se atribuir uma eficácia considerável e uma robustez assinalável aos modelos computacionais desenvolvidos, sendo o código FLUENT<sup>®</sup>, pelos aspectos referidos, mais eficaz que a versão do código PHOENICS<sup>®</sup> testada.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram descritos sumariamente dois códigos comerciais de DFC e avaliados os seus méritos e limitações através de um estudo numérico comparativo dedicado à previsão e visualização dos campos das propriedades relevantes em equipamentos de refrigeração abertos ao ar ambiente. Genericamente, verifica-se que ambos os códigos fazem uso das mesmas especificações relacionadas com os modelos matemático e numérico, embora cada um possua por defeito uma série de modelos físicos, técnicas matemáticas e distintos casos de validação. Relativamente a estes itens, o código PHOENICS<sup>®</sup> é superior na diversidade de modelos físico-matemáticos e de casos de validação. Os códigos apresentam diferenças na estrutura e metodologia de cálculo, que os distinguem pela facilidade de utilização em função da versatilidade e simplicidade da interface utilizador-programa. Neste campo o código FLUENT<sup>®</sup> possui maiores potencialidades. Avaliando os códigos pelos resultados numéricos obtidos para o caso prático testado, o código PHOENICS<sup>®</sup> apresenta

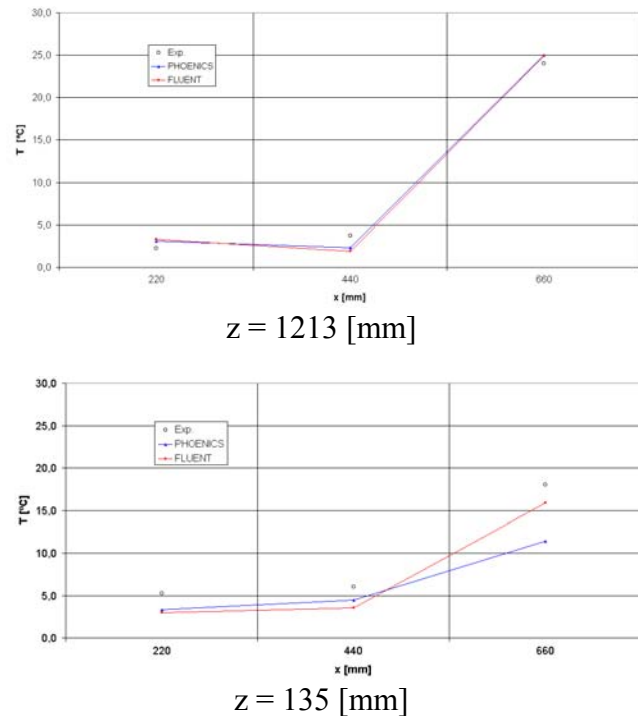


Fig. 4 – Gráficos Comparativos da Temperatura.

maiores facilidades na construção da malha computacional e na possibilidade de recorrer a uma maior quantidade de modelos matemáticos e técnicas numéricas de resolução. No entanto, o código FLUENT<sup>®</sup>, incorporando diferentes modelos matemáticos e técnicas numéricas, possui uma velocidade de convergência da solução muito superior e um erro absoluto relativamente aos valores experimentais inferior, o que demonstra as suas capacidades. Como já foi referido, é de salientar que existe uma grande discrepância entre as datas de aquisição dos códigos, e conseqüentemente, entre as versões testadas. Neste pressuposto, pode afirmar-se que os códigos estão praticamente em situação de igualdade para a simulação de fenómenos físicos mais simples. À medida que aumenta a complexidade do processo, o código FLUENT<sup>®</sup> ganha vantagem devido aos atributos que a presente versão possui. Os erros obtidos com os dois modelos computacionais dever-se-ão às simplificações consideradas, tanto nos modelos matemáticos como numéricos. É necessário ter em consideração que as medições experimentais não estão isentas de erros, e além disso foram obtidas durante apenas um dos ciclos de funcionamento do equipamento. Estes códigos, pela sua facilidade, simplicidade e versatilidade de utilização, constituem uma potente ferramenta para a simulação dos mais diversos fenómenos físicos relevantes em engenharia. No entanto, a experiência em DFC do utilizador é ainda fundamental e determinante para garantir o realismo das previsões.

## 7. REFERÊNCIAS

- PHOENICS-related Lectures and Tutorials, CHAM - Concentration, Heat and Momentum Ltd [citado em 25 de Setembro de 2001 – 18:27]. URL: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_lecs/leclist.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_lecs/leclist.htm).
- PHOENICS-VR Reference Guide – CHAM Technical Report TR/326, CHAM - Concentration, Heat and Momentum Ltd (revisto em Julho 2001) [citado em 25 de Setembro de 2001 – 18:27]. URL: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_docs/tr326/tr326top.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr326/tr326top.htm)
- Fluent 6 – User’s guide Volume, Fluent Incorporated, December 2001.
- Gambit 1.3 – User’s guide Volumes and Modeling guide Volumes, Fluent Incorporated, December 2001.
- Hu, S.C., Fan, N.W., Hu, Y-Z R. - Optimization of the display design using numerical models. PHOENICS Journal of CFD & its applications, vol. 7, n.º 1, 1994.
- Wang, H.W., Visser, A.H. - 3D flow patterns in refrigerated stores. PHOENICS Journal of CFD & its applications, vol. 4, n.º 2, 1991.
- FLUENT Newsletters - Advanced design of domestic refrigerators using FLUENT, Fluent NEWS, Fall 1999.
- FLUENT Newsletters – CFD helps decrease ambient air entrainment in ice cream freezer by 30%, Journal Articles by Fluent Software Users, 2001.
- Pitarna, R.A., Modelação matemática e experimental de câmaras frigoríficas de veículos, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Abril 1998.
- Costa, J.J., Oliveira, L.A., Vedação aerodinâmica por cortina de ar – Estudo numérico, I Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC, Março 2001.
- Gaspar, Pedro Dinis, Estudo Numérico e Experimental do Desempenho Térmico de Equipamentos Expositores Refrigerados, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Julho 2002.
- Launder, B. E., Spalding, D. B., The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 3, 1974.
- Rodi, Wolfgang, Turbulence models and their application in hydraulics – A state of the art review, IAHR, 1980.
- Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

## 8. NOMENCLATURA

### Nomenclatura Geral

- $C_p$  Calor específico, [kJ/kg K].
- $F_i$  Componentes das forças de corpo, [N].
- $k$  Condutibilidade térmica, [W/m K].
- $p$  Pressão, [Pa].
- $S_\phi$  Termo fonte.
- $T$  Temperatura, [K].
- $U_i$  Componentes da velocidade, [m/s].

- $x_i$  Componentes das coord. cartesianas, [m].

### Simbologia grega

- $\rho$  Massa específica, [kg/m<sup>3</sup>].
- $\phi$  Variável genérica.
- $\Gamma_\phi$  Coeficiente de difusão para a variável  $\phi$ .
- $\nu_1$  Viscosidade cinemática molecular, [m<sup>2</sup>/s].