



SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE AR EM TORNO DE UM EDIFÍCIO

Almerindo Domingues Ferreira

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Polo II - 3030 COIMBRA, Portugal, almerindo.ferreira@dem.uc.pt

António Manuel Gameiro Lopes

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Polo II - 3030 COIMBRA, Portugal, antonio.gameiro@dem.uc.pt

***Resumo.** O presente trabalho descreve o estudo efectuado na caracterização da acção do vento sobre a estrutura de um edifício. Trata-se de um estudo preliminar à construção de uma edificação para instalação de vários serviços municipais, o qual resultou da necessidade de se conhecer a distribuição de pressões nas diversas superfícies, com vista à caracterização das cargas aerodinâmicas resultantes da acção do vento. Na vertente experimental do presente trabalho, utilizou-se um modelo construído à escala de 1:66, o qual foi ensaiado num túnel aerodinâmico para diversos rumos de incidência. O local de implantação do edifício corresponde a uma zona plana, sem grandes obstáculos à sua volta, pelo que se utilizou nos ensaios experimentais um perfil tipo “campo aberto”. Para a segunda parte do estudo, recorreu-se a um modelo numérico, com base numa malha tridimensional não estruturada. Testam-se alguns modelos de turbulência, e os resultados computacionais do coeficiente de pressão são comparados com os valores medidos experimentalmente, sendo possível estimar os limites de fiabilidade das simulações aplicadas a este tipo de situações, ou seja, de escoamentos turbulentos em torno de corpos angulosos, assim como a influência da modelação da turbulência.*

***Palavras-chave:** escoamento em torno de edifícios, simulação computacional, modelo de turbulência, distribuição de pressão.*

1. INTRODUÇÃO

Frequentemente, no domínio da engenharia do vento, é necessário recorrer-se a estudos específicos para se conhecer a distribuição de pressões nas diversas superfícies de determinados edifícios ou estruturas. De facto, muitas das vezes, a informação compilada em códigos de projecto não é aplicável ao elemento da estrutura a projectar. Existem basicamente duas formas para a sua determinação, nomeadamente o ensaio em túnel aerodinâmico ou o recurso à simulação computacional. Ambas as metodologias apresentam aspectos positivos, assim como negativos. O recurso à simulação experimental em túnel aerodinâmico apresenta custos relativamente elevados, podendo ser um processo relativamente moroso, não só na componente de construção da maquete, mas também no que diz respeito à realização dos ensaios, sobretudo em estudos de optimização.

A simulação computacional apresenta actualmente, de uma forma generalizada, custos económicos menos significativos, com uma tendência contínua para o decrescimento, a par com o aumento da capacidade de cálculo, em termos de velocidade de processamento e também de disponibilidade de memória. A maior limitação da simulação numérica reside na correcta modelação dos efeitos da turbulência sobre o escoamento, já que, com a actual capacidade de cálculo, não é possível resolver as escalas turbulentas (espacial e temporalmente), para aplicação a

problemas de engenharia prática, conforme discutido em Moin e Mahesh (1998). A adoção de modelos de turbulência contorna só parcialmente esta dificuldade, uma vez que todos os modelos disponíveis actualmente são de aplicação limitada a um conjunto específico de situações de mecânica dos fluidos.

Existem múltiplos trabalhos em que se avaliam as capacidades dos modelos computacionais para a previsão da distribuição de pressões, sendo o caso de um cubo isolado o modelo mais frequentemente usado (Richards et al., 2002; Murakami, 1997), embora existam outros trabalhos dedicados a outras geometrias (p.e., Riley et al., 1996; Bekele e Hangan, 2002).

O objectivo do presente trabalho centra-se na comparação entre os resultados experimentais do coeficiente de pressão, medidos em túnel aerodinâmico, e os valores determinados numericamente, com o intuito de avaliar as capacidades do modelo computacional quando aplicado a geometrias complexas. São testados dois modelos de turbulência, bem como dois esquemas de discretização dos termos convectivos das equações de transporte.

2. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Modelo Laboratorial

O modelo estudado, construído à escala 1:66, corresponde a um edifício que acomodará diferentes serviços nos pisos inferiores, tendo no seu topo um depósito de água para abastecimento das povoações vizinhas. A transição entre o bloco inferior do edifício e o reservatório de água é feita por um elemento estrutural com uma configuração geométrica semelhante à vela de um barco.

O edifício, caracteriza-se por uma altura máxima de 46m, tendo a base e os níveis inferiores uma secção aproximadamente quadrada com 20m de largura.

O estudo experimental incidiu essencialmente sobre a parte superior da estrutura, com especial destaque para o elemento geométrico em forma de vela, dada a ausência de informação para elementos geométricos similares e a carga aerodinâmica a que fica sujeito para ventos cruzados. O modelo foi instrumentado com um total de 236 tomadas de pressão, cada uma com 1 mm de diâmetro, das quais 134 estavam colocadas nas faces da vela, e as restantes tomadas distribuídas quer pelo reservatório montado no topo da vela, bem como pela torre lateral (Fig. 1).



(a)



(b)

Figura 1. Modelo do edifício colocado no túnel aerodinâmico para escoamento incidente proveniente de Norte: Vista das fachadas Norte (a) e Sul (b).

O modelo foi testado num túnel aerodinâmico, com uma câmara de trabalho aberta de secção $2 \times 5 \text{ m}^2$, para os 8 rumos de incidência, desde rumo N a rumo NW. Os rumos N e S foram definidos para condições de perpendicularidade do escoamento não perturbado relativamente às duas faces maiores da “vela”. Devido a limitações de espaço, serão apresentados, no presente trabalho, somente os resultados correspondente ao rumo de incidência de Norte, a qual deverá ser aquela que originará os maiores esforços na estrutura. A velocidade de referência do escoamento escolhida para a realização dos ensaios (U_0), medida numa zona não perturbada, foi de 13.3 m/s, valor suficientemente elevado para que se possam considerar condições de independência de Reynolds. Para a pressão estática (p) em cada tomada considerou-se o valor médio medido durante 15 segundos, com uma taxa de aquisição de 100 Hz, sendo os resultados neste trabalho apresentados sobre a forma do coeficiente adimensional de pressão (C_p), definido como:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (1)$$

onde p_0 é a pressão de referência e ρ a massa específica do ar.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1. Equações de NavierStokes

A modelação numérica do escoamento em torno do edifício foi feita recorrendo ao código CFX-5.5, desenvolvido pela AEA Technology. Trata-se de um código de resolução das equações de Navier-Stokes, tendo por base uma malha generalizada não estruturada. Descrevem-se seguidamente, de uma forma sumária, as principais equações subjacente ao problema a resolver. Por não se considerar estar no âmbito do presente trabalho, não são dados quaisquer detalhes relativos aos métodos numéricos de resolução das equações.

As equações de Navier-Stokes descrevem a conservação de quantidade de movimento, podendo ser escritas na forma apresentada a seguir:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma \left(2 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} \quad (2)$$

onde u_i é uma componente genérica da velocidade, x_i é a coordenada Cartesiana genérica, P é a pressão, Γ é viscosidade efectiva do fluido, ρ é a massa volúmica e k é a energia cinética turbulenta. A equação de conservação de massa traduz o princípio da continuidade:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

3.2. Modelos de Turbulência

Um dos modelos de turbulência empregues foi o modelo k - ϵ , (Launder e Spalding, 1974), na sua formulação "renormalizada", conforme proposto por Yakhot et al. (1992). O modelo k - ϵ RNG apresenta melhores resultados que o modelo k - ϵ , particularmente para casos de escoamento em torno de corpos com arestas vivas em que existem extensas zonas de recirculação e forte curvatura das linhas de corrente, conforme salientado por diversos autores (Smith e Wooduff, 1998; Ferreira et

al., 2001). Neste caso, as equações para o transporte de energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação (ε) são as mesmas do modelo original, diferindo a formulação de algumas das constantes do modelo na equação par ε . A sua formulação matemática é a seguinte:

Modelo RNG k- ε :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (5)$$

$$P_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad C_{\varepsilon 1} = 1.42 - f_\eta \quad (6a)$$

$$f_\eta = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4.38} \right)}{(1 + \beta \eta^3)} \quad \eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_\mu \varepsilon}} \quad \mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (6b)$$

$$\sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 0.7179 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.68 \quad \beta = 0.012 \quad C_\mu = 0.085 \quad (6c)$$

onde P_k representa a taxa de produção/destruição de energia cinética turbulenta, e μ_t é a viscosidade turbulenta. Os restantes símbolos representam grandezas auxiliares.

São conhecidas as limitações do modelo k- ε no que diz respeito à predição dos pontos de descolamento e recolamento para superfícies suaves. O modelo k- ω proposto por Wilcox (1993) pretende resolver esta limitação. Se bem que, no presente caso, os pontos de descolamento sejam naturalmente fixados nas arestas vivas, e portanto a limitação apontada não constituir, à partida, um problema maior, foi decidido comparar os resultados utilizando também o modelo SST (*Shear Stress Transport*) (Menter, 1993, 1994). Trata-se de uma modificação ao modelo k- ω , na sua formulação BSL (*Baseline*), a qual constitui uma ponderação entre o modelo k- ε e o modelo k- ω , de acordo com a região da camada limite na qual o escoamento está a ser calculado.

Modelo SST:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 + (1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega \quad (8)$$

em que os coeficientes de índice 3 são obtidos à custa de uma combinação linear entre os coeficientes de índice 1 (correspondente aos modelo k- ε) e os coeficientes de índice 2 (correspondentes ao modelo k- ω original), definidos da seguinte forma:

$$\beta' = 0.09 \quad \alpha_1 = 5/9 \quad \beta_1 = 3/40 \quad \sigma_{k1} = 2 \quad \sigma_{\omega 1} = 2 \quad \alpha_2 = 0.44 \quad (9a)$$

$$\beta_2 = 0.0828 \quad \sigma_{k2} = 1 \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856 \quad (9b)$$

O termo de produção de energia cinética turbulenta é limitado pela equação seguinte, de forma a evitar o aumento excessivo de energia cinética turbulenta em regiões de estagnação:

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\varepsilon) \quad (10)$$

A função de ponderação F_1 é obtida através da seguinte fórmula:

$$F_1 = \tanh \left(\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right)^4 \quad (11)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega, 1e-10 \right) \quad (12)$$

A modelação do transporte das tensões é obtida, na formulação SST, à custa de um factor limitativo na formulação da viscosidade turbulenta:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (13)$$

em que:

$$F_2 = \tanh \left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right)^2 \quad (14)$$

e S quantifica a taxa de deformação do fluido. (cf. Menter 1993, 1994 para detalhes).

4. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM TORNO DO EDIFÍCIO

4.1 - Alguns detalhes relativos à simulação numérica

A simulação numérica do escoamento passa por construir, em primeiro lugar, um modelo computacional do edifício. Este modelo foi construído com base na maquete, recorrendo às ferramentas de CAD disponíveis no módulo "Build" do CFX-5.5. Foi gerada uma malha não estruturada em torno do edifício, com cerca de 440000 nodos, tendo-se o cuidado de definir as fronteiras do domínio suficientemente longe da região de influência da estrutura. As condições de entrada, em termos de perfil de velocidades e grandezas turbulentas correspondem aos valores medidos experimentalmente. Para além dos dois modelos de turbulência, consideraram-se dois esquemas de discretização dos termos advectivos: upwind e segunda ordem.

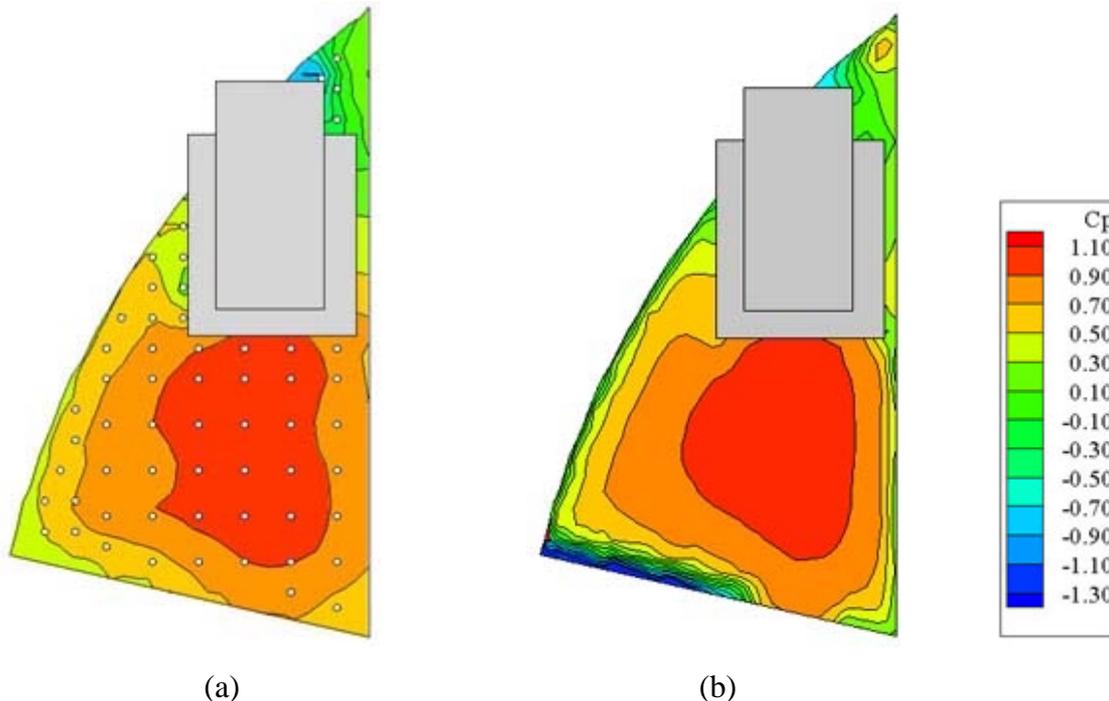
4.2 - Apresentação de resultados

Como já referido anteriormente, o presente estudo incidiu essencialmente na parte superior do edifício, uma vez que se antevia ser aí que ocorreriam os maiores problemas em termos de projecto dos suportes da estrutura. Mostram-se, nas Figs. 2 e 3, os resultados experimentais e numéricos (modelo SST, segunda ordem) relativos à distribuição do coeficiente de pressão C_p nas faces A e B (faces de montante e de jusante, respectivamente), para um escoamento com um rumo de incidência de Norte (perpendicular à face A). Tal como observado experimentalmente, verifica-se, na face A

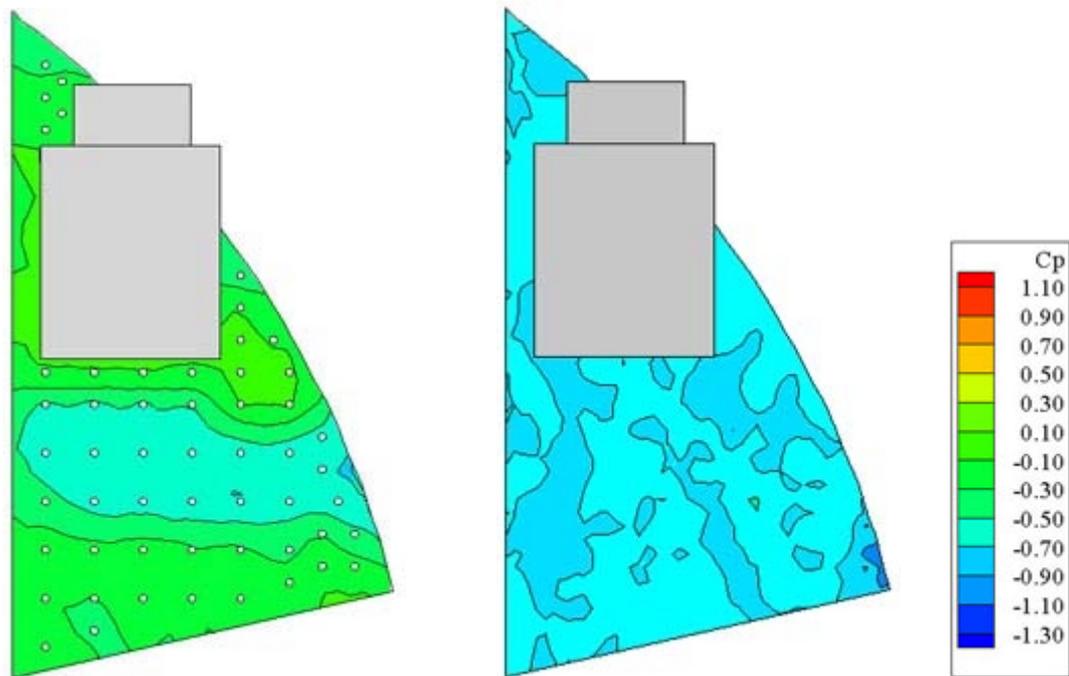
uma região central com altas pressões, como seria de esperar. Junto aos contornos da "vela" existe um forte gradiente espacial de pressão, como consequência da aceleração do escoamento. Este gradiente não é aparece perfeitamente definido nos resultados experimentais devido à insuficiente concentração de pontos de medida nessa região. Os resultados obtidos pelos dois métodos, para esta face da vela, revelam uma concordância bastante boa, tal como constatado por diversos autores no caso de um cubo isolado (Murakami, 1993). A face de jusante da vela (face B) caracteriza-se por pressões substancialmente mais baixas, associadas a grandes flutuações, já que toda ela está numa zona onde o escoamento se encontra em recirculação. Os valores experimentais são ligeiramente superiores aos computacionais, apresentando gradientes mais bem definidos. Neste caso, a concordância entre os resultados revela-se francamente pior, constatando-se que os modelos de turbulência usados não prevêm bem o que se passa nas zonas de recirculação, observação que está em consonância com as simulações feitas para estruturas mais simples, como é o caso do cubo isolado, mesmo com modelos de turbulência mais complexos (p.e., Rodi, 1997).

A comparação dos resultados numéricos obtidos com os dois modelos de turbulência, assim como a influência do esquema de discretização dos temas advectivos, pode ser observada nas Figs. 5 e 6, as quais mostram a distribuição de C_p ao longo das linhas representadas na Fig. 4. A coordenada z , constando nas ordenadas destes gráficos é a coordenada vertical, pelo que a parte esquerda destes gráficos corresponde à parte inferior das linhas 2 e 3, definidas na Fig. 4. As nomenclaturas Rng_up (modelo Rng e esquema de discretização upwind), Sst_up (modelo SST e esquema de discretização upwind) e Sst_so (modelo SST e esquema de discretização de segunda ordem) referem-se, naturalmente, aos resultados numéricos.

Globalmente, poder-se-á dizer que o esquema de discretização de segunda ordem produz melhores resultados. Como seria de esperar, para este caso em que o escoamento se dá em torno de corpos angulosos, a utilização do modelo SST não produz diferenças significativas relativamente ao modelo Rng.



(a) (b)
Figura 2. Distribuição do coeficiente de pressão na face A da vela:
(a) - experimental; (b) - numérico (modelo SST, segunda ordem).



(a) (b)
 Figura 3. Distribuição do coeficiente de pressão na face B da vela:
 (a) - experimental; (b) - numérico (modelo SST, segunda ordem).

Mostra-se, na Fig. 7, a distribuição de C_p em toda a estrutura do edifício. Este tipo de informação é importante, para, por exemplo, o projecto das entradas/saídas de ar para ventilação interior. As zonas de maiores gradientes indicam, por outro lado, maiores velocidades locais do vento, informação importante quando se analisam as condições junto às entradas e saídas dos edifícios para estudos de condições de conforto de transeuntes.

A Figura 8 mostra os vectores de velocidade local, representados num plano longitudinal, que passa no plano de simetria do reservatório de água superior. Nota-se, claramente, uma extensa região de recirculação no patamar do bloco inferior do edifício, uma característica a ter em conta, por exemplo, para problemas de conforto e segurança das pessoas. A extensão tridimensional dos vórtices de jusante, permite aferir da zona de influência da estrutura, por exemplo, ao nível do solo.

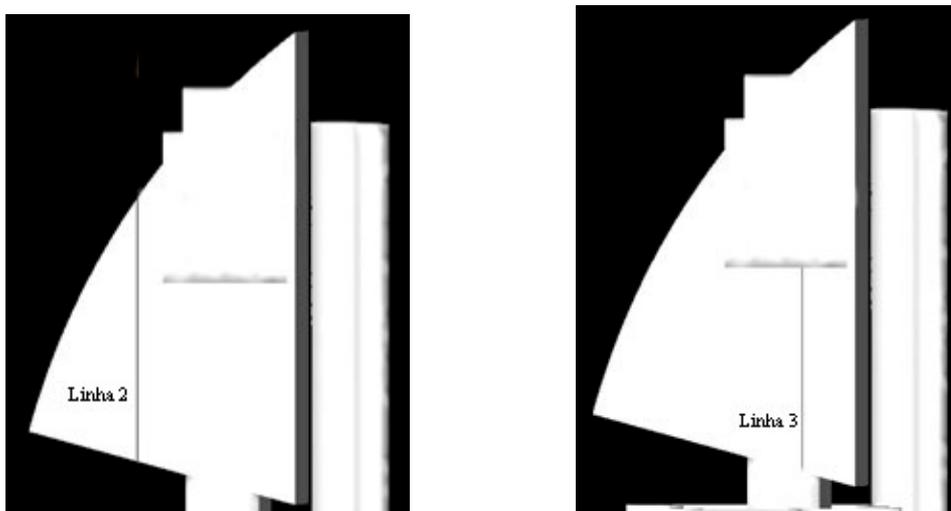


Figura 4. Definição do posicionamento das linhas 2 e 3.

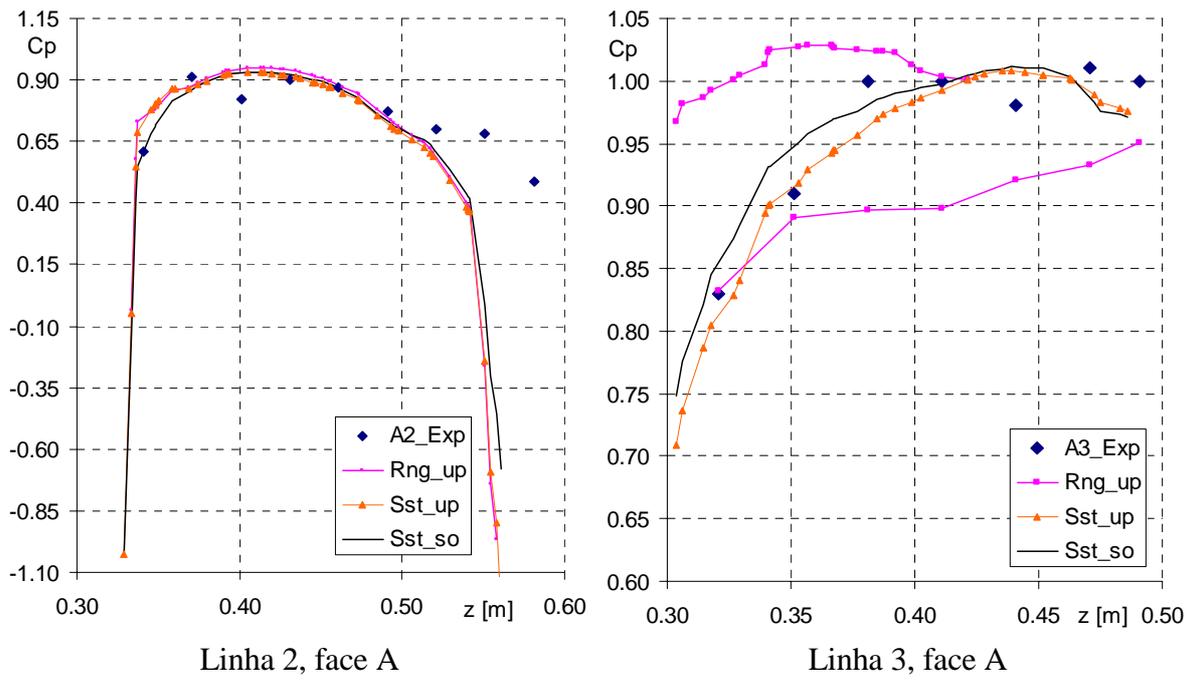


Figura 5. Distribuição do coeficiente de pressão ao longo das linhas 2 e 3, na face A.

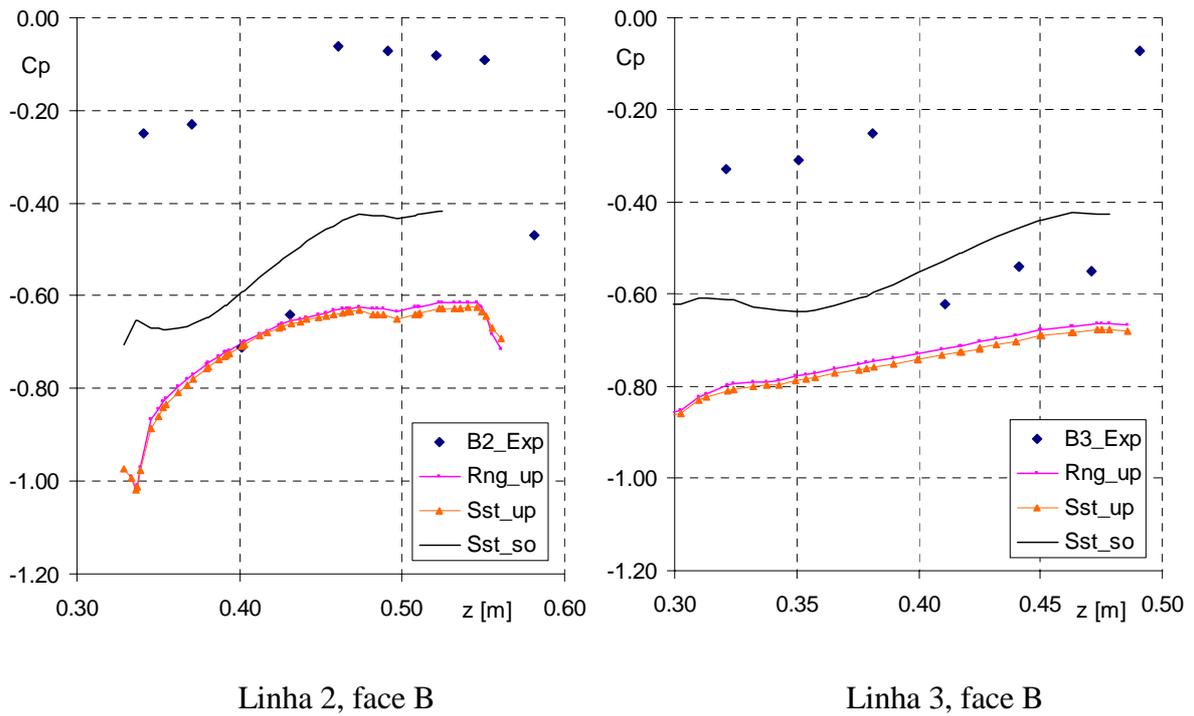


Figura 6. Distribuição do coeficiente de pressão ao longo das linhas 2 e 3, na face B.

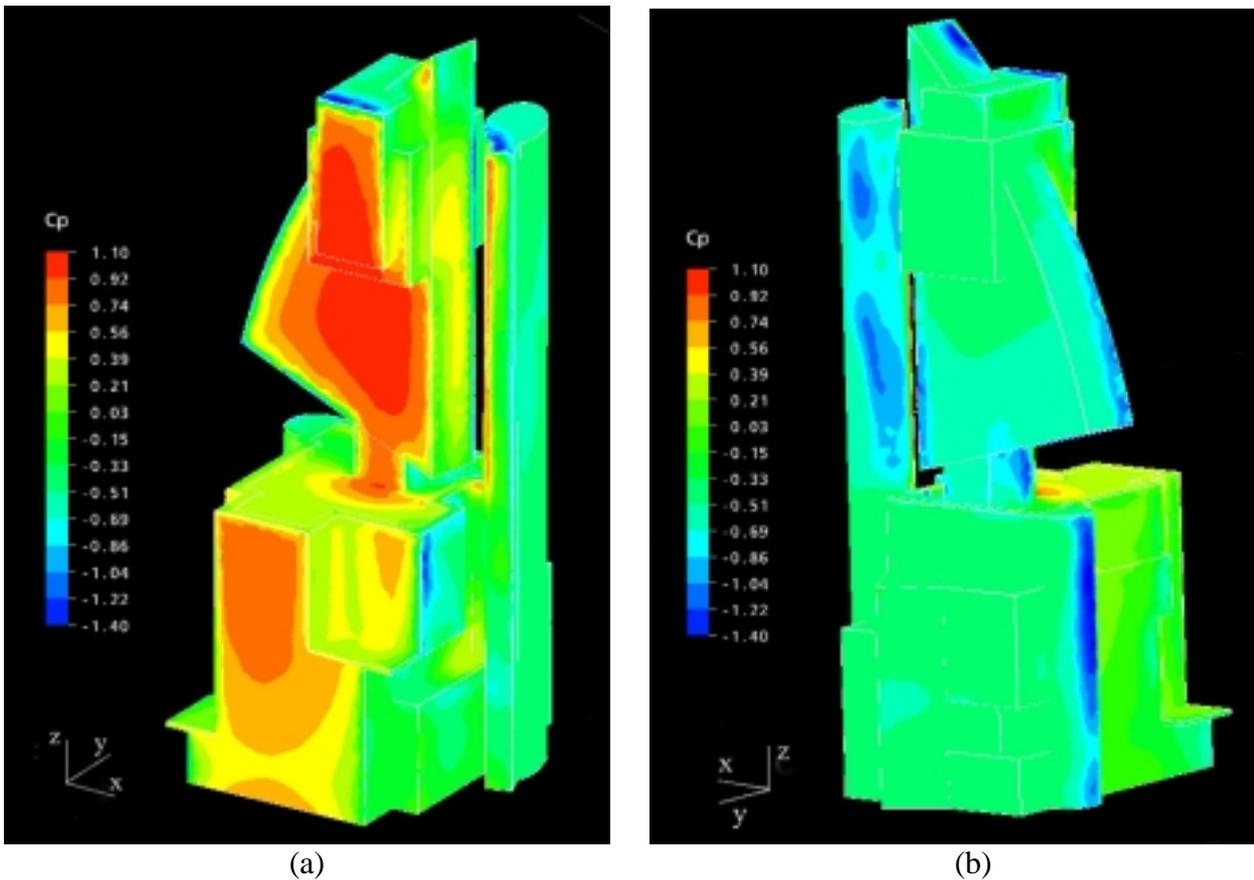


Figura 7. Visualização da distribuição do coeficiente de pressão na superfície do edifício: (a) - parte de montante; (b) - parte de jusante. (modelo SST, segunda ordem)

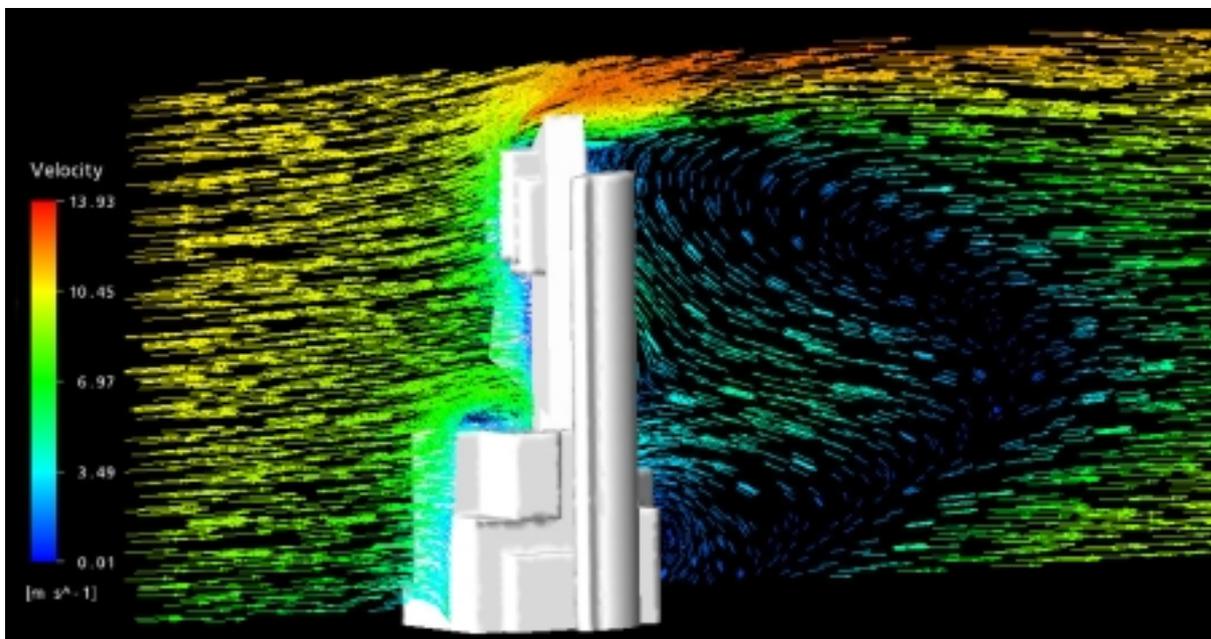


Figura 8. Visualização do campo de velocidades no plano de simetria do reservatório (modelo SST, segunda ordem)

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou uma aplicação de métodos numéricos e experimentais para a caracterização da acção do vento sobre um edifício. O objectivo centrava-se na avaliação do

desempenho de um modelo computacional para a previsão do campo de pressões nas superfícies de edificações. Relativamente ao caso em estudo, em que se considera um edifício com uma geometria algo complexa, conclui-se que o modelo computacional prevê bastante bem a distribuição de pressões nas faces de montante. No entanto, nas zonas de recirculação, existe uma significativa discrepância entre os valores numéricos e experimentais, apesar de ambas as metodologias concordarem nos valores negativos do coeficiente de pressão.

Concluiu-se ainda que o modelo de discretização de segunda ordem apresenta resultados ligeiramente melhores que os conseguidos com o upwind, sobretudo na face de jusante. Quanto aos modelos de turbulência testados, o modelo SST mostrou-se, globalmente, superior ao RNG- $k\epsilon$.

O trabalho apresentado revela, à semelhança de outros estudos, que a abordagem numérica possui bastantes vantagens sobre a abordagem experimental, sobretudo pela quantidade de informação que disponibiliza, a um custo relativamente moderado. A sua principal limitação reside na modelação da turbulência, que, para o cálculo preciso das forças aplicadas, poderá constituir uma fonte importante de erros.

4. REFERÊNCIAS

- Bekele, S.A. and Hangan, H., 2002, "A comparative investigation of the TTU pressure envelope. Numerical versus laboratory and full scale results", *Wind and Structures*, Vol. 5, n.º 2~4, pp. 337-346.
- Ferreira, A.D., Sousa, A.C. and Viegas, D.X., 2001, "Numerical Tests of the $k\epsilon$ and RNG Turbulence Models for the Flow around a 3D Surface Mounted Obstacle". Proc. 9th Annual Conference of the CFD Society of Canada, Waterloo-Canada, 27-29 May 2001, pp.524-529.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp. 269-289.
- Menter, F.R., 1993, "Multiscale Model for Turbulent Flows", 24th Fluid Dynamics Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Menter, F.R., 1994, "Two-equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA Journal*, Vol. 32, N. 8.
- Moin, P. and Mahesh, K., 1998, "Direct Numerical Simulation: a Tool in Turbulence Research", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 539-578.
- Murakami, S., 1993, "Comparison of various turbulence models applied to a bluff body", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 46&47, pp. 21-36.
- Murakami, S., 1997, "Overview of turbulence models applied in CWE-1997", *Proceedings of the 2nd European and African Conference on Wind Engineering*, Génova, Itália, 22-26 de Junho de 1997, pp. 3-24.
- Richards, P.J., Quin, A.D. and Parker, S., 2002, "A 6m cube in an atmospheric boundary layer flow. Part 2. Computational solutions", *Wind and Structures*, Vol. 5, n.º 2~4, pp. 177-192.
- Riley, W.J., Gadgil, A.J. and Nazaroff, W.W., 1996, "Wind-induced ground-surface pressures around a single-family house", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 61, pp. 153-167.
- Rodi, W., 1997, "Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69-71, pp. 55-75.
- Smith, L.M. and Woodruff, S.L., 1998, "Renormalization-group Analysis of Turbulence", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 275-310.
- Wilcox, D.C., 1993, "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, Inc., La Canada, California, 460 p.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G., 1992, "Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique", *Physics of Fluids A*, Vol. 4, pp. 1510-1520.