

ESTUDO COMPUTACIONAL DE EDIFICAÇÕES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES DO TELHADO

Anderson V. do Nascimento^a, Giuliana F. F. Bono^b e Gustavo Bono^b

^a*Núcleo de Tecnologia, Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104, Km 59, CEP: 55014-900, Caruaru - PE, Brasil, anso_viana@hotmail.com, <http://www.ufpe.br/eccaa>*

^b*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104, Km 59, CEP: 55014-900, Caruaru - PE, Brasil, giuliana.franca@gmail.com, bonogustavo@gmail.com, <http://www.ufpe.br/ppgecam>*

Palavras chave: Engenharia do Vento Computacional, simulação numérica, Método dos Elementos Finitos.

Resumo. O presente trabalho, investiga como a geometria do telhado influencia a distribuição de pressão em edificações através de ferramentas baseadas na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). São apresentados resultados de quatro modelos de edificações baixas, com telhado plano ou de duas águas, os ângulos de telhado investigados foram 0°, 30°, 45° e 60°. As equações de Navier-Stokes e uma equação de conservação de massa considerando a hipótese de pseudo-compressibilidade são resolvidas empregando um esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin. Para a simulação de escoamentos turbulentos, emprega-se a Simulação de Grandes Escalas (LES - Large Eddy Simulation) com o modelo clássico de Smagorinsky para as escalas inferiores à resolução da malha. O Método dos Elementos Finitos é empregado para a discretização do domínio espacial, utilizando o elemento isoparamétrico hexaédrico de oito nós. Os resultados obtidos permitem capturar eficientemente as principais características do escoamento e podem ser facilmente adotados na elaboração de projetos, possibilitando o dimensionamento estrutural. Com tudo isto, pode-se afirmar que a utilização de métodos computacionais na análise de problemas da Dinâmica de Fluidos mostrou-se muito eficiente.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das estruturas construídas no mundo para fins residenciais, comerciais e outros propósitos podem ser classificadas como edificações baixas (Uematsu e Isyumov, 1999). Este tipo de edificações apresentam diferentes sistemas de cobertura, sendo geralmente os telhados de uma e duas águas os mais adotados, pois são os mais simples do ponto de vista construtivo e de projeto. No Brasil, as edificações com telhados de duas águas são muito empregadas, por exemplo em: pavilhões industriais, residências unifamiliares e multifamiliares, entre outros. Uma elevada porcentagem de edificações construídas no âmbito do Programa Minha Casa, Minha Vida adotam este tipo de solução construtiva.

Para o dimensionamento estrutural das edificações e melhor aproveitamento da ventilação é fundamental a determinação dos coeficientes de pressão. Atualmente, diversas estruturas e formas arquitetônicas são extremamente sensíveis à ação do vento, devendo ser levado em consideração um estudo específico da ação do vento no dimensionamento da estrutura. Através de ensaios experimentais em túnel de vento é possível obter as principais características do escoamento em modelos de edificações, por exemplo: Case e Isyumov (1998), Paluch et al. (2003), Blessmann (2009) e Blessmann (2011), entre outros.

Nos últimos anos, programas baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) vem ganhando espaço na resolução de problemas relacionados ao efeito do vento sobre edificações, por exemplo: Yang et al. (2008), Braun e Awruch (2009), Balbastro e Sonzogni (2012) e Tominaga et al. (2015), entre outros. Os programas de simulação numérica baseados na DFC são ferramentas fundamentais para o estudo da aerodinâmica das edificações. A simulação permite mostrar o desempenho da edificação mesmo antes de ser construída. Por isso, a simulação torna-se uma ferramenta de auxílio e suporte na tomada de decisões desde o momento em que as ideias estão amadurecendo. Portanto, a utilização da DFC torna-se fundamental nos primeiros estágios de projeto, ou seja, na fase de concepção do edifício. No caso de edificações já construídas, também sempre é possível empregar a DFC para estudar e propor modificações arquitetônicas a fim de reduzir ou eliminar problemas associados com o vento.

A rapidez na criação dos modelos computacionais e a possibilidade de realizar estudos com diversos modelos, fazem das simulações computacionais instrumentos ainda mais interessantes. A rápida visualização dos resultados permite que novas alterações sejam realizadas em curto período de tempo. Tudo isso torna a simulação numérica uma excelente ferramenta para complementar os estudos realizados em túneis de vento. No Brasil, atualmente empregam-se de forma massiva programas numéricos para a resolução de problemas estruturais, entretanto, a DFC é pouco explorada na área da aerodinâmica das edificações.

Neste trabalho são apresentados resultados obtidos através de um programa baseado na DFC para a análise de quatro modelos de edificações baixas, com telhados planos ou de duas águas, e os ângulos dos telhados investigados foram 0° , 30° , 45° e 60° . Cada modelo foi investigado considerando um ângulo de incidência do vento de 0° e 90° , respectivamente. O escoamento é simulado usando um esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin e o Método dos Elementos Finitos. Para o caso de escoamentos turbulentos, foi empregada a Simulação de Grandes Escalas (LES) com o modelo clássico de Smagorinsky para as escalas de turbulência inferiores à resolução da malha. Foi possível determinar como a inclinação do telhado influencia fortemente a topologia do escoamento e a distribuição de pressão sobre a edificação.

2 METODOLOGIA

Nos últimos anos, programas baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional vem ganhando espaço na resolução de problemas relacionados ao efeito do vento sobre edificações. O programa HEXAFEM_3D_IFF, atualmente em desenvolvimento no grupo de Engenharia Computacional, faz uso destas técnicas e foi empregado para as simulações numéricas.

No modelo numérico que foi empregado, o escoamento é governado pelas equações de Navier-Stokes e pela equação de conservação de massa, considerando-se a hipótese de pseudo-compressibilidade para problemas isotérmicos. Emprega-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) para a discretização espacial do domínio de análise, utilizando o elemento isoparamétrico hexaédrico de oito nós. O programa HEXAFEM_3D_IFF emprega o esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin, ver detalhes em [Bono et al. \(2011a\)](#). Para o caso de escoamentos turbulentos, será empregada a Simulação de Grandes Escalas (LES) com o modelo clássico de Smagorinsky para as escalas de turbulência inferiores à resolução da malha.

A validação do programa para exemplos clássicos com baixos e moderados números de Reynolds pode ser vista em [Bono et al. \(2011b\)](#) e [Cabral et al. \(2012\)](#). Os resultados numéricos obtidos com o presente programa mostraram ótima concordância quando comparados com os resultados numéricos e experimentais obtidos por outros autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A inclinação do telhado tem uma forte influência nas sucções locais, nos valores médios e nos valores máximos das sucções e sobrepressões ([Blessmann, 2009](#)). Neste âmbito, o presente trabalho visa estudar numericamente como a variação geométrica do telhado influencia a distribuição de pressão nas fachadas da edificação. Para isto, foi simulado o escoamento ao redor de quatro modelos de edificações, com telhados planos ou de duas águas, e os ângulos dos telhados investigados foram 0° , 30° , 45° e 60° . Cada modelo foi investigado considerando-se dois ângulos de incidência do vento, 0° e 90° , ou seja, paralelo à cumeeira e perpendicular à mesma.

Deve-se ressaltar que todas as simulações empregam o mesmo modelo de domínio computacional, condições iniciais e condições de contorno do escoamento, alterando-se apenas a malha de elementos finitos. As dimensões do domínio seguem as recomendações propostas por [Franke et al. \(2007\)](#) e [Tominaga et al. \(2008\)](#). Na [Figura 1](#), mostra-se o domínio utilizado.

Para as simulações foi adotado um perfil de velocidade exponencial de Camada Limite Atmosférica com um ângulo de ataque igual a zero graus e caracterizado por um número de Reynolds igual a 7×10^4 , calculado com base na velocidade de entrada $V_0 = 10$ m/s a uma altura de $\delta = 20$ m, viscosidade cinemática de $\nu = 1,4285 \times 10^{-3}$ m²/s e com uma dimensão característica da edificação, $H = 10$ m. Para todas as simulações emprega-se a Simulação de Grandes Escalas (LES) com o modelo clássico de Smagorinsky. Adota-se o valor de 0,10 para a constante de Smagorinsky. O programa HEXAFEM_3D_IFF, não considera a geração de flutuações no campo de velocidade no escoamento de entrada nem lei de parede para modelar a região viscosa junto à parede.

Na [Tabela 1](#), apresentam-se as condições de contorno prescritas nas faces mostradas na [Figura 1](#).

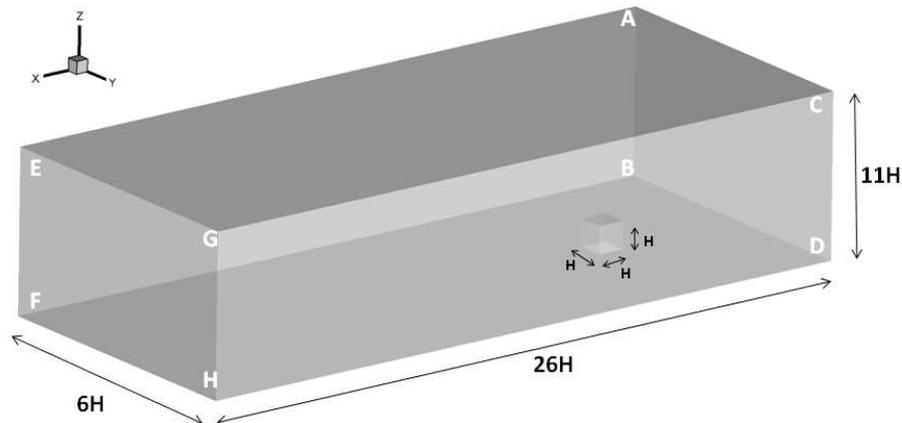


Figura 1: Modelo do domínio computacional

Face	C.C. eixo x	C.C. eixo y	C.C. eixo z
BDFH	Veloc. Nula	Veloc. Nula	Veloc. Nula
ABCD	Veloc. = $V_0(z/\delta)^{0.25}$	Veloc. Nula	Veloc. Nula
ABEF	Veloc. = $V_0(z/\delta)^{0.25}$	Veloc. Nula	Veloc. Nula
CDGH	Veloc. = $V_0(z/\delta)^{0.25}$	Veloc. Nula	Veloc. Nula
EFGH	Pressão nula		

Tabela 1: Condições de contorno

3.1 escoamento ao redor de um cubo

Os edifícios multifamiliares, geralmente, apresentam geometria de um paralelepípedo simples, por este motivo é muito importante conhecer a topologia do escoamento e a distribuição de pressão sobre o mesmo. Para este tipo de geometria, podem-se encontrar na literatura resultados experimentais e numéricos tais como os apresentados por [Richards et al. \(2001\)](#), [Yakhot et al. \(2006\)](#) e [Shao et al. \(2012\)](#), entre outros.

Para a discretização do domínio emprega-se uma malha estruturada, sendo maior a concentração de elementos em torno do cubo, já que nesta região acontecem os principais fenômenos físicos. No resto do domínio, a fim de reduzir a quantidade de elementos e o custo computacional emprega-se uma malha não estruturada. O domínio foi discretizado com quatro níveis de refinamento da malha, na Tabela 2, apresentam-se os valores de nós e elementos em cada caso. As malhas possuem 10x10x10, 20x20x20, 30x30x30 e 40x40x40 elementos nas arestas dos cubos. Na [Figura 2](#), mostram-se as quatro malhas empregadas.

Na [Tabela 2](#), mostram-se para cada exemplo sua identificação, o número de elementos (*nele*), o número de nós (*nno*) e o incremento de tempo (Δt). Todos os exemplos foram rodados em torno de 350.000 passos de tempo. O custo computacional aumenta conforme se incrementa o refinamento em torno da edificação, portanto, é ideal encontrar um nível de refinamento que apresente bons resultados sem necessitar de um número grande de elementos. Com este estudo, tem-se uma estimativa de refinamento ideal para os próximos casos apresentados no presente trabalho.

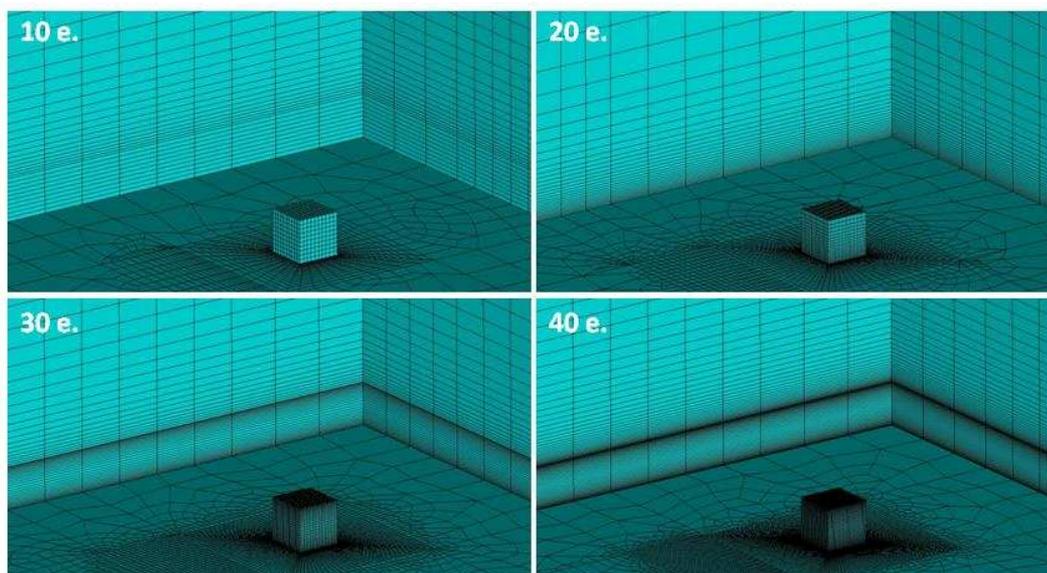


Figura 2: Malhas o caso do cubo

<i>malha</i>	<i>nele</i>	<i>nno</i>	Δt
10e.	40.010	42.625	$1,49 \times 10^{-3}$
20e.	98.752	104.056	$1,19 \times 10^{-3}$
30e.	274.300	283.830	$1,0 \times 10^{-3}$
40e.	702.500	718.388	$7,53 \times 10^{-4}$

Tabela 2: Principais dados das malhas para os casos cúbicos

Todos os resultados mostrados a seguir representam valores médios, ou seja, os valores são obtidos fazendo a média aritmética dos valores instantâneos durante um determinado intervalo de tempo de simulação. Na [Figura 3](#), mostram-se as distribuições de pressão obtidas na presente simulação numérica para as quatro malhas empregadas.

Pode-se observar que na região de barlavento acontece a máxima pressão e na região da esteira (sotavento) temos a mínima pressão. Percebe-se que o maior refinamento da malha permite captar maiores amplitudes de pressão, tornando os resultados mais próximo aos apresentados por outros autores.

Na [Figura 4](#), mostra-se o gráfico de distribuição do coeficiente de pressão sobre o cubo para o caso da malha com 40 elementos nas arestas. O coeficiente de pressão foi calculado tomando como referencia a pressão no plano de saída, ver [Figura 1](#) e [Tabela 1](#). Também, são mostrados na mesma figura os resultados obtidos numericamente por [Murakami e Mochida \(1988\)](#), experimentalmente em túnel de vento por [Castro e Robins \(1997\)](#) e em escala real por [Baines \(1963\)](#) e [Richards et al. \(2001\)](#). Pode-se observar que existe uma ótima concordância entre os resultados obtidos na presente simulação os resultados apresentados por outros autores.

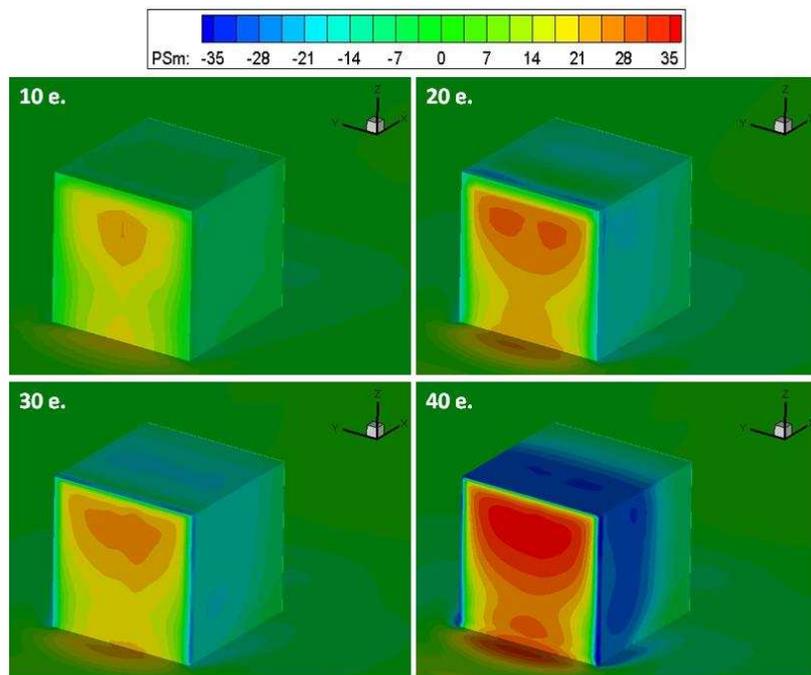


Figura 3: Distribuição de pressão média para o caso do cubo

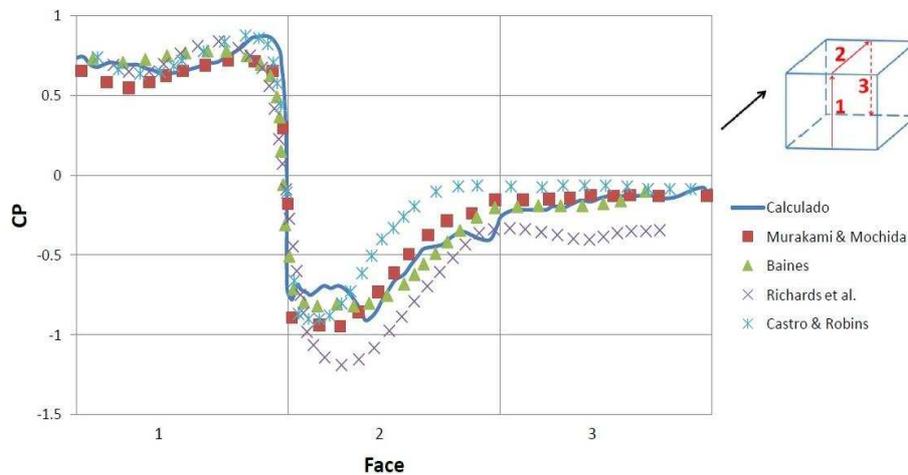


Figura 4: Distribuição do coeficiente de pressão para o caso do cubo

3.2 Escoamento ao redor de uma edificação com telhado de duas águas

As edificações com telhado de duas águas são muito comuns em todo o território nacional, logo é muito importante analisar o escoamento ao redor de este tipo de construções. Para o estudo emprega-se as mesmas dimensões do cubo analisado anteriormente, porém, foram consideradas três inclinações de telhado diferentes, 30° , 45° e 60° . Todos os casos possuem a mesma área na face pentagonal.

Para cada inclinação de telhado analisa-se o escoamento ao redor da edificação considerando que o ângulo de incidência da corrente livre é 0° (escoamento paralelo à cumeeira) e 90° (escoamento perpendicular à cumeeira). Nomeamos de posição frontal, quando a corrente está à 0° , e de posição lateral, quando a corrente está à 90° .

Para a discretização do domínio emprega-se uma malha não estruturada de elementos

hexaédricos, concentrando-se mais elementos na proximidade da edificação. Detalhes da malha de elementos finitos podem ser vistos na [Figura 5](#). De maneira geral, todos os casos apresentaram pouco mais de 10^6 elementos na discretização, o incremento de tempo varia em torno de $8,2 \times 10^{-4}$ e foram rodados 300.000 passos de tempo no presente pesquisa.

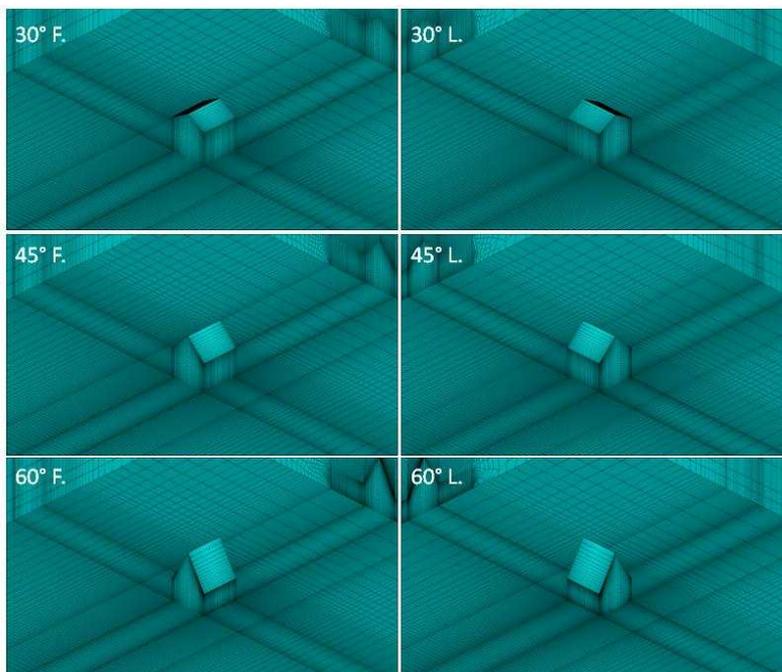


Figura 5: Malhas para a edificação com telhado de duas águas

Abaixo, nas [Figura 6](#) e [Figura 7](#), apresentam-se linhas de corrente ao redor da edificação num plano vertical, para todos os casos estudados no presente trabalho.

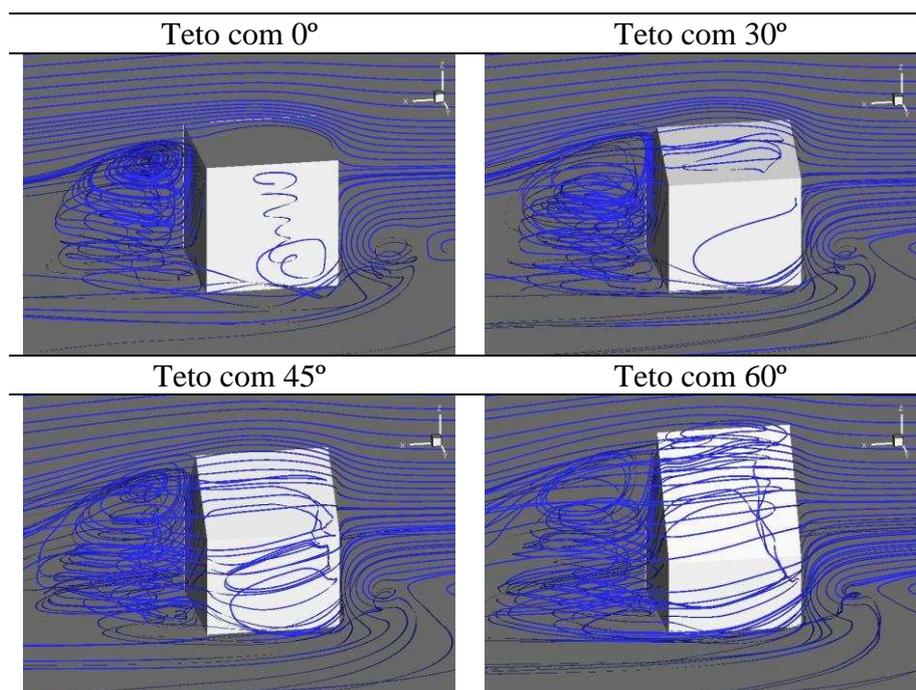


Figura 6: Linhas de corrente para os casos de ângulo de ataque frontal

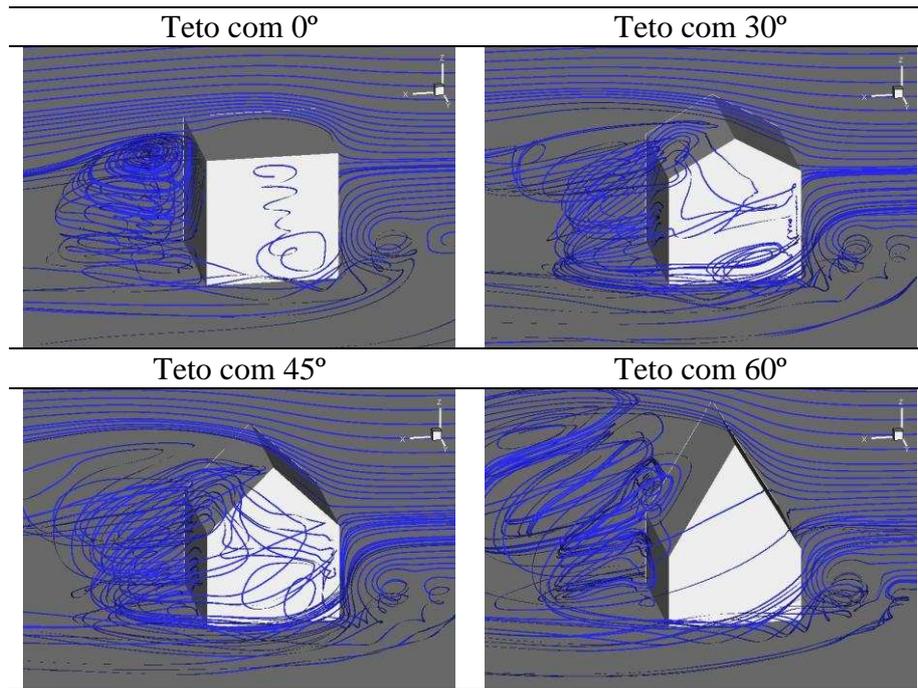


Figura 7: Linhas de corrente para os casos de ângulo de ataque lateral

Pode-se perceber que se formam vários vórtices de diferentes tamanhos e intensidade nas proximidades das edificações, em especial, o vórtice de base ou ferradura, o qual se forma a montante da edificação, junto à base, e a esteira de vórtices que se forma a jusante do mesmo.

Na Figura 8, mostram-se as distribuições de pressão média para todas as edificações com diferentes inclinações do telhado.

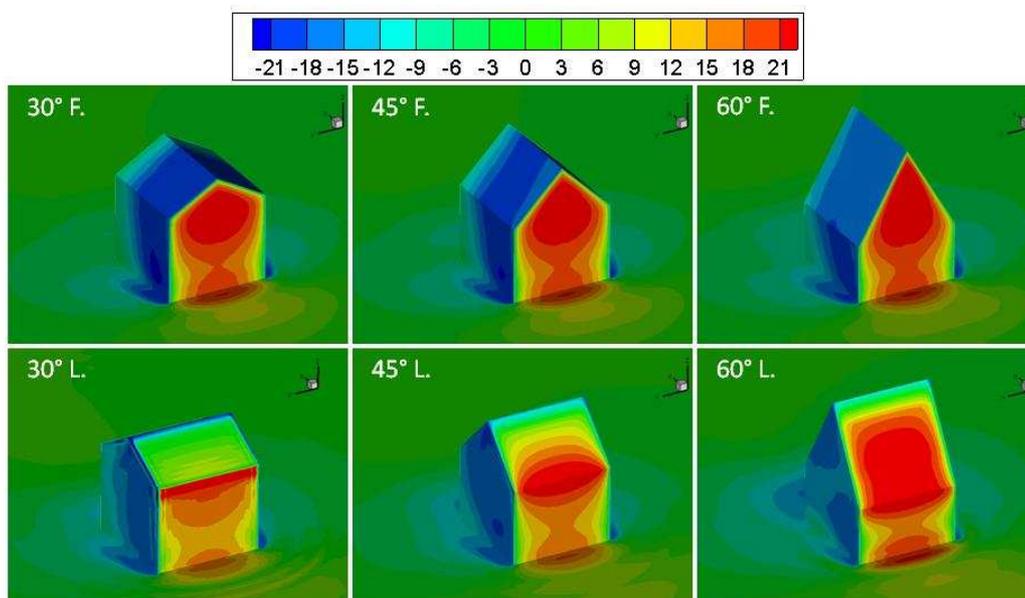


Figura 8: Distribuição de pressão para o caso da edificação com telhado de duas águas

Pode-se perceber que na região de barlavento acontece a máxima pressão e na região da esteira (sotavento) temos a mínima pressão. Com relação à inclinação do telhado, observa-se que quando se incrementa o ângulo do mesmo, a área de alta pressão aumenta, fazendo que exista uma maior diferença de pressão entre as regiões à montante e jusante da edificação. As

sucções na cobertura são importantes no caso de telhados com pouco ângulo de inclinação, ver o caso 30° Lateral. Segundo Blessmann (2009), muitas vezes a força de sustentação é bastante superior ao peso próprio do telhado, causando o seu levantamento ou inversão de esforços na estrutura.

4 CONCLUSÕES

A utilização de métodos computacionais para análise de problemas da Dinâmica dos Fluidos, atualmente é indispensável e mostrou-se muito eficiente na resolução de problemas da Engenharia do Vento. O programa HEXAFEM_3D_IFF, apresentou ótimos resultados permitindo uma análise bem detalhada das principais variáveis do problema. A simulação através do Método dos Elementos Finitos e o emprego da Simulação de Grandes Escalas (LES) para escoamentos turbulentos permitem capturar eficientemente as distribuições de pressão na fachadas das edificações modeladas.

Pôde-se observar que, dependendo da geometria (ângulo de inclinação do telhado) e posicionamento (ângulo de incidência do vento) da edificação, a topologia do escoamento sofre variações consideráveis, causando diferentes distribuições de pressão. Perceber-se que na região de barlavento acontece a máxima pressão e na região da esteira (sotavento) temos a mínima pressão. Com relação à inclinação do telhado, observa-se que quando se incrementa o ângulo do mesmo, a área de alta pressão aumenta, fazendo que exista uma maior diferença de pressão entre as regiões à montante e jusante da edificação.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

- Baines, W. D., *Effects of velocity distribution on wind loads and flow patterns on buildings*, *Proceedings Symp. Wind Effects on Buildings and Structures*, 1963.
- Balbastro, G.C., Sonzogni, V.E., Uso de CFD para estudio de presiones del viento en cubiertas curvas aisladas. *Rev. Int. Mét. Numér. Cál. Diseño Ing.*, 28:49-54, 2012.
- Braun, A.L., Awruch, A.M., Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. *Computers and Structures*, 87:564-581, 2009.
- Blessmann, J., *Ação do Vento em Telhados*. Brasil, UFRGS Editora, 2009.
- Blessmann, J., *Aerodinâmica das construções*. Brasil, UFRGS Editora, 2011.
- Bono, G., Lyra, P.R.L., Bono, G., Simulação Numérica de Grandes Escalas em Escoamentos Incompressíveis através do Método dos Elementos Finitos. *Anais CIBEM10 - X Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica*. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1:721-733, 2011.
- Bono, G., LYRA, P.R.M, Bono, G. F. F., Simulação numérica de escoamentos incompressíveis com LES. *Mecánica Computacional*, 30:1423-1440, 2011.
- Cabral, D. N., Bono, G., Bono, G. F. F., Estudo paramétrico de dispositivos de controle passivo de vibrações induzidas por vórtices. *Mecánica Computacional*, 31:69-84, 2012.
- Case, P.C., Isyumov, N., Wind loads on low buildings with 4:12 gable roofs in open country and suburban exposures. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 77&78:107-118, 1998.
- Castro, I. P., Robins, A. G. The flow around a surface-mounted cube in uniform, turbulent

- streams. *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge University, 79:307-335, 1997.
- COE Program - Tokyo Polytechnic University, *Wind Effects on Buildings and Urban Environment*. Tokyo: Tokyo Polytechnic University, 2007. Disponível em: <http://www.wind.arch.tkougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/g080800.html> Acesso em: 02 de abril de 2016.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H., Carissimo, B., *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. COST Office, 2007.
- Murakami, S. Mochida, A., 3D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k-e model. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 31:283-303, 1988.
- Paluch, M.J., Loredou-Souza, A.M., Blessmann, J., Wind loads on attached canopies and their effect on the pressure distribution over arch-roof industrial buildings. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 91:975-994, 2003.
- Richards, P. J., Hoxey, R. P., Short, L. J., Wind pressures on a 6m cube. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 89:1553-1564, 2001.
- Shao, J., Liu, J., Zhao, J., Evaluation of various non-linear k_ϵ 3 models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer. *Building and Environment*, 57:145-155, 2012.
- Uematsu, Y., Isyumov, N., Wind pressures acting on low-rise buildings. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 82:1-25, 1999.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T., AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 96:1749-1761, 2008.
- Tominaga, Y., Akabayashi, S., Kitahara, T., Arinami, Y., Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. *Building and Environment*, 84:204-213, 2015.
- Yakhot, A., Liu, H., Nikitin, N. Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation. *International J. of Heat and Fluid Flow*, 27:994-1009, 2006.
- Yang, W., Quan, Y., Jin, X., Tamura, Y., Gu, M., Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise buildings. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 96:2080-2092, 2008.