

DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES DO TELHADO SEGUNDO A NBR 6123 E A ENGENHARIA DO VENTO COMPUTACIONAL

Anderson V. do Nascimento, Giuliana F. F. Bono e Gustavo Bono

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Rod. BR-104, Km 59, CEP: 55014-900, Caruaru - PE, Brasil,
anso_viana@hotmail.com, 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. As ações do vento ocasionam esforços nas estruturas que se não são levadas em consideração nos cálculos efetuados no dimensionamento da estrutura podem acarretar em danos e, até mesmo, ocasionar o colapso total da estrutura. Devido a esses fatos, a aerodinâmica tem ganhado maior importância no contexto da construção civil, onde, desempenha um papel de suma importância na análise do comportamento das estruturas submetidas à ação do vento. Visando isso, o presente trabalho tem por objetivo estudar, numérica e analiticamente, os esforços causados pelo vento sobre modelos de residências com telhado de duas águas, observando como a inclinação do telhado influencia as cargas. O programa *UFPEventos*, baseia-se nos conceitos da norma brasileira ABNT NBR 6123/88 e é utilizado para obtenção dos resultados normativos. Os resultados numéricos são obtidos com o programa *HEXAFEM_3D_IFF*, que faz uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional. São estudados modelos de edificações com inclinações do telhado de 30°, 45° e 60°. Para cada inclinação de telhado são utilizados ângulos de incidência do vento iguais à 0° e 90°, respectivamente. Constatou-se que a inclinação do telhado exerce considerável variação nas cargas resultantes do vento. Os resultados apresentados mostram a eficiência e o potencial dos programas *UFPEventos* e *HEXAFEM_3D_IFF*, que conseguiram capturar a física do problema e obtiveram resultados coerentes entre si.

1 INTRODUÇÃO

Um dos aspectos mais significativos do desenvolvimento do ser humano é sua habilidade de entender a natureza ao seu redor e conseguir abstrair dela elementos que possam proporcionar melhorias de vida. Essa habilidade, aliada ao conhecimento técnico, traz benefícios aos mais diversos segmentos da sociedade. Os diversos ramos da engenharia são exemplo de tudo isso. Um desses ramos, a engenharia do vento, trata de estudar as interações entre o vento na camada limite atmosférica e o homem junto a seus trabalhos na superfície da terra (Cermak, 1975).

Blessmann (1986) destaca que a importância do estudo dos efeitos do vento nas edificações está intimamente ligada ao desenvolvimento da tecnologia dos materiais, da ciência e da técnica das construções, bem como possibilitar um melhor aproveitamento dos terrenos, com a construção de edifícios cada vez mais desafiadores.

A ação das cargas de vento é responsável por ocasionar nas estruturas efeitos de tensões, deformações, deslocamentos e vibração, que podem vir a afetar a segurança e o bem-estar dos indivíduos. Em casos extremos, essa ação pode acarretar na devastação total ou parcial da edificação.

Nas construções que não levam em conta as ações do vento, há uma grande possibilidade de ocorrência de acidentes na etapa de construção e diminuição da vida útil de telhados e paredes, devido ao dimensionamento incorreto e à ausência de contraventamento quando necessário. A probabilidade de ocorrer acidentes decai quando são consideradas nos cálculos as cargas de vento (Blessmann, 2009).

A norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta uma metodologia bastante prática para o cálculo das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento em edificações. São detalhadas equações e dados quantitativos necessários para o cálculo das forças devidas à ação do vento na edificação.

Os programas de simulação numérica baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD do inglês *Computational Fluid Dynamics*) constituem outro método para se estimar as cargas devidas ao vento. A CFD permite uma rápida criação de modelos computacionais e a possibilidade de realizar estudos de diversos modelos, o que tornam esse método bastante interessante. A rápida visualização dos resultados permite que novas alterações sejam realizadas em curto prazo de tempo, o que ajuda a diminuir atrasos no projeto. É válido ressaltar que a simulação numérica é uma opção mais econômica e com menor tempo de execução se comparada com as simulações e estudos realizados em túnel de vento (Ramponi e Blocken, 2012; Blocken, Stathopoulos e Beeck, 2016).

Atualmente, emprega-se de forma massiva programas numéricos para a resolução de problemas estruturais. Entretanto, a CFD é pouco utilizada para o cálculo das cargas de vento em edifícios. Huang, Li e Xu (2007), Li *et al.* (2015) e Aly e Bresowar (2016), entre outros, mostraram o potencial da CFD realizando estudos das forças devidas à ação do vento em modelos de edificações, obtendo resultados satisfatórios. Em todos esses trabalhos, parte dos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais realizados em túnel de vento, obtendo uma boa concordância, o que demonstra a validade do método.

Sendo assim, o presente trabalho visa estudar através dos métodos normativos e da CFD as cargas devidas à ação estática do vento em modelos de residências com telhado de duas águas. Foram utilizadas três diferentes inclinações para o telhado de duas águas, 30°, 45° e 60°. Cada modelo utilizado foi investigado considerando o ângulo de incidência do vento, em relação à cumeeira, de 0° e 90°. Foi possível determinar como a inclinação do telhado afeta as cargas devidas à ação do vento. A partir da comparação dos resultados obtidos com ambos métodos foi possível apresentar as vantagens e limitações dos mesmos, além, de avaliar o

grau de semelhança entre os resultados.

2 METODOLOGIA

Nos últimos anos, os softwares vêm ganhando espaço na resolução de problemas dos diversos ramos da engenharia. Graças aos aumentos de capacidade computacional, programas robustos conseguem realizar simulações numéricas em curtos intervalos de tempo.

O programa *UFPEventos* oferece uma alternativa fácil e rápida para o cálculo das cargas de vento utilizando a metodologia fornecida pela norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988). Através de uma interface amigável e intuitiva, é possível obter os resultados de carga do vento em edifícios de telhado curvo ou de duas águas. O programa utiliza os recursos da interface gráfica do usuário (GUI do inglês *Graphical User Interface*) e foi implementado no ambiente MATLAB, permitindo determinar através de uma interface gráfica simples e amigável os coeficientes de pressão e o carregamento resultante nas paredes e na cobertura devido à ação do vento. Detalhes sobre o *software* podem ser vistos em Santos (2016). O programa foi utilizado no presente trabalho para a obtenção dos resultados da metodologia normativa.

Para a metodologia baseada na CFD, foi empregado o programa HEXAFEM_3D_IFF, que resolve as equações de Navier-Stokes e a equação de conservação da massa, considerando a hipótese da pseudo-compressibilidade para problemas isotérmicos. Também emprega-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) para a discretização espacial do domínio computacional, fazendo uso de elementos isoparamétricos hexaédricos de oitos nós. Para a simulação da turbulência, utiliza-se a Simulação de Grandes Escalas (LES do inglês *Large Eddy Simulation*), com o modelo clássico de Smagorinsky para as escalas de turbulência inferiores à resolução da malha, adotando-se o valor de 0,10 para a constante de Smagorinsky. Outros detalhes podem ser vistos em Bono e Lyra (2011).

A validação do programa para exemplos com baixos e moderados números de Reynolds podem ser vistos em Bono, Lyra e Bono (2011), Cabral, Bono e Bono (2012) e Nascimento, Bono e Bono (2016). Os resultados obtidos com o programa mostraram ótima concordância quando comparados com resultados numéricos e experimentais apresentados por outros autores.

3 MODELOS ANALISADOS

As edificações com telhado de duas águas são muito comuns na construção civil, logo este tipo de cobertura precisa especial atenção. Para o presente estudo consideram-se as três edificações analisados numericamente por Nascimento, Bono e Bono (2016) com telhados de duas águas e inclinações de 30°, 45° e 60°.

Todos os casos possuem uma base quadrada de aresta igual a 10 m. Para a incidência do vento sobre as edificações são adotadas duas direções, paralela à cumeeira do telhado, ou seja, com ângulo (α) de 0° do vento em relação à cumeeira, e perpendicular à cumeeira, ou seja, com ângulo (α) de 90° em relação à cumeeira.

4 CÁLCULO NORMATIVO

Todos os cálculos normativos são feitos com o programa *UFPEventos*, que permite a escolha de todos os parâmetros para o cálculo de carga do vento conforme especificado na norma NBR 6123 (ABNT, 1988). Todos os parâmetros e dados são fornecidos e/ou modificados dentro de menus interativos e controles. Na Figura 1, mostram-se a modo de exemplo duas janelas do programa *UFPEventos*.

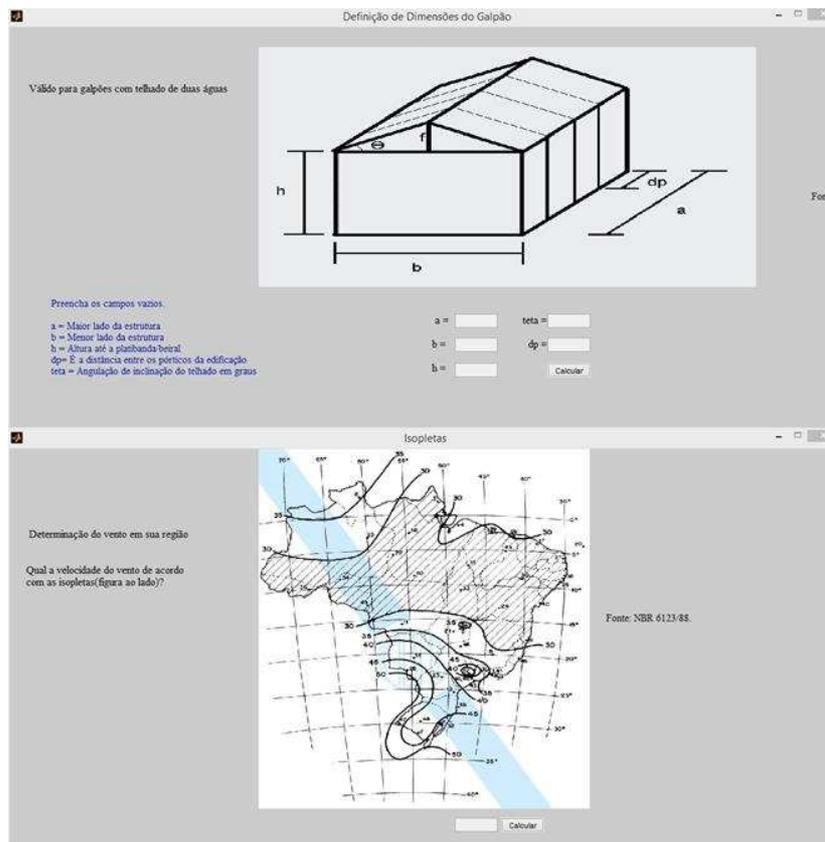


Figura 1 – Janelas para definição de dados no programa *UFPEventos*.

A norma NBR 6123 (ABNT, 1988) usa valores constantes de velocidade do vento para calcular as cargas aerodinâmicas sobre os elementos da edificação. Para todos os casos foi utilizada uma velocidade básica de $V_0 = 30$ m/s, que corresponde à velocidade predominante no nordeste brasileiro.

Foram adotadas as situações de terreno plano, obstáculos com cota de 1 m e tipologia de residência, para poder calcular-se a velocidade característica do vento. Considera-se o caso de impermeabilidade das edificações, portanto, empregam-se apenas os valores de pressão externa exercida pelo vento, logo, os coeficientes de pressão interna não precisam ser considerados.

Os resultados do programa *UFPEventos* podem ser visualizados em gráficos e ainda no pós-processamento pode ser gerar um arquivo digital no formato *Portable Document Format* (*.pdf) com imagens e tabelas dos resultados. Contudo, utiliza-se apenas os resultados numéricos para o presente trabalho.

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Em Franke *et al.* (2007) e Tominaga *et al.* (2008) são apresentadas algumas recomendações quanto às dimensões mínimas de um domínio computacional para o estudo de aerodinâmica de construções. Baseado nessas recomendações, Nascimento, Bono e Bono (2016) adotaram o domínio computacional mostrado na Figura 2.

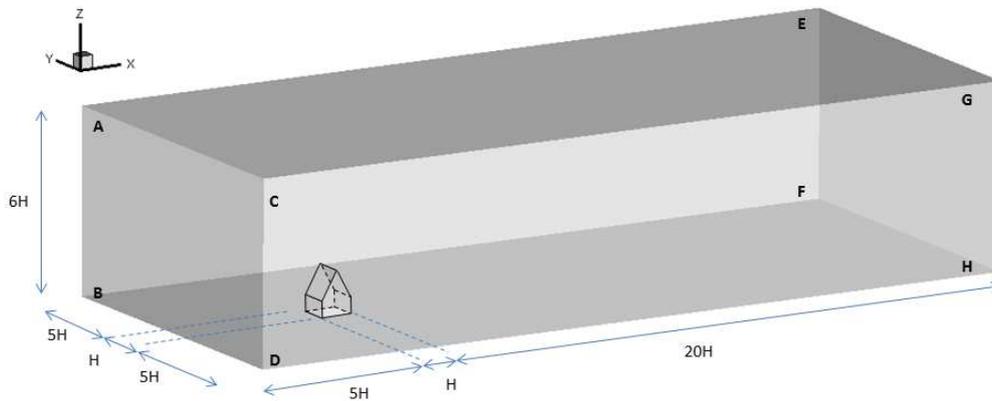


Figura 2 – Domínio computacional adotado para simulações numéricas.

Foi adotado um perfil de velocidade exponencial (lei da potência) de camada limite atmosférica com expoente de 0.25 e adotou-se um número de Reynolds é igual a 7×10^4 . Para mais detalhes com relação às condições iniciais e condições de contorno ver Nascimento, Bono e Bono (2016).

Todas as malhas ficam em torno de aproximadamente $1,1 \times 10^6$ elementos hexaédricos, procurando-se concentrar a maior parte destes elementos nas proximidades da edificação. O mínimo tamanho da aresta do elemento ficou em torno de $1,2 \times 10^{-1}$ m, sendo empregado um incremento de tempo de $\Delta t = 8,22 \times 10^{-4}$ s. Deve-se ressaltar, que 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 Figura 3, mostra-se as malhas computacionais utilizadas.

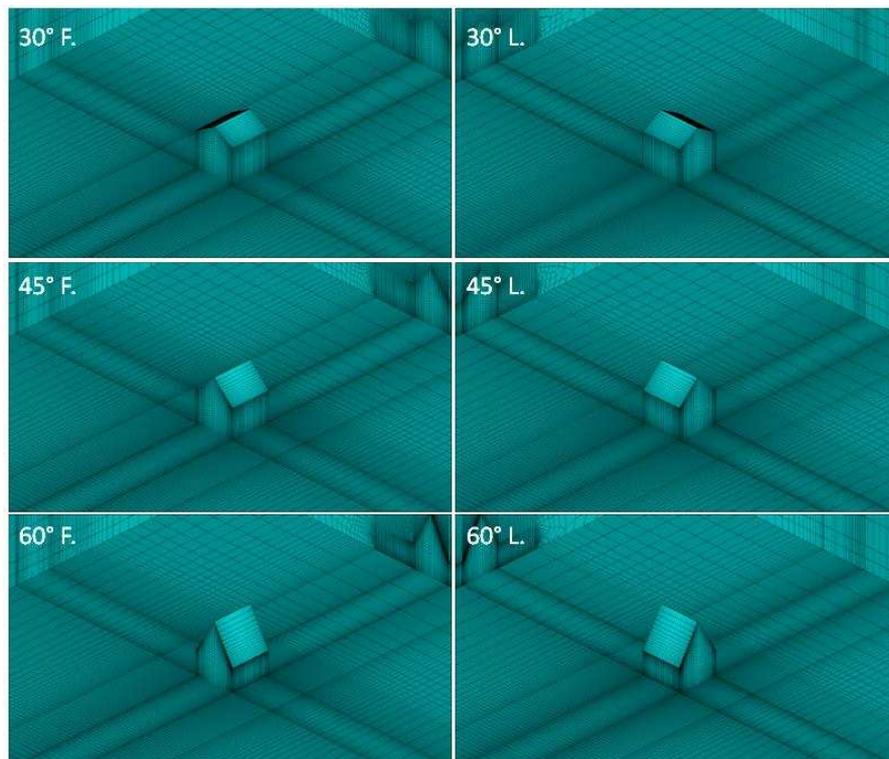


Figura 3 – Malhas computacionais utilizadas.

Os procedimentos da norma NBR 6123 (ABNT, 1988) permitem calcular os valores médios de pressão nas fachadas ou elementos da edificação. Já nas simulações numéricas realizadas com o programa HEXAFEM_3D_IFF, os resultados instantâneos são fornecidos nos nós da malha de elementos finitos, portanto, para fins de comparação, foi necessário calcular o valor médio da distribuição de pressão para as fachadas e telhado, obedecendo os parâmetros adotados pela norma.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados na norma NBR 6123 (ABNT, 1988) são expressos através de valores de coeficientes de forma para cada parede externa da edificação e para cada água do telhado. Para algumas dessas faces é necessário realizar uma análise fragmentada, de acordo com o método normativo

Na Figura 4, mostra-se como é dividida a distribuição de coeficientes de forma para as paredes das edificações para o caso do vento em direção paralelo à cumeeira, para ambos métodos e inclinações de telhado. Os valores dos coeficientes para ambos métodos (normativo e CFD) e as três inclinações do telhado são dados na Tabela 1. Vale lembrar que valores positivos dos coeficientes correspondem à sobrepressões e os valores negativos, às sucções.

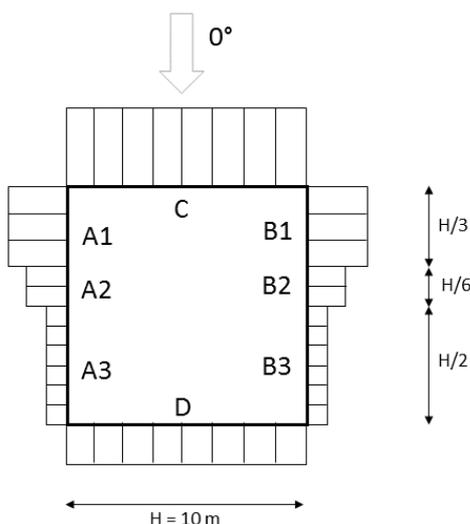


Figura 4 – Esquema de coeficientes para as paredes dos casos com $\alpha = 0^\circ$.

		Método	A1	B1	A2	B2	A3	B3	C	D
ângulo do telhado	30°	Normativo	-0.90	-0.90	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.70	-0.50
		CFD	-0.89	-0.89	-0.86	-0.86	-0.49	-0.49	0.73	-0.23
	45°	Normativo	-0.90	-0.90	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.70	-0.50
		CFD	-0.82	-0.83	-0.80	-0.81	-0.50	-0.50	0.72	-0.26
	60°	Normativo	-0.90	-0.90	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.70	-0.50
		CFD	-0.73	-0.73	-0.72	-0.72	-0.50	-0.50	0.69	-0.31

Tabela 1 – Coeficientes para as paredes dos casos com $\alpha = 0^\circ$.

Percebe-se que pelo método normativo os coeficientes são os mesmos para as três

inclinações de telhado, isto é devido às simplificações adotadas pela norma. De forma geral, os resultados de ambas metodologias são muito próximos, exceto para as regiões intermediárias laterais A2 e B2, além da região posterior D, onde ocorre uma forte recirculação do escoamento. Também pode-se observar, através dos resultados numéricos, que os coeficientes alcançam amplitudes levemente maiores para o caso de telhado com 30°, e diminuem com o incremento da inclinação do telhado.

Na Figura 5, mostra-se a distribuição de coeficientes de forma para as paredes das edificações no caso do vento na direção perpendicular à cumeeira. Na Tabela 2, mostram-se os valores dos coeficientes para ambos métodos (normativo e CFD) e as três inclinações do telhado conforme a distribuição dada na Figura 5.

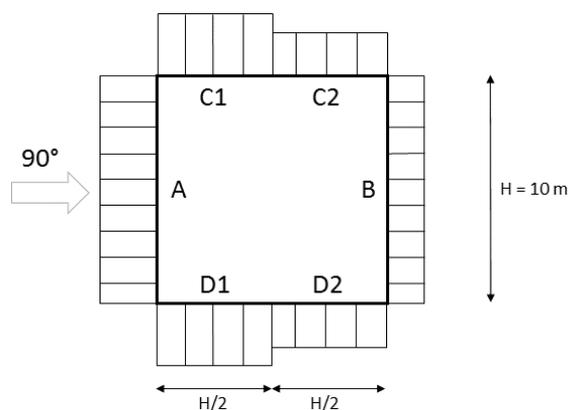


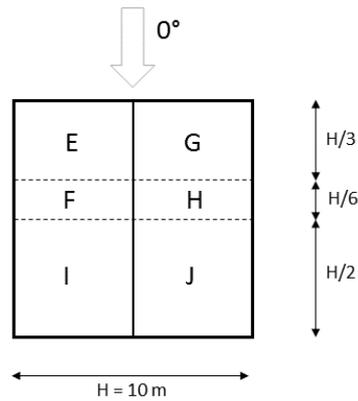
Figura 5 – Esquema de coeficientes para as paredes dos casos com $\alpha = 90^\circ$.

		Método	A	B	C1	D1	C2	D2
ângulo do telhado	30°	Normativo	0.70	-0.50	-0.90	-0.90	-0.50	-0.50
		CFD	0.67	-0.39	-0.73	-0.75	-0.55	-0.55
	45°	Normativo	0.70	-0.50	-0.90	-0.90	-0.50	-0.50
		CFD	0.62	-0.48	-0.72	-0.71	-0.64	-0.63
	60°	Normativo	0.70	-0.50	-0.90	-0.90	-0.50	-0.50
		CFD	0.60	-0.57	-0.61	-0.62	-0.56	-0.57

Tabela 2 – Coeficientes para as paredes dos casos com $\alpha = 90^\circ$.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 2 com os obtidos para o caso de $\alpha = 0^\circ$, percebe-se uma maior concordância entre os resultados dados por ambos métodos. Observa-se que os valores obtidos pelo método normativo são levemente maiores em comparação com os determinados via CFD. Novamente, pode-se perceber através dos resultados numéricos maiores amplitudes para os coeficientes no caso do ângulo de 30°.

Na Figura 6, mostra-se a distribuição de coeficientes de forma para os telhados das edificações submetidas ao vento em direção paralela à cumeeira. Na Tabela 3, apresentam-se os valores dos coeficientes para ambos métodos (normativo e CFD) e as três inclinações do telhado conforme a distribuição mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Esquema de coeficientes para os telhados dos casos com $\alpha = 0^\circ$.

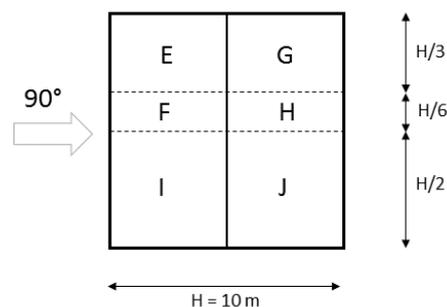
		Método	E	G	F	H	I	J
ângulo do telhado	30°	Normativo	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80
		CFD	-0.86	-0.86	-0.91	-0.92	-0.66	-0.67
	45°	Normativo	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80
		CFD	-0.76	-0.77	-0.81	-0.81	-0.66	-0.67
	60°	Normativo	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80
		CFD	-0.65	-0.65	-0.69	-0.69	-0.64	-0.64

Tabela 3 – Coeficientes para os telhados dos casos com $\alpha = 0^\circ$.

Percebe-se que os coeficientes obtidos pelo método normativo são constantes, o que evidencia certa falta de sensibilidade desse método.

Os resultados no caso de 45° apresentam uma boa concordância para ambos os métodos, entretanto, nas demais inclinações encontram-se divergências. Pode-se observar nos resultados obtidos empregando CFD que os valores de sucção geralmente são maiores em comparação com os valores normativos para o caso de 30°, entretanto, são menores no caso da inclinação de 60°.

Na Figura 7, mostra-se a distribuição de coeficientes de forma para os telhados das edificações submetidas ao vento em direção perpendicular ao vento. Apresentam-se na Tabela 4, os valores dos coeficientes obtidos com ambos métodos e calculados conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema de coeficientes para os telhados dos casos com $\alpha = 90^\circ$.

		Método	E	G	F	H	I	J
ângulo do telhado	30°	Normativo	-0.20	-0.50	-0.20	-0.50	-0.20	-0.50
		CFD	0.01	-0.42	0.11	-0.40	0.04	-0.41
	45°	Normativo	0.20	-0.50	0.20	-0.50	0.20	-0.50
		CFD	0.33	-0.50	0.50	-0.48	0.38	-0.49
	60°	Normativo	0.60	-0.50	0.60	-0.50	0.60	-0.50
		CFD	0.54	-0.53	0.73	-0.51	0.60	-0.53

Tabela 4 – Coeficientes para os telhados dos casos com $\alpha = 90^\circ$.

Observa-se que os resultados obtidos com ambos métodos para o caso de 30° apresentam divergências principalmente nas regiões E, F e I, esta discrepância origina-se devido à dificuldade de capturar numericamente com a malha de elementos finitos empregada o pico de sucção na região do telhado próxima à aresta formada pela parede frontal ao vento e o telhado. Um maior refinamento de malha nesta região poderia diminuir a discrepância ocorrida. Nos demais casos observa-se uma boa concordância entre os resultados obtidos pelos métodos normativo e CFD.

7 CONCLUSÕES

A utilização de métodos computacionais na análise de problemas da aerodinâmica das construções atualmente é de grande importância e mostrou-se muito eficiente nas situações estudadas. O programa HEXAFEM_3D_IFF permitiu uma análise detalhada dos modelos propostos e possibilitou a comparação com as cargas obtidas através dos procedimentos normativos.

Pôde-se observar, que os resultados obtidos pela metodologia normativa apresentam boa concordância em comparação com os resultados numéricos para a maioria dos casos. Contudo, houve discrepâncias nos coeficientes para as faces A2 e B2 no caso de $\alpha = 0^\circ$, apresentando uma diferença média de aproximadamente 37%. Na face D, devido à grande recirculação nesta região, a diferença média foi de 47%. Para os coeficientes dos telhados, podem-se observar divergências nas faces E, F e I nos casos com inclinações do telhado de 30° e 45° e $\alpha = 90^\circ$. Estas discrepâncias podem ser explicadas pela dificuldade de capturar numericamente a região de separação na aresta formada entre a parede frontal ao vento e o telhado.

Os resultados numéricos no caso com $\alpha = 0^\circ$, mostraram que os valores absolutos de pressão nas paredes e telhados diminuem com o incremento da inclinação do telhado. O método normativo, entretanto, não mostra diferença de pressões para os casos de α igual a 0° . No caso com $\alpha = 90^\circ$, observa-se que não há uma tendência definida no comportamento dos coeficientes.

Finalmente, observa-se que em algumas situações os resultados fornecidos pela norma NBR 6123 (ABNT, 1988) são menores do que os obtidos numericamente, isto deve ser cuidadosamente analisado, já que os valores normativos estariam desfavoráveis à segurança. Com isso, percebe-se a importância de utilizar uma segunda metodologia para complementar os resultados normativos.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de

Pernambuco (FACEPE), ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

9 REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6123*: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- Aly A.M., Bresowar J. Aerodynamic of wind- induce uplift forces on low-rise buildings: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, 5:267-276, 2016.
- Blessmann J. *Acidentes causados pelo vento*. 3ª ed. Porto Alegre, Editora da Universidade UFRGS, 1986.
- Blessmann J. *Ação do vento em telhados*. 2ª ed. Porto Alegre, Editora da Universidade UFRGS, 2009.
- Blocken B., Stathopoulos T., Beeck JP.A.J.V. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 100:50-81, 2016.
- Bono G., Lyra P.R.L. Simulação numérica de grandes escalas em escoamentos incompressíveis através do Método dos Elementos Finitos. *Anais CIBEM10 - 10º Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica*. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 1:721-733, 2011a.
- Bono G., Lyra P.R.M., Bono G.F.F. Simulação numérica de escoamentos incompressíveis com LES. *Mecánica Computacional*, Córdoba, 30:1423-1440, 2011b.
- Cabral D.N., Bono G., Bono G.F.F. Estudo paramétrico de dispositivos de controle passivo de vibrações induzidas por vórtices. *Mecánica Computacional*, Córdoba, 31:69-84, 2011.
- Cermak J.E. Applications of fluid mechanics to wind engineering - A Freeman Scholar Lecture. *Journal of Fluids Engineering*. 97:9-38, 1975.
- Franke J., Hellsten A., Schlunzen H., Carissimo B. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. COST Office, 2007.
- Huang S., Li Q.S., Xu S. Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research*, 63:612-627, 2007.
- Li B., Liu J., Feifei L., Man X. Evaluation of CFD simulation using various turbulence models for Wind pressure on buildings based on Wind tunnel experiments. *Procedia Engineering*, 121:2209-2216, 2015.
- Nascimento A.V., Bono G.F.F., Bono G. Estudo computacional de edificações com diferentes inclinações de telhado. *Mecánica Computacional*, Córdoba, 34:2027-2036, 2016.
- Ramponi R., Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. *Building and Environment*, 53:34-48, 2012.
- Santos G.E.T. Desenvolvimento de um programa computacional para a determinação das forças devido ao vento em edificações segundo a Norma NBR 6123/88. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco – Caruaru, 2016.
- 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. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96:1749-1761, 2008.