

ANÁLISE NUMÉRICA DOS EFEITOS DE VIZINHANÇA NAS AÇÕES DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS

Palavras-Chave: *VENTOS, EDIFÍCIOS ALTOS, EFEITOS DE VIZINHANÇA*

Autores:

VICTOR MELONI SCANAPIECO, FECFAU, UNICAMP

PROF. DR. CILMAR DONIZETI BASÁGLIA (orientador), FECFAU, UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Com a crescente verticalização dos centros urbanos e o uso de estruturas leves (como aço e concreto), a análise dos efeitos do vento em edifícios altos tornou-se fundamental para garantir segurança e viabilidade econômica. A presença de edificações próximas altera o campo aerodinâmico devido aos efeitos de vizinhança, podendo reduzir ou amplificar esforços sobre a estrutura (Negri, 2017).

A norma ABNT NBR 6123:2023 fornece diretrizes para o cálculo das ações do vento, considerando fatores como topografia, geometria da edificação e vizinhança, mas não trata diretamente dos efeitos de vizinhança com valores precisos, por se tratar de fenômenos complexos. Em vez disso, sugere fatores de majoração e a realização de estudos especiais nesses casos. Nota-se que três principais efeitos aerodinâmicos são destacados:

- Efeito Venturi
- Deflexão vertical do vento
- Turbulência na esteira

Além disso, o comportamento de um fluido em escoamento satisfaz a equação da continuidade, a qual estabelece que, em determinado intervalo de tempo, a quantidade de massa que adentra um volume de controle deve ser igual àquela que sai, somada à variação da massa acumulada internamente (Pitta, 2002). Utilizando o Teorema de Bernoulli entre dois pontos — sendo o primeiro em uma região não influenciada por obstáculos e o segundo onde o escoamento sofre interferência de um corpo sólido — torna-se viável estimar os coeficientes

aerodinâmicos. Conforme definidos na ABNT NBR 6123:2023, os coeficientes de forma externo estão diretamente relacionados à geometria, dimensões do corpo e velocidade característica do fluxo. A partir disso, é possível calcular a pressão dinâmica do vento incidente sobre a edificação e, consequentemente, determinar os esforços atuantes sobre a estrutura.

Devido ao elevado custo e tempo de execução de ensaios de túnel de vento, utiliza-se como alternativa a modelagem numérica baseada no Método dos Volumes Finitos, que considera a interação fluido-estrutura e permite estimar os coeficientes de pressão das edificações, justificando o objetivo do presente estudo, o qual é obter de forma precisa tanto os coeficientes de forma das edificações quanto a velocidade do vento a partir de determinadas condições de vizinhança e comparar com as recomendações da ABNT NBR 6123:2023.

Sendo assim, com a crescente densificação urbana verticalizada, tornam-se essenciais estudos computacionais que considerem os efeitos de vizinhança, área ainda em desenvolvimento e majoritariamente composta por modelos reduzidos em túnel de vento.

METODOLOGIA:

Primeiramente, foram definidos os modelos a serem utilizados no presente estudo. A tabela 1 contém a descrição dos dez modelos gerados e analisados. Por outro lado, as figuras 1 e 2 representam as dimensões do edifício padrão para todos os modelos e a composição de edifícios

(alinhados (A) ou desalinhados (D)), respectivamente.

Modelo	Número de Torres	Alinhamento	Espaçamento entre Torres	Caso de Vento
1	1	-	-	Vento 0°
2	1	-	-	Vento 90°
3	2	A	8 m	Vento 0°
4	2	A	8 m	Vento 90°
5	2	A	5 m	Vento 0°
6	2	A	5 m	Vento 90°
7	2	D	8 m	Vento 0°
8	2	D	8 m	Vento 90°
9	2	D	8 m	Vento 45°
10	2	D	8 m	Vento 135°

Tabela 1 - Modelos gerados e analisados no presente estudo. Fonte: Próprio autor.

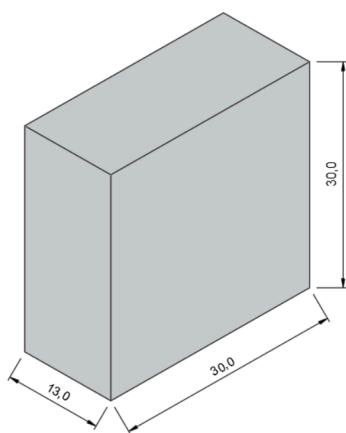
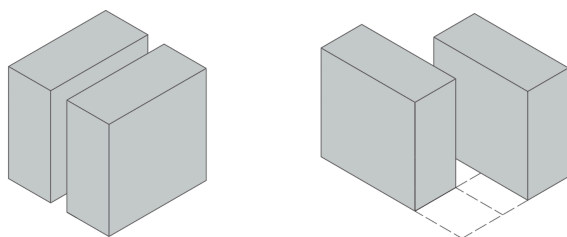


Figura 1 - Dimensões do edifício padrão. Fonte: Próprio autor.



a) Edifícios alinhados b) Edifícios desalinhados

Figura 2 - Composição de edifícios. Fonte: Próprio autor.

Mais especificamente sobre as direções de atuação do vento, foi definido que vento 0° incide sobre a face de menor área dos edifícios, vento 90° incide sobre a face de maior área e os ventos 45° e 135° incidem inclinadamente, com ângulo de giro em sentido anti-horário a partir da direção 0°. A figura 3 explicita tal convenção adotada:

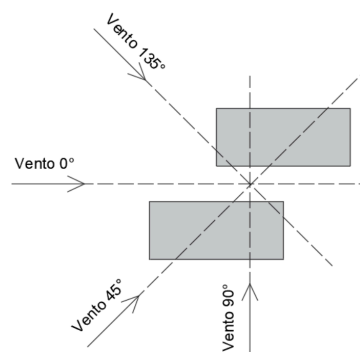


Figura 3 - Direções de atuação do vento (válido para todos os modelos. Ilustração representa a planta baixa dos modelos 7, 8, 9 e 10, para edifícios desalinhados). Fonte: Próprio autor.

O software comercial Ansys-CFX foi utilizado em todas as etapas do presente estudo: modelagem da geometria, simulação, análise dos resultados e pós-processamento. Segundo Arroyo, Lahr e Christoforo (2023), qualidade da malha é essencial para garantir precisão, convergência dos resultados e eficiência computacional. Sendo assim, foi utilizada a ferramenta *ANSYS Meshing* para gerar uma malha direcionada ao *Fluent*, conforme recomendado por ANSYS User's Guide, a fim de permitir bom controle de qualidade em malhas não estruturadas.

O método adotado para geração das malhas foi Tetrahedrons, o qual é adequado para geometrias complexas e compatível com o uso de prismas (WED6) nas regiões próximas às paredes em conjunto com a combinação de elementos TET4, o que melhora a modelagem do escoamento e a precisão dos modelos de turbulência. Ademais, o método de inflação utilizado foi o Smooth Transition, que gera camadas inflacionadas de forma gradual e contínua, especialmente em regiões que não possuem limitações de espessura (como é o caso do extenso domínio dos edifícios), contribuindo para a estabilidade numérica e confiabilidade dos resultados, especialmente em domínios grandes.

Como recomendação do *ANSYS Meshing User's Guide*, foram adotados os seguintes critérios

para avaliação da qualidade da malha: Aspect Ratio com valor máximo inferior a 100 (valores ideais próximos de zero), Skewness com valor máximo inferior a 0,94 (valores ideais próximos de zero) e Orthogonal Quality com valor mínimo superior a 0,02 (valores ideais próximos de 1).

Após a geração da malha, definiram-se os parâmetros de pré-processamento, os quais influenciam diretamente a precisão e confiabilidade dos resultados numéricos, devendo representar adequadamente as condições físicas do problema.

O tempo total de simulação foi fixado em 3 s, dividido em 100 passos de tempo de 0,03 s cada. Por outro lado, o modelo de turbulência adotado foi o SST (Shear Stress Transport), que combina as vantagens dos modelos $k-\omega$ (mais preciso na região próxima às paredes, utilizando a taxa específica de dissipação de energia turbulenta, ω) e $k-\epsilon$ (mais adequado para regiões afastadas das paredes, utilizando a taxa de dissipação de energia, ϵ), conforme apresentado por Wilcox (2006). Essa escolha visa garantir maior precisão tanto nas proximidades das edificações — fundamentais para o cálculo dos coeficientes de forma — quanto nas regiões distantes, dada a ampla extensão do domínio computacional.

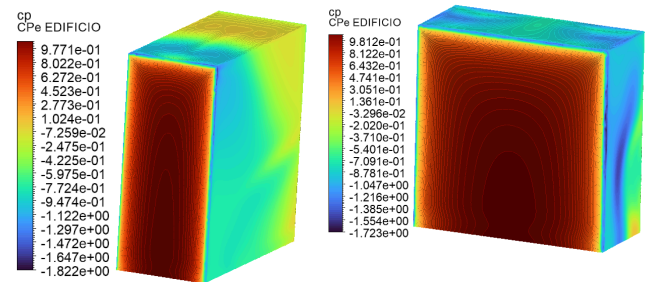
As condições de contorno consideradas foram: temperatura isotérmica de 25 °C em todo o domínio, pressão atmosférica de 1 atm e velocidade básica do vento igual a 45 m/s.

Para garantir a convergência numérica, estabeleceu-se um número máximo de 10 iterações por passo de tempo e mínimo inicial de 1 iteração, elevando-se para 3 nos casos em que a solução não apresentasse convergência. O critério de convergência adotado foi o valor do Root Mean Square (RMS) dos resíduos, considerado satisfatório quando inferior a 10^{-5} , conforme orientação do *ANSYS User's Guide*. A verificação dessa condição foi realizada por meio da análise dos gráficos de convergência para todas as equações envolvidas (continuidade e conservação de momento).

Destaca-se que a verificação da qualidade da malha foi realizada previamente à definição dos parâmetros de simulação, com o intuito de assegurar a estabilidade numérica e a confiabilidade dos resultados obtidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

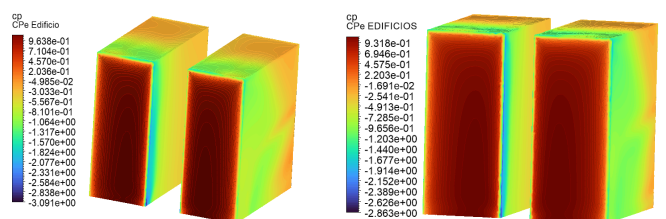
Os coeficientes de forma obtidos para os modelos 1 e 2 apresentaram boa concordância com os valores previstos na ABNT NBR 6123:2023 (tabela 6, item 6.1.1), com diferenças relativas inferiores a 11%, indicando coerência entre os resultados numéricos e a referência normativa. A figura 4 apresenta os valores obtidos:



a) Modelo 1 (vento 0°) b) Modelo 2 (vento 90°)

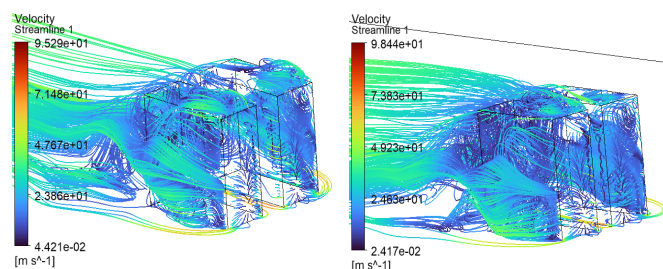
Figura 4 - Resultados obtidos para coeficientes de forma - modelos 1 e 2. Fonte: Próprio autor

Nos modelos 3 e 5, que avaliaram a influência da redução do espaçamento entre torres (vento 0°), observou-se pequena variação nos coeficientes de pressão e velocidade do vento, sendo que há pouca formação de vórtices. O modelo 5 apresentou leve aumento na velocidade máxima e redução nos coeficientes de sucção nas regiões de estrangulamento do fluxo, caracterizando o Efeito Venturi. Ou seja, pela figura 5 é possível notar que o maior coeficiente de sucção (entre estes dois modelos) foi registrado no modelo 3, apesar de o modelo 5 apresentar maior zona de sucção. Também, a diferença relativa em relação à norma (item 6.4.4) atingiu cerca de 27%, valores consideráveis. A figura 5 representa os valores de coeficiente de forma para ambos os modelos, enquanto que a figura 6 representa as linhas de fluxo do escoamento.



a) Modelo 3 (esp. de 8 m) b) Modelo 5 (esp. de 5 m)

Figura 5 - Resultados obtidos para coeficientes de forma - modelos 3 e 5. Fonte: Próprio autor



a) Modelo 3 (esp. de 8 m) b) Modelo 5 (esp. de 5 m)

Figura 6 - Resultados obtidos para linhas de fluxo - modelos 3 e 5. Fonte: Próprio autor

Na comparação entre os modelos 4 e 6 (espaçamentos de 8 m e 5 m), observou-se que a redução do espaçamento pouco influenciou tanto na velocidade do vento quanto nos coeficientes de pressão. Contudo, foi evidente o efeito de vizinhança deflexão do vento na vertical, já que a velocidade máxima em ambos os modelos foi superior quando comparado aos modelos 3 e 5 (vento 0°), havendo ligeiro aumento da velocidade no modelo 6. Observou-se, também, que o edifício à barlavento protege o edifício à sotavento, contrariando a previsão da norma. Como resultado, foram observadas diferenças relativas de até 169% (comparação com a referência normativa) nos coeficientes de pressão, com ocorrência de sucção onde se esperava sobrepressão (face de barlavento do edifício à sotavento). A figura 7, a seguir, ilustra estes resultados:

Por outro lado, o modelo 7 apresentou valores de velocidade máxima do vento e coeficientes de pressão máximos e mínimos próximos aos modelos 3 e 5, possuindo similaridade, também, nas linhas de fluxo. Contudo, foi notável inferir que o deslocamento de um edifício causou alterações nos coeficientes de pressão esperados. Mais especificamente, foram obtidos coeficientes de sobrepressão nas faces de estrangulamento do fluxo, diferentemente dos coeficientes de sucção dos modelos 3 e 5 (figura 5). Esse fato se deve à turbulência na esteira, com elevadas variações de pressão na região turbulenta e fluxo de vento caótico. Tal representação está contida na figura 8.

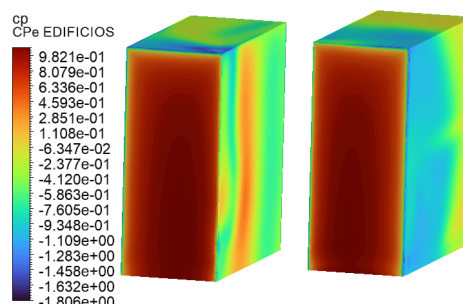
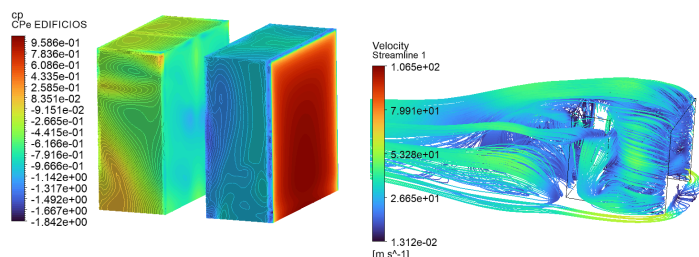


Figura 8 - Variação dos coef. de forma - modelo 7. Fonte: Próprio autor

Ademais, o modelo 8 apresentou a particularidade de haver coeficientes de sucção e sobrepressão atuando juntamente na face de barlavento do edifício à sotavento, ou seja, o deslocamento do edifício à barlavento gerou uma região protegida e outra desprotegida na mesma face do segundo edifício, além de promover perturbações no escoamento e, conseqüentemente, amplificar a formação de vórtices. Tal fato tende a gerar esforços de torção no mesmo. Dessa forma, a diferença relativa entre os valores recomendados pela NBR 6123:2023 e os valores obtidos foram superiores a 110%. A figura 9 evidencia a existência de coeficientes de sucção e sobrepressão na mesma face do edifício para o modelo 8:



a) Coeficientes de pressão b) Linhas de fluxo

Figura 7 - Resultados obtidos - modelo 4. Fonte: Próprio autor

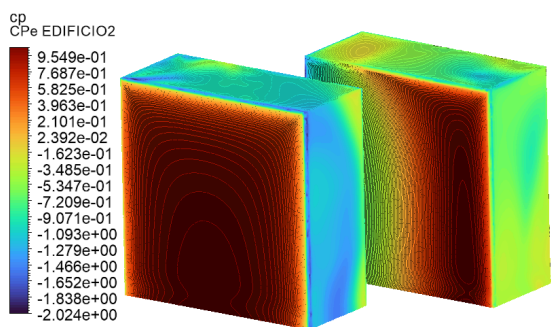
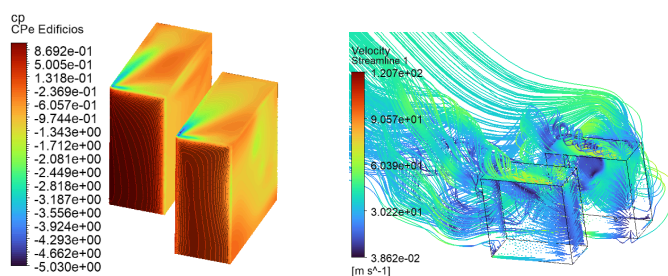


Figura 9 - Coeficientes de sucção e sobrepressão (modelo 8). Fonte: Próprio autor

Os modelos de vento inclinado (9 e 10) possuíam valores de coeficiente de pressão nas paredes (tanto sucção quanto sobrepressão) inferiores aos modelos com vento 0° e 90°, indicando que não são os casos críticos a serem analisados no dimensionamento (nesta situação). Entretanto, foi possível observar que na cobertura do edifício houve valores agressivos de coeficientes de sucção devido à formação de vórtices, fator não representativo em nenhum modelo de vento 0° e 90°. Ademais, devido à inclinação do vento, houve aumento da velocidade do mesmo, uma vez que foi observado novamente o efeito de deflexão do vento na vertical. A figura 10 - a) evidencia os valores de coeficiente de pressão para o modelo 10 e a figura 10 - b) mostra a formação do vórtice responsável por ocasionar valores agressivos de coeficiente de sucção:



a) Coeficientes de pressão b) Linhas de fluxo

Figura 10 - Resultados obtidos - modelo 10. Fonte: Próprio autor

Por fim, a figura 11 evidencia o gráfico de convergência RMS para o mesmo modelo supracitado (ressalta-se que a convergência foi alcançada para todos os modelos):

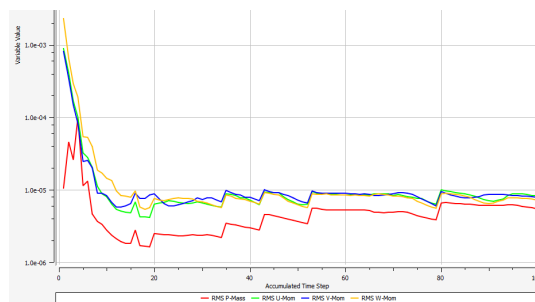


Figura 11 - Gráfico de Convergência (modelo 10).
Fonte: Próprio autor

CONCLUSÕES:

Como conclusões pode-se perceber que as condições de vizinhança interferem diretamente nos esforços gerados pelo vento, tanto pelos efeitos majoritariamente conhecidos (venturi, deflexão do vento na vertical e turbulência na esteira) quanto pelo simples fato de deslocar uma torre ou inclinar a direção de atuação do vento. Logo, é visível a importância de estudos especiais para a determinação correta dos efeitos, sendo a modelagem numérica utilizando o Método dos Volumes Finitos um método promissor e altamente efetivo para garantir tais necessidades com segurança e precisão.

BIBLIOGRAFIA:

- ARROYO, Felipe N.; LAHR, Francisco A. R.; CHRISTOFORO, André L. *Influência do tamanho da malha em simulações numéricas via elementos finitos*. Revista Internacional de Ciências, vol. 12, n. 2, p. 95–107, jan. 2023.
- NEGRI, J. F. G. (2017). *Efeitos de vizinhança nas ações do vento em edifícios com cobertura em duas águas*. Dissertação de Mestrado, (FECFAU - Unicamp), 2017.
- ANSYS Inc. *ANSYS Meshing User's Guide – Release 2024 R1*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2024. nsyshelp.ansys.com. Acesso em: 15 jul. 2025.
- WILCOX, David C. *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd ed. La Cañada, California: DCW Industries, 2006.
- ABNT NBR 6123:2023 – *Forças devidas ao vento em edificações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, dez. 2023. 95 p.
- Pitta J.A.A. (2002). *Ações Devidas ao Vento em Edificações*, UFSCar, São Carlos.