# Avaliação computacional do efeito de vizinhança na ação do vento em edificações

Computational evaluation of neighborhood effect on wind loads on buildings

Matheus Borges Seidel Geraldo José Belmonte dos Santos José Mário Feitosa Lima

### Resumo

Diversos estudos na Engenharia do Vento (EV) que calculam as pressões de vento sobre estruturas mostram que a presença de edificações vizinhas podem modificar sensivelmente as ações aplicadas nas edificações. Nesse sentido, o presente trabalho propõe analisar o efeito de vizinhança em edificações por meio do cálculo dos coeficientes de pressão, considerando diferentes configurações de posicionamentos e distâncias. O programa ANSYS foi usado para a modelagem computacional e os resultados encontrados foram comparados com os fornecidos em norma de projeto e trabalhos publicados por outros pesquisadores. A análise dos resultados ratifica a validade da utilização das ferramentas computacionais na previsão das cargas de vento, confirmando que, embora a vizinhança de edificações, em muitos casos reduza as ações do vento, em outros amplifica seus efeitos, exigindo dos engenheiros cautela e imaginação ao definir qual vizinhança deve considerar na avaliação de estruturas esbeltas sob carga de vento.

# Abstract

Several studies in Wind Engineering (WE) that calculate wind pressures on structures show that the presence of neighboring buildings can significantly modify the loads applied on buildings. Thus, the present work proposes to analyze the neighborhood effect in buildings by calculating pressure coefficients, considering different configurations. The ANSYS program was used for computational modeling and the results found were compared with those provided in the Brazilian wind loading code and publications of other researchers. The comparison of the results shows the validity of the use of computational tools in the prediction of wind loads, confirming that, although the neighborhood of buildings, in many cases reduces the actions of the wind, in others it amplifies its effects, demanding from the engineers caution and imagination when defining which neighborhood to consider in the evaluation of the wind effects on slender structures.

Palavras-chave: Engenharia do vento computacional / Efeito de vizinhança / / Ação do vento / Coeficientes de pressão Keywords: Computational wind engineering / Neighborhood effects / Wind loads / Pressure coefficients

### Matheus Borges Seidel

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Estadual de Feira de Santana Feira de Santana, Brasil matheusbseidel@outlook.com

### Geraldo José Belmonte dos Santos

Professor / Doutor Universidade Estadual de Feira de Santana Feira de Santana, Brasil belmonte@uefs.br

### José Mário Feitosa Lima

Professor / Doutor Universidade Estadual de Feira de Santana Feira de Santana, Brasil jmflima@uefs.br

### Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

#### Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SEIDEL, M. [*et al.*] – Avaliação computacional do efeito de vizinhança na ação do vento em edificações. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 16. ISSN 2183-8488. (julho 2021) 39-50.

# 1 Introdução

O adensamento e a conseguente verticalização das edificações nos centros urbanos é uma tendência marcante nas últimas décadas e tem suscitado estudos na área da aerodinâmica, pois, com o aumento da altura dos edifícios, cresce também a preocupação com os efeitos do vento sobre os mesmos. Estruturas modernas, esbeltas, leves e flexíveis, em contraste com edificações antigas tipicamente baixas e rígidas, são particularmente sensíveis aos efeitos do vento. No cálculo das pressões de vento nas estruturas é também relevante considerar a vizinhança onde o edifício analisado está inserido. A influência de construções lindeiras é particularmente importante no contexto atual de grandes centros urbanos altamente densos, onde a silhueta urbana influi na forma como o vento atua na região. Autores como Blessmann (1992) [1], Kim, Tamura e Yoshida (2015) [2] e Vieira, Brito e Loredo-Souza (2018) [3] mostram que, ao contrário do que pode parecer intuitivo, a presença de edifícios vizinhos pode oferecer efeitos desfavoráveis nas ações de vento sobre uma estrutura, a exemplo de aumento nos coeficientes de torção e inversão no sentido da ação do vento (de sobrepressão para sucção).

O estudo dos efeitos do vento nas edificações deu origem à chamada Engenharia do Vento (EV), que trata do comportamento do escoamento de ar com estruturas nele imersos. A EV, sendo um ramo relativamente novo da engenharia, encontra-se em pleno desenvolvimento. Tradicionalmente, os trabalhos em EV utilizaram--se de ensaios físicos em túneis de vento que simulam a ação do vento em estruturas reais, através de modelos reduzidos submetidos a ventos artificiais [4], tratando-se, porém, de uma estratégia onerosa pela pequena disponibilidade de laboratórios com tais recursos. Apesar disso, autores como Khanduri, Stathopoulos e Bédard (1998) [5], Núñez, Loredo-Souza e Rocha (2012) [6] afirmam que túneis de vento são a melhor ferramenta disponível para o cálculo de cargas de vento. Outras fontes, como Stathopoulos (1997) [7] e Awruch, Braun e Greco (2015) [8], evidenciam que esses ensaios não são isentos de erros e, portanto, não devem ter seus resultados recebidos como dogmaticamente inquestionáveis.

A partir de ensaios em túnel de vento, foi elaborada a NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações [9], que estabelece um método simplificado para cálculo das cargas de vento em estruturas. Apesar de sua validade, a própria Norma reconhece sua limitação e sugere estudos adicionais para edificações fora do comum [10].

Nesse contexto, o avanço da computação científica deu origem à chamada Engenharia do Vento Computacional (EVC), que utiliza ferramentas computacionais para, através de modelagens e simulações numéricas, resolver problemas da EV [11]. Assim, diante das limitações dos túneis de vento e da aplicação de normas, a EVC tem se apresentado como uma alternativa viável para calcular a carga de vento em estruturas esbeltas, de geometria não simétrica ou com vizinhanças que induzam carregamentos de difícil avaliação. Diversos trabalhos como Tutar e Oguz (2007) [12], Awruch, Braun e Greco (2015) [8], Blocken, Stathopoulos e Beeck (2016) [13], Gunawardena et al. (2017) [14], Bairagi e Dalui (2018) [15] e Mukherjee e Bairagi (2018) [16] têm demonstrado a validade e confiabilidade dos resultados da EVC.

Nesta perspetiva, o presente trabalho objetiva avaliar a interferência da vizinhança nas pressões exercidas pelo vento em uma determinada edificação por meio de modelagens numérico-computacionais feitas através do módulo Fluid Flow (Fluent) do *software* Ansys Workbench. A ferramenta computacional utilizada realiza a discretização das equações de Navier-Stokes, associadas a um modelo de turbulência, por meio do método dos volumes finitos.

# 2 Modelagem matemática do vento

As expressões matemáticas fundamentais utilizadas na modelagem e simulação do escoamento de vento na EVC são apresentadas a seguir.

### 2.1 Equações de escoamento do ar atmosférico

O sistema de equações que governa a dinâmica do vento é definido pelas equações de Navier-Stokes (baseadas na conservação do momento linear) e pela equação de conservação da massa, conforme mostrado nas equações (1) e (2), respectivamente, considerando o escoamento isotérmico:

$$\rho \vec{g} - \nabla P + \mu \Delta \vec{v} + \lambda \nabla (div\vec{v}) = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}$$
(1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div \left(\rho \vec{v}\right) = 0 \tag{2}$$

onde  $\rho$  é a massa específica do ar atmosférico;  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade; P é a pressão estática do fluido;  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do ar atmosférico;  $\lambda$  é a viscosidade volumétrica (considerada no escoamento compressível);  $\vec{v}$  é o vetor velocidade do escoamento; e *t* é o instante de tempo.

O sistema de equações supracitado ainda pode ser simplificado se o vento for considerado como incompressível, como pode ser considerado para todas as velocidades de projeto utilizadas no Brasil [10], onde o número de Mach (*Ma*) é tal que *Ma* < 0,15. Nesse caso, a massa específica é considerada aproximadamente constante e, consequentemente, a Equação (2) é reduzida a div $(\vec{v}) = 0$ . Assim, desprezando variações de temperatura o problema de escoamento de fluidos fica estabelecido com 4 incógnitas e 4 equações: 3 componentes de velocidade e uma componente de pressão.

# 2.2 Modelos de turbulência

A turbulência presente no vento natural é um fenômeno caótico que ocorre em um longo espectro de escalas geométricas; assim, a realização de uma análise determinística torna-se impraticável, fazendo-se necessária a adoção de modelos matemáticos que simulem a turbulência do escoamento real. São os modelos de turbulência que viabilizam a solução de problemas na EVC, possibilitando simular fenômenos aerodinâmicos em todas as escalas, e reproduzir o comportamento do vento real sem utilizar um número de elementos excessivamente elevado, que inviabilize a solução [17]. No presente trabalho, é utilizado o modelo de turbulência de Simulação de Grandes Escalas, conhecido como LES (*Large Eddy Simulation*), por mostrar-se mais adequado ao objetivo proposto, conforme afirmam Murakami (1997) [18], Stathopoulos (1997) [7], Braun (2007) [11] e Awruch, Braun e Greco (2015) [8].

O modelo LES é baseado no conceito de cascata de energia, que modela o escoamento turbulento como uma superposição de vórtices, o que é adequado para altos números de Reynolds. Os vórtices maiores retiram energia do escoamento principal e transferem-na para vórtices de uma escala menor, que por sua vez transportam a energia para vórtices de uma escala ainda menor, de forma sucessiva, até chegar em uma escala pequena o suficiente onde a energia possa ser absorvida pelas forças viscosas do fluido. As grandes escalas no modelo são resolvidas através das equações de Navier-Stokes, alteradas por um processo de filtragem espacial, tais que as variáveis envolvidas tornam-se uma espécie de média. Além disso, as equações sofrem uma alteração onde a viscosidade  $\mu$ é substituída por  $\mu + \mu_r$ , sendo  $\mu$ , dada pela equação (3).

$$\mu_t = \rho C_s \Delta^2 |D| \tag{3}$$

$$D = \frac{1}{2} \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{T} \right) \tag{4}$$

onde a viscosidade turbulenta  $\mu_i$  é obtida usando algum modelo de escala submalha;  $C_s$  é uma coeficiente dinâmico;  $\Delta$  é a dimensão característica; D é o tensor taxa de deformação e |D| é o módulo do tensor D. As menores escalas (inferiores aos elementos da malha) devem ser resolvidas por um modelo de submalha. O modelo de submalha aqui utilizado é o modelo de Smagorinsky-Lily, que é tipicamente adequado para problemas de EVC. Maiores detalhes e as equações que descrevem os termos da Equação (3) podem ser encontrados em Braun (2007) [11].

# 2.3 Interação fluido-estrutura

As simulações de cargas aerodinâmicas em edificações civis constituem um problema de interação fluido-estrutura (FSI, na sigla em inglês), o qual pode ser resolvido de duas formas: uma via (FSI *one way*), com acoplamento das equações de fluido e de estruturas apenas num sentido, ou duas vias (FSI *two way*), com as equações duplamente acopladas.

A análise FSI *one way* considera a simulação do fluido e da estrutura de maneira independente, analisando-se primeiro o escoamento do fluido, em torno da estrutura rígida e procedendo com a transferência do campo de pressões para a simulação da estrutura. Esta análise, que considera a estrutura rígida durante a atuação do fluido, também é chamada de simulação aerodinâmica e tende a apresentar custo computacional reduzido em relação à simulação FSI *two way* do mesmo problema.

Na análise FSI *two way* realiza-se a simulação do fluido e da estrutura de maneira interdependente ou totalmente acoplada. O escoamento do fluido provoca cargas na estrutura que, por isso, sofrerá deformações e, por sua vez, modificará o domínio do fluido interferindo no seu escoamento. Este procedimento de interferência

mútua é analisado em cada passo de tempo da simulação e tende a exigir um esforço computacional bastante elevado. Este tipo de análise também é chamada de simulação aeroelástica e implica em transferência de dados do fluido para a estrutura e também da estrutura para o fluido.

# 2.4 Vento natural

O vento natural é definido pela movimentação de massas de ar e possui perfil de velocidades médias crescente com a altura dentro da chamada camada limite atmosférica (CLA). A CLA é a região da troposfera que é afetada pela superfície da Terra, seja natural ou de origem antrópica, com altura variável em função das particularidades de cada local. De acordo com Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004) [19], o perfil vertical do vento natural pode ser dado matematicamente por uma lei de potência, como a seguir:

$$\frac{\vec{v}(z)}{\vec{v}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}}\right)^{\rho}$$
(5)

onde z é a altura em análise;  $z_d$  é a altura da subcamada sobre a superfície;  $z_{ref}$  é altura de referência;  $\vec{v}(z)$  é a velocidade média na altura z; e p é um parâmetro que varia de 0,11 (para locais planos) até 0,34 (para centros urbanos com edificações altas).

### 2.5 Coeficientes aerodinâmicos

De acordo com Núñez, Loredo-Souza e Rocha (2012) [6], coeficientes aerodinâmicos são a forma mais básica para analisar o comportamento aerodinâmico de uma estrutura submetida a escoamento de ar. Esses coeficientes são utilizados nas normas de vento (que no Brasil é a NBR 6123) e são expressos matematicamente na equação:

$$F = C \cdot q \cdot A_e \tag{6}$$

onde *F* é a força resultante na estrutura; C é o coeficiente aerodinâmico em análise; q é a sobrepressão num ponto de estagnação (dado pela equação de Bernoulli); e  $A_e$  é a área efetiva (projeção da face da edificação afetada pelo vento).

Nas normas de vento os coeficientes C são obtidos em tabelas e ábacos e, então, as forças e momentos são calculados. No caso de ensaios numéricos (ou, semelhantemente, em túnel de vento), as forças e momentos são obtidos como um resultado da análise e os coeficientes podem, assim, ser determinados. Assumindo a referência da Figura 1, os coeficientes são calculados pelas equações (7) e (8):

$$CF_{x} = \frac{F_{x}}{q \cdot HW}; CF_{y} = \frac{F_{y}}{q \cdot HL}; CF_{z} = \frac{F_{z}}{q \cdot WL}$$
(7)

$$CM_{x} = \frac{M_{x}}{q \cdot H^{2}L}; CM_{y} = \frac{M_{y}}{q \cdot H^{2}W}; CM_{z} = \frac{M_{z}}{q \cdot HWL}$$
(8)

onde  $F_i$  e  $M_i$  são a força e o momento resultantes na direção i, respectivamente, tomando-os como somatório de todos os nós do domínio da estrutura.



Figura 1 Determinação dos coeficientes. Fonte Braun (2007) [11] (adaptado)

# 3 Ensaios de validação

Para a solução das equações de escoamento de fluidos, foi utilizado o módulo Fluid Flow (Fluent), baseado no método dos volumes finitos, que faz parte do *software* Ansys. Inicialmente, foram realizadas simulações para avaliação e ajuste do Fluent, considerando experimentos já realizados e publicados por outros autores. As simulações foram escolhidas em nível crescente de complexidade e são descritas a seguir.

# 3.1 Cilindro bidimensional $\Re e = 10^3$

O primeiro exemplo analisado foi o de um cilindro de 1,0 metro de diâmetro submetido ao escoamento bidimensional de um fluido viscoso com número de Reynolds igual a 10<sup>3</sup>. A Figura 2 mostra a geometria do problema e sua respectiva malha. A face AC foi definida como a entrada do fluido com velocidade uniforme e a face BD foi definida como a saída com pressão relativa nula. As faces AB e CD foram definidas como paredes com condição de contorno de deslizamento livre (cisalhamento nulo). A superfície do cilindro foi modelada como uma parede rígida com condição de não deslizamento. As propriedades do escoamento são: massa específica do ar atmosférico 1,0 kg/m<sup>3</sup>, viscosidade dinâmica 0,01 Ns/m<sup>2</sup>, velocidade de entrada 10,0 m/s, dimensão característica (diâmetro) 1,0 m, e passo de tempo 1,8 x 10<sup>-3</sup>s.



Figura 2 Cilindro 2D. Dimensões em metros

Para verificação da modelagem, foram calculados os coeficientes de pressão  $C_p$  no perímetro do cilindro e comparados (ver Figura 3) por aqueles obtidos por Braun (2007) [11] e por meio da norma brasileira NBR 6123. Vale salientar que os coeficientes de pressão foram calculados como valores médios ao longo do tempo de escoamento. Cabe observar nesses resultados que Braun (2007) [11] utilizou dois

métodos numéricos, explícito-iterativo e explícito de 2 passos, que conduziram a resultados diferentes.



Figura 3 Coeficientes de pressão médios em torno do cilíndro com  $\Re e = 10^3$  medidos a partir do ponto de estagnação a barlavento (0°)

A análise dos coeficientes de pressão mostra um pico de diferença de 17% entre os valores do presente trabalho e aqueles obtidos por Braun (2007) [11] (também com  $\Re e = 10^3$ ) na região de maior sucção, em aproximadamente 75°, o que resulta dos diferentes procedimentos matemáticos adotados; nas demais regiões, verifica--se boa concordância entre os coeficientes. No caso da NBR 6123, constatou-se discordâncias consideráveis na região entre 110° e 250°; sendo que tais divergências podem ser explicadas, dentre outras coisas, pela grande diferença no número de Reynolds do presente trabalho para aquele considerado na Norma, que é superior a 4,2. 10<sup>5</sup>. Para maiores detalhes, consultar Seidel (2020) [20].

### 3.2 Viga entre dois condutos

O caso de dois condutos forçados, analisado por Menter *et. al.* (2006) [21], separados por uma viga submetida às pressões exercidas pelo fluido (nas faces inferior e superior), foi analisado utilizando interação fluido-estrutura *one way* de forma estática. A Figura 4 a) mostra o domínio do fluido e sua respectiva malha de volumes finitos.

O conduto superior possui 2,0 cm de altura, o inferior 4,0 cm de altura e a viga (indicada em cinza) possui 75,0 cm de comprimento.

As faces à esquerda foram definidas para a entrada do fluido com velocidade uniforme e a face à direita é a saída com pressão relativa nula. As demais faces no plano XY foram modeladas com condição de contorno de não deslizamento. A análise foi implementada utilizando elementos tridimensionais, com 1,0 cm de espessura, e impondo-se uma condição de simetria ao longo de Z. A massa específica do fluido utilizado foi igual a 997,0 kg/m<sup>3</sup>, a viscosidade dinâmica igual a 8,899 × 10<sup>-4</sup> Ns/m<sup>2</sup> e a velocidade de entrada igual a 0,008 m/s. As Figuras 4 b) e c) mostram os campos de velocidade e pressão em torno da viga, respectivamente.

Na análise de interação fluido-estrutura (*one way*), as pressões obtidas na simulação do fluido foram importadas para o *plugin* Static Strucutral do Ansys, onde foi feita a análise estrutural da viga. O módulo de elasticidade longitudinal do material da viga foi tomado igual a  $2 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup> e o coeficiente de Poisson foi igual a 0,3. A viga foi engastada na face da extremidade esquerda e foram calculadas suas deflexões ao longo do comprimento, considerando-a como um elemento de elasticidade tridimensional. A Figura 5 mostra os resultados obtidos, incluindo a solução analítica do problema desenvolvida por Wang (1999) [22].

Como pode-se perceber, a geometria dos condutos faz surgir um gradiente de pressão que, quando transferido para a viga, tende a deformá-la para baixo. Fenômeno semelhante acontece em edificações devido à vizinhança. Os deslocamentos obtidos apresentaram boa concordância, com uma diferença máxima na extremidade da viga de 5% entre o presente trabalho e o de Menter et. al (2006) [21].



Figura 5 Deslocamentos ao longo do comprimento da viga



Figura 4 a) Domínio do fluido em torno da viga, b) Campo de pressão, c) Campo de velocidade

### 3.3 Edifício alto isolado

Para validar o método utilizado neste trabalho aplicado a um caso tridimensional, foi replicada a análise de um edifício vertical isolado realizada por Braun (2007) [11]. O autor utilizou o código implementado em sua tese de doutorado e validou seus resultados com Akins, Peterka e Cermak (1977) [23]. A Figura 6 apresenta a geometria do edifício e do domínio do fluido.



Figura 6 Características geométricas do escoamento. Fonte: Braun (2007) [11] (adaptado)

A face à esquerda do domínio do fluido consiste na entrada do escoamento e a face à direita em uma saída livre com pressão relativa nula. Os limites laterais e superior do domínio do fluido foram modelados como condições de contorno com livre deslizamento, o que simula a situação do edifício em um local aberto, como de fato acontece na edificação real. O limite inferior (solo) e as paredes do edifício foram modeladas como faces de deslizamento nulo, onde a velocidade tangencial do fluido no contato é nula. O vento na entrada foi modelado pela lei de potência já apresentada anteriormente na equação (5) com p = 0,34.

A malha de volumes finitos utilizada teve 42.139 nós e 231.274 elementos. Após alguns testes realizados, verificou-se possível diminuir o volume de controle utilizado por Braun (2007) [11] sem prejuízo dos resultados da análise. Ao invés de utilizar 1.530 m na direção x (conforme Figura 6), utilizou-se 930 m, o que tornou a análise mais rápida.

O Quadro 1 apresenta as propriedades do escoamento simulado replicadas de Braun (2007) [11] e Akins, Peterka e Cermak (1977) [23]. Para modelagem da turbulência, utilizou-se o modelo LES e o modelo de submalha Smagorinsky-Lily com  $C_s = 0,1$ .

Quadro 1 Propriedades do escoamento

Massa específica	1,25 kg/m³
Viscosidade dinâmica	6,96 × 10 <sup>-3</sup> Ns/m²
Velocidade de entrada	27,56 m/s
Dimensão característica (lado do edifício)	30,0 m
Passo de tempo	5,0 × 10⁻³ s

O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos neste trabalho e aqueles utilizados para validação. Na comparação, também foram

incluídos os coeficientes de força obtidos pela NBR 6123, embora a norma estabeleça coeficientes com base na ação estática do vento. Os coeficientes de momento não são dados pela norma, portanto, só foram considerados coeficientes de força. Os índices dos coeficientes (x, y e z) estão de acordo com os eixos de referência dados na Figura 6.

	Ouadro 2	2 Coeficiente	s médios de	forca e	e momento
--	----------	---------------	-------------	---------	-----------

	Presente trabalho	Braun (2007) [11]	Akins, Peterka e Cermaj (1977) [23]	NBR 6123
CFz	1,435	1,407	1,457	1,4
CFy	1,178	1,340	1,266	0,8
CF <sub>x</sub>	- 0,047	- 0,012	- 0,009	0,0
СМ <sub>у</sub>	0,011	0,024	0,000	NA
CM <sub>z</sub>	0,018	0,000	0,000	NA
CM <sub>x</sub>	- 0,824	- 0,874	- 0,829	NA

Os coeficientes calculados mostram boa concordância com os resultados dos demais autores, sendo que as maiores diferenças relativas foram verificadas nos coeficientes que possuem valor nulo ou próximo de nulo. Os coeficientes da norma na direção do escoamento  $(CF_x)$  e na direção transversal ao mesmo  $(CF_y)$  mostraram-se coerentes com os demais resultados, porém divergências consideráveis, em torno de 50%, foram identificadas no coeficiente de força vertical  $(CF_z)$ , o que evidencia a limitação da norma e a necessidade de estudos mais aprofundados.

### 3.4 Edifício com vizinhança

Neste exemplo foi realizada a simulação de um edifício vertical sob a influência de um edifício vizinho a barlavento, possuindo ambos a mesma geometria. A Figura 7 apresenta a disposição dos dois edifícios e suas respectivas dimensões em milímetros (sendo o modelo analisado indicado pela hachura). O problema foi estudado por Fontes (2003), que determinou os coeficientes de arrasto através de ensaios em túnel de vento do modelo em escala 3/1000 de um edifício real, localizado na cidade São Paulo-SP com dimensões 25,15 m  $\times$  15,15 m de base e altura de 60,0 m.

O vento na entrada foi modelado pela lei de potência já apresentada anteriormente, Equação (5), com p = 0,34. As propriedades adotadas para o escoamento por Fontes (2003) [24] são: massa específica 1,225 kg/m<sup>3</sup>, viscosidade dinâmica 1,79 × 10<sup>-4</sup> Ns/m<sup>2</sup>, velocidade de entrada 27,82 m/s e passo de tempo 5,0 × 10<sup>-3</sup> s. Para modelagem da turbulência, utilizou-se o modelo LES e o modelo de submalha Smagorinsky-Lily com  $C_s = 0,1$ .

O Quadro 3 apresenta a comparação dos resultados obtidos neste trabalho através do Ansys com aqueles obtidos experimentalmente por Fontes (2003) [24] para incidência do vento nas direções indicadas na Figura 7.

Avaliação computacional do efeito de vizinhança na ação do vento em edificações Matheus Borges Seidel, Geraldo José Belmonte dos Santos, José Mário Feitosa Lima

#### Quadro 3 Coeficientes médios de força na direção do escoamento



Figura 7 Disposição e geometria dos edifícios

A comparação dos coeficientes de força na direção do escoamento mostra uma concordância exata para incidência do vento a 0° (considerando-se duas casas decimais) e uma diferença de 22% para incidência do vento a 90° que, apesar de ser uma divergência não desprezível, mantém os dois valores na mesma ordem de grandeza e mostra uma concordância razoável. Como esperado, o coeficiente para vento a 0° foi negativo, resultado da sucção na fachada a barlavento devido à zona de baixa pressão na esteira do edifício vizinho, enquanto o coeficiente para vento a 90° foi positivo devido ao impacto direto do escoamento de ar sem obstáculos que gerou sobrepressão a barlavento.

# 4 Ensaios e resultados

#### 4.1 Edifício isolado

Um edifício prismático de dimensões 15,0 m × 10,0 m × 60,0 m foi simulado de forma isolada para posteriormente ser submetido a efeitos de vizinhança. O volume de controle considerado na análise está representado na Figura 8, onde também estão indicados os eixos coordenados do problema e a face de entrada do vento (à esquerda na imagem). As faces laterais e superior do volume de controle foram consideradas como paredes de deslizamento livre, simulando a condição da estrutura em local aberto. As faces inferior (solo) e as paredes do modelo foram consideradas como faces de não deslizamento, onde a velocidade tangencial no contato é nula.

Novamente, o vento na entrada foi modelado pela lei de potência da Equação (5) com p = 0,34 e, para modelagem da turbulência, utilizou-se o modelo LES e o modelo de escala da submalha Smagorinsky-Lily com  $C_s = 0,1$ . As propriedades do escoamento simulado são: massa específica 1,225 kg/m<sup>3</sup>, viscosidade dinâmica 1,79 × 10<sup>-4</sup> Ns/m<sup>2</sup>, velocidade de entrada 30,00 m/s e passo de tempo 5,0 × 10<sup>-3</sup> s.





A simulação do escoamento sobre o edifício isolado foi feita tanto no modelo aerodinâmico (*one way*), quanto no modelo aeroelástico (*two way*), para fins de comparação dos resultados. Na análise *two way* foi utilizado, além do *plugin* Fluid Flow (Fluent), o *plugin* Transient Structural, que simulou o comportamento estrutural, e o System Coupling, que fez o acoplamento dos módulos de estrutura e fluido. Para modelagem mecânica do edifício foram utilizados os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade  $3 \times 10^6$  Pa, coeficiente de Poisson 0,20, massa específica 2.300 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de amortecimento 0,10.

O Quadro 4 apresenta os coeficientes médios de força e momento obtidos nas duas análises, além dos coeficientes de força previstos pela NBR 6123. Os índices dos coeficientes (x, y e z) são dados de acordo com os eixos de referência da Figura 8.

	Quad	ro 4	Coe	ficientes	médios	de	força	e m	iomento	
--	------	------	-----	-----------	--------	----	-------	-----	---------	--

	One way	Two way	NBR 6123
CFz	0,881	0,957	1,1
$CF_y$	0,452	0,357	0,7
CF <sub>x</sub>	0,002	0,052	0,0
СМ <sub>у</sub>	0,005	0,071	NA
CMz	0,009	0,236	NA
CM <sub>x</sub>	- 0,485	- 0,509	NA
CF <sub>x</sub> CM <sub>y</sub> CM <sub>z</sub> CM <sub>z</sub>	0,002 0,005 0,009 - 0,485	0,052 0,071 0,236 – 0,509	0,0 NA NA NA

Como pode-se verificar, os resultados obtidos nas análises one way e two way possuem, em geral, a mesma ordem de grandeza, tendo a diferença máxima absoluta inferior a 0,1, com exceção do coeficiente CM, As diferenças relativas não foram consideradas para evitar interpretações errôneas nos casos dos coeficientes com valores próximos de zero (e.g. CF, e CM), os quais estão naturalmente suscetíveis a altas diferenças percentuais que não levam a consequências relevantes a serem consideradas na análise. Nesse caso, o coeficiente de arrasto CF,, obtido por meio das forças na direção do escoamento, mostrou uma divergência inferior a 0,08 em valores absolutos, equivalente a aproximadamente 8% em valores relativos. A maior diferença relevante verificou-se no coeficiente CM, que expressa a deformação da estrutura na direção transversal ao escoamento (flexão em torno do eixo de escoamento z). Esta diferença justifica-se pelo acoplamento do movimento transversal da estrutura com o desprendimento de vórtices nas arestas laterais do edifício. Embora a diferença nestes resultados deva ser relevante em estruturas mais flexíveis e que apresentem deslocamentos maiores, não provocou grandes alterações no modelo aqui estudado.

Pela diferença no procedimento numérico entre os dois tipos de simulação, sabe-se que a análise one way é computacionalmente mais leve e rápida do que a two way. Em testes realizados, verificou-se que a simulação two way leva mais do que 15 vezes o tempo necessário para a simulação one way do ensaio com todos os parâmetros mantidos constantes. A partir destas considerações, optou-se por prosseguir os ensaios e análises com o modelo aerodinâmico ao invés do aeroelástico. Na comparação dos coeficientes de força da norma com os da análise one way, foi verificado que o coeficiente na direção do escoamento  $(CF_{1})$  apresentou uma diferença de 22% e o coeficiente na direção transversal ao escoamento (CF.) foi igual ao da simulação numérica até a segunda casa decimal; assim como na simulação da secção 3.3, a maior diferença encontrada foi no coeficiente de força vertical (CF,), onde a divergência foi de 55%. A Figura 9 mostra o campo de pressão e as linhas de corrente do ensaio realizado.

# 4.2 Edifício com vizinhança

Após ser concluída a análise do edifício isolado, a mesma estrutura da seção 4.1 foi simulada em 9 diferentes configurações de vizinhança, apresentadas na Figura 10. Nas análises com vizinhança foram utilizados o mesmo volume de controle, perfil de vento na entrada e propriedades do escoamento da secção anterior. Assim como nos casos anteriores, foram obtidos como resultados os coeficientes médios de força e momento nas diferentes configurações de vizinhança, que são apresentados no Quadro 5.

Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a disposição qualitativa dos edifícios. As configurações IA, IB e IIA apresentaram coeficientes negativos na direção do escoamento  $(CF_z)$ , que representam a sucção na face frontal do modelo. Esta sucção é resultante da zona de baixa pressão gerada pelo edifício vizinho colocado a barlavento. Nas configurações IC, IIB, IIC, IIIA, IIIB e IIIC a zona de baixa pressão a sotavento do edifício vizinho não esteve próxima o suficiente do edifício modelo para provocar sucção; nestas condições, verificou-se apenas uma diminuição na intensidade da sobrepressão.



Figura 9 a) Campo de pressão vertical no plano de simetria, b) campo de pressão horizontal em y = 30,0m, c) linhas de corrente no plano vertical no eixo de simetria e d) linhas de corrente no plano horizontal em y = 30,0m

#### Avaliação computacional do efeito de vizinhança na ação do vento em edificações Matheus Borges Seidel, Geraldo José Belmonte dos Santos, José Mário Feitosa Lima

Configuração IA Configuração IIA Configuração IIIA Vento > Vento Vento > 30,0 \* 10,0 60,0 ¥ Configuração IB Configuração IIB Configuração IIIB 15,0 15,0 30.0 Configuração IC Configuração IIC Configuração IIIC  $\stackrel{Vento}{\longrightarrow}$ Vento Vento --> 15,0



Quadro 5 Coeficientes médios de força e momento – Organizados pelo afastamento

Afast. 0,5H	Referência <i>One way</i>	Configuração IA	Configuração IB	Configuração IC
CFz	0,881	- 0,112	- 0,041	0,654
CF <sub>y</sub>	0,452	0,344	0,382	0,467
CF <sub>x</sub>	0,002	- 0,104	- 0,257	- 0,122
СМ <sub>у</sub>	0,005	0,003	0,033	0,099
CM <sub>z</sub>	0,009	- 0,047	- 0,119	- 0,061
CM <sub>x</sub>	- 0,485	0,076	0,053	- 0,355

Afast. 1H	Referência <i>One way</i>	Configuração IIA	Configuração IIB	Configuração IIC
CFz	0,881	- 0,038	0,325	0,575
CF <sub>y</sub>	0,452	0,407	0,08	0,560
$CF_{x}$	0,002	0,160	-0,533	0,027
СМ <sub>у</sub>	0,005	- 0,019	0,042	0,088
CM <sub>z</sub>	0,009	0,111	- 0,265	0,024
CM <sub>x</sub>	- 0,485	0,031	- 0,145	- 0,274

Afast. 1,5H	Referência <i>One way</i>	Configuração IIIA	Configuração IIIB	Configuração IIIC
CFz	0,881	0,603	0,359	0,541
$CF_y$	0,452	0,745	0,420	0,377
CF <sub>x</sub>	0,002	-0,174	0,057	0,011
СМ <sub>у</sub>	0,005	0,007	0,023	0,0532
CM <sub>z</sub>	0,009	- 0,172	- 0,015	- 0,0054
CM <sub>x</sub>	- 0,485	- 0,394	- 0,153	- 0,271

Como esperado, as configurações de vizinhança B apresentaram coeficientes de torção  $(CM_y)$  maiores do que nas configurações de vizinhança A, para os mesmos espaçamentos (I, II e III). De forma semelhante, as configurações C tiveram valores de torção superiores à configuração B, também considerando os mesmos afastamentos entre as estruturas. Este aumento decorre do desalinhamento entre os edifícios e é justificado pela excentricidade na aplicação da carga de vento no modelo nestas condições.

Além das configurações de vizinhança já apresentadas, outros 3 ensaios foram realizados aumentando-se o afastamento dos edifícios a partir da configuração A. As configurações IVA, VA e VIA foram semelhantes à configuração IA, porém com afastamento entre os edifícios igual a 120 m, 150 m e 180 m, respectivamente. Os coeficientes médios de força e momento para estas configurações são expressos no Quadro 6.

Quadro 6 Coeficientes médios de força e momento

	Referência <i>One way</i>	Configuração IVA - Afast. 2H	Configuração VA - Afast. 2,5H	Configuração VIA - Afast. 3H
CFz	0,881	0,721	0,770	0,875
CF <sub>y</sub>	0,452	0,871	0,787	0,607
CF <sub>x</sub>	0,002	0,239	0,301	0,236
СМ <sub>у</sub>	0,005	0,011	- 0,019	0,039
CM <sub>z</sub>	0,009	0,076	0,170	0,088
CM <sub>x</sub>	- 0,485	- 0,448	- 0,398	- 0,439

Para os casos de IA a VIA, os coeficientes de forca na direção do escoamento (CF,) mostram que, quanto maior a distância entre o modelo e o edifício vizinho, mais estes valores aproximam-se daqueles obtidos para o modelo em sua condição isolada. A partir dos resultados destes casos, pode-se inferir que o grau de influência do entorno na força obtida na direção do escoamento é menor quanto maior a distância entre o modelo e a vizinhança. O mesmo não pode ser afirmado para as forças nas demais direções e para os momentos, que, mesmo na condição de vizinhanca VIA, onde o afastamento é igual a 3 vezes a altura do modelo, ainda apresentam--se coeficientes distintos daqueles calculados para o modelo isolado. Em VIA, por exemplo, o coeficiente CF, que apresentava valor aproximadamente nulo na condição isolada, atingiu um coeficiente de 0,236; e o coeficiente CF, teve aumento de 34% em relação ao modelo sem vizinhança. De acordo com Blessmann (1998) [25], uma edificação pode provocar efeitos importantes a sotavento a distância de até 10 vezes sua altura.

Resultados semelhantes a estes foram encontrados por Bênia (2013) [26] através de ensaios em túnel de vento. A autora afirma que a presença de um único edifício vizinho igual ao modelo, sendo colocado a barlavento, oferece efeito de proteção, em termos da força longitudinal média (no presente trabalho expresso por  $CF_z$ ) e que este efeito diminui quando aumenta-se a distância entre as duas estruturas. Quanto às forças verificadas nas demais direções, os resultados são mais complexos e difíceis de serem sistematizados e resumidos em uma tendência clara e previsível de interferência, o que ratifica a complexidade presente nos fenômenos de vizinhança. A própria turbulência do escoamento provoca "oscilações" nos padrões de tendência dos valores obtidos em função do afastamento entre os modelos vizinhos.

Apesar de os coeficientes de força na direção do escoamento terem sido reduzidos em todos os casos de vizinhança quando comparados com o modelo isolado, a inversão de esforços (de sobrepressão para sucção) e variações consideráveis nos coeficientes de força nas demais direções são fenômenos importantes que devem ser previstos na etapa de projeto da estrutura. Portanto, ratifica-se a importância dos efeitos da vizinhança no cálculo das pressões de vento sobre uma estrutura, tendo em vista o aparecimento de esforços não previstos na análise do modelo isolado.

# 5 Conclusão

O presente trabalho propôs-se a contribuir no desenvolvimento de estudos na EVC através da realização de ensaios de validação e de novas simulações propostas. De uma forma geral, os resultados das análises realizadas com o Fluid Flow (Fluent) no Ansys Worbench confirmam resultados de autores como Braun (2007) [11], Akins, Peterka e Cermak (1977) [23], Fontes (2003) [24], Bênia (2013) [26], e ratificam sua validade. Portanto, o presente trabalho atendeu à análise proposta de evidenciar a relevância dos efeitos de interferência da vizinhança na previsão das cargas de vento em estruturas, como também ratifica-se a viabilidade da utilização de problemas de vento como uma alternativa aos tradicionais métodos experimentais e/ou baseados em normas.

# Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento do trabalho cujos resultados são publicados no presente texto.

# Referências

- Blessmann, J. Neighbouring wind effects on two tall buildings. Journal of wind and industrial aerodynamics, Porto Alegre, v. 41-44, p. 1041-1052, 1992. ISSN 0167-6105.
- [2] Kim, W.; Tamura, Y.; Yoshida, A. Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings. Journal of wind and industrial aerodynamics, v. 147, p. 186-201, 015. ISSN 0167-6105.
- [3] Vieira, G. S.; Brito, J.L.V.; Loredo-Souza, A.M. Experimental study of the neighbourhood effects on the mean wind loading over two equivalent high-rise buildings. Latin american journal of solids and structures, São Paulo, v. 3, n. 15, p. 1-15, 2018.
- [4] Braun, A. L.; Awruch, A. M. Simulação numérica na engenharia do vento. Revista sul-americana de engenharia estrutural, Passo Fundo, v. 5, n. 2/3, p. 81-102, 2009.
- [5] Khanduri, A.C.; Stathopoulos, T.; Bédard, C. Wind-induced interference effects on buildings – a review of the state-of-the-art. Engineering structures, v. 20, n. 7, p. 617-630, 1998.
- [6] Núñez, G.J.Z.; Loredo-Souza, A.M.; Rocha, M.M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. Design e Tecnologia, Porto Alegre, v. 2, n. 4, p. 10-23, 2012. ISSN 2178-1974.
- [7] Stathopoulos, T. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. Journal of wind and industrial aerodynamics, Amsterdam, v. 67 e 68, p. 509-532, 1997.

- [8] Awruch, A.M.; Braun, A.L.; Greco, M. Engenharia do vento computacional e suas aplicações na engenharia civil. análise aerodinâmica e aeroelástica. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingieniería, Barcelona, v. 1, n. 31, p. 55-64, 2015.
- [9] Pravia, Z.M.C.; Drehmer, G.A. Estruturas de Aço. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, 2004.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- [11] Braun, A.L. Simulação numérica na engenharia do vento incluindo efeitos de interação fluido-estrutura. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [12] Tutar, M.; Oguz, G. Computational modeling of wind flow around a group of buildings. International Journal of Computational Fluid Dynamics, London, v. 18, n. 8, p. 651-670, 2007. ISSN 1029-0257.
- [13] Blocken, B.; Stathopoulos, T.; Beeck, J.P.A. J. van. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. Building and Environment, Amsterdam, v. 100, p. 50-81, 2016. ISSN 0360-1323.
- [14] Gunawardena, T. *et al.* Wind analysis and design of tall buildings, the state of the art. 8th International conference on structural engineering and construction management, Colombo, p. 2-10, 2017.
- [15] Bairagi, A.K.; Dalui, S.K. Aerodynamic effects on setback tall building using cfd simulation. 2nd ICADVC, Durgapur, n. 2, p. 381-388, 2018.
- [16] Mukherjee, S.; Bairagi, A. K. Interference effect on principal building due to setback tall building under wind excitation. SEC18: Proceedings of the 11th Structural Engineering Convention, West Bengal, n. 20180306, p. 13-18, 2018.

- [17] Sangalli, L.A. Análise numérica da ação do vento sobre pontes com sistemas de controle de vibração. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, maio 2009.
- [18] Murakami, S. Current status and future trends in computational wind engineering. Journal of wind and industrial aerodynamics, Amsterdam, v. 67 e 68, p. 3-34, 1997.
- [19] Loredo-Souza, A.M.; Schettini, E.B. C.; Paluch, M.J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. Escola de Primavera de Transição e Turbulência - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, Porto Alegre, n. IV, 2004.
- [20] Seidel, M.B. Avaliação computacional do efeito de vizinhança na ação do vento em edificações. Dissertação (Mestrado) – Univesidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, outubro 2020.
- [21] Menter, F. et al. Overview of fluid-structure coupling in Ansys-CFX. 25th International conference on offshore mechanics and artic engineering, Hamburg, p. 1-7, 2006.
- [22] Wang, X. Analytical and computational approaches for some fluidstructure interaction analyses. Computers and Structures, Atlanta, n. 72, p. 423-433, 1999
- [23] Akins, R.E.; Peterka, J.A.; Cermak, J.E. Mean force and moment coefficients for buildings in turbulent boundary layers. Journal of industrial aerodynamics, Amsterdam, n. 2, p. 195-209, 1977.
- [24] Fontes, A.C.D. Importância dos Efeitos de Vizinhança na Reposta Dinâmica de um Edifício à Ação do Vento. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, fev. 2003.
- [25] Blessmann, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.
- [26] Bênia, M.C.D. Determinação dos Efeitos de Vizinhança na Resposta Dinâmica de Edifícios Altos Sob Ação do Vento. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, set. 2013.

Avaliação computacional do efeito de vizinhança na ação do vento em edificações Matheus Borges Seidel, Geraldo José Belmonte dos Santos, José Mário Feitosa Lima