

ANÁLISE NUMÉRICA DA AÇÃO DO VENTO EM *OUTDOOR* DO TIPO CAIXA SOBRE COLUNA CILÍNDRICA EM CÂNION URBANO

Ígor Marini Peter¹, Alexandre Luis Braun², Felipe Schaedler de Almeida³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil /
igorpeter@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil /
alexandre.braun@ufrgs.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil /
felipe.almeida@ufrgs.br

Resumo

O uso de painéis publicitários (*outdoors*) é uma prática comum de *marketing* ao redor do mundo, especialmente em centros urbanos. No entanto, muitas falhas estruturais em *outdoors* são observadas todo ano, usualmente durante eventos climáticos extremos, com ventos fortes. Em grandes cidades, a arquitetura urbana irregular é um dos fatores que dificultam a previsão de cargas aerodinâmicas para *outdoors* e placas em zonas urbanas. Neste sentido, propõe-se uma investigação numérica envolvendo um modelo de *outdoor* com painel fechado do tipo caixa e coluna cilíndrica centralizada, o qual é posicionado em uma configuração típica de cânion urbano. Um modelo numérico em elementos finitos, baseado no esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin, é utilizado para a resolução das equações fundamentais da dinâmica dos fluidos, considerando escoamento quase-incompressível e isotérmico. As malhas de elementos finitos são compostas por elementos hexaédricos lineares com integração reduzida e algoritmo *hourglass* para controle de modos espúrios. A turbulência é tratada através da Simulação de Grandes Escalas (LES) com modelo de submalha dinâmico de Smagorinsky. Os testes são realizados empregando-se um modelo de *outdoor* em escala real, similar ao empregado em estudos conduzidos na Universidade Tecnológica do Texas, o qual é posicionado em diferentes locais ao longo do cânion para avaliar as condições de vizinhança e interferência. As simulações replicaram de maneira satisfatória o escoamento em cânion urbano quando comparado com outros autores. O *outdoor* localizado no interior do cânion apresentou coeficientes não desprezíveis, mostrando que o mesmo não está completamente protegido de cargas de vento pelo cânion. Os coeficientes apresentaram maior magnitude quando o *outdoor* se localiza mais próximo da extremidade do *outdoor* em decorrência da entrada e saída de ar pelas laterais do cânion, levando a valores significativos para análise estrutural.

Palavras-chave

Engenharia do Vento Computacional; Método dos Elementos Finitos; Simulação de Grandes Vórtices; *Outdoors*; Cânion Urbano

Introdução

Painéis publicitários, também conhecidos como *outdoors*, são muito utilizados em centros urbanos, porém muitas falhas são registradas para esse tipo de estrutura ao redor do mundo, colocando em risco a segurança das pessoas nestes locais. Melhorias no entendimento sobre a ação do vento em *outdoors* inseridos em meios urbanos é de grande importância para obter práticas de projeto melhores. As investigações na área de engenharia do vento são tradicionalmente conduzidas através de experimentos em túneis de vento, mas métodos numéricos baseados em DFC (Dinâmica dos

Fluidos Computacional) têm se tornado uma ferramenta de pesquisa importante devido à melhoria contínua na área de computação de alta desempenho.

Outdoors são estruturas suscetíveis a cargas aerodinâmicas devido às suas características geométricas, constituído de grandes painéis, tipicamente com grande elevação (Paulotto, Ciampoli e Augusti, 2006). Wen e Xie (2020) e Farooqui e Yadav (2022) concluíram que, em alguns casos, os códigos de projeto atuais são deficientes na avaliação da carga de vento e efeitos dinâmicos em *outdoors*. Um fator que contribui para estas deficiências é a complexidade em prever as cargas de vento, já que existem uma grande quantidade de parâmetros que afetam o escoamento a distribuição de pressões, como razão de aspecto, direção do vento, relevo, dentre outros. *Outdoors* localizados no interior da malha urbana são particularmente difíceis de prever devido à grande variabilidade e não uniformidade da arquitetura urbana.

Neste sentido, modelos representativos de cânion urbano são empregados para reproduzir configurações geométricas típicas encontradas em grandes cidades, onde correntes de ar significativas podem se desenvolver ao longo de canais que se formam em ruas e avenidas delimitadas lateralmente por edificações de maior altura. Assim, *outdoors* localizados em corredores de prédios podem ser submetidos a cargas de vento bastante diferentes daquelas observadas em condição isolada, pois entre os prédios podem surgir zonas de recirculação, além de afunilamento do escoamento. Modelos de cânion urbano são comumente utilizados para estudos de dispersão de poluentes, como aqueles conduzidos por Gromke e Ruck (2007), Salim, Cheah e Chan (2011) e Madalozzo *et al.* (2014), porém estudos de cânions urbanos para fins de análise de carregamento aerodinâmico em placas, sinais e *outdoors* são ainda escassos.

Neste trabalho, uma investigação numérica para avaliação da carga de vento em *outdoors* do tipo caixa em meio a um cânion urbano é conduzida utilizando uma formulação em elementos finitos desenvolvida especialmente para análise de problemas da Engenharia do Vento Computacional (EVC). O modelo numérico aqui utilizado é baseado no esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin (Braun e Awruch, 2009), onde elementos hexaédricos de oito nós com integração reduzida e controle dos modos espúrios são empregados. A turbulência do escoamento é reproduzida numericamente via o método da Simulação de Grandes Escalas (LES) com modelo submalha dinâmico de Smagorinsky. A configuração de cânion urbano utilizada neste trabalho segue as mesmas medidas utilizadas por Gromke e Ruck (2007) e Madalozzo *et al.* (2014) para facilitar a comparação dos resultados.

Modelo Numérico

O modelo numérico utilizado foi inicialmente proposto por Braun e Awruch (2009) para análises aerodinâmicas e aeroelásticas de pontes de grande vão, sendo melhorado continuamente para permitir investigações em diferentes áreas da EVC. O escoamento é tratado como quase-incompressível, turbulento e isotérmico, considerando um fluido newtoniano e negligenciando as forças de corpo (Braun e Awruch, 2009). A turbulência é tratada numericamente utilizando a metodologia LES com modelo submalha dinâmico de Smagorinsky, onde é adotado um procedimento de dupla filtragem espacial considerando a malha utilizada (Germano *et al.*, 1991; Lilly, 1992). A hipótese de pseudo-compressibilidade e o método de projeção propostos por Chorin (1967; 1968) são adotados para obter explicitamente campos de pressão estabilizados. O esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin, empregado neste trabalho, pode ser expresso a partir de dois passos.

Passo 1 – solução do sistema de equações em $n + 1/2$:

$$\mathbf{M}\tilde{\mathbf{v}}_i^{n+1/2} = \mathbf{M}\mathbf{v}_i^n + \frac{\Delta t}{2} \left[-(\mathbf{A} + \mathbf{B})\mathbf{v}_i - \frac{1}{\rho}\mathbf{G}_i\mathbf{p} - \mathbf{D}_{ij}\mathbf{v}_j + \mathbf{t}_i + \mathbf{b}_i \right]^n \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\mathbf{p}^{n+1/2} = \mathbf{M}\mathbf{p}^n - \frac{\Delta t}{2} [\rho\beta^2\mathbf{G}_j\mathbf{v}_j]^n \quad (2)$$

Correção do campo de velocidades em $n + 1/2$:

$$\mathbf{M}\mathbf{v}_i^{n+1/2} = \mathbf{M}\tilde{\mathbf{v}}_i^{n+1/2} - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{4} \mathbf{G}_i (\mathbf{p}^{n+1/2} - \mathbf{p}^n) \quad (3)$$

Passo 2 – solução do sistema de equações em $n + 1$:

$$\mathbf{M}\mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{M}\mathbf{v}_i^n + \frac{\Delta t}{2} \left[-\mathbf{A}\mathbf{v}_i - \frac{1}{\rho}\mathbf{G}_i\mathbf{p} - \mathbf{D}_{ij}\mathbf{v}_j + \mathbf{t}_i + \mathbf{b}_i \right]^{n+1/2} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}\mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{M}\mathbf{p}^n - \Delta t [\rho\beta^2\mathbf{G}_j\mathbf{v}_j]^{n+1/2} \quad (5)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de massa, \mathbf{A} e \mathbf{B} são as matrizes de advecção e de estabilização, \mathbf{G}_i são as matrizes de gradientes e \mathbf{D}_{ij} são as matrizes de difusão. Os vetores \mathbf{v}_i e \mathbf{p} armazenam os valores nodais das componentes de velocidade e de pressão, enquanto \mathbf{t}_i e \mathbf{b}_i são os vetores com valores nodais de tensões e de forças de corpo. O incremento de tempo é indicado por Δt , sendo ρ a massa específica do fluido e β o parâmetro de compressibilidade, associado à velocidade do som no fluido. Detalhes do modelo numérico utilizado neste trabalho podem ser encontrados em Braun e Awruch (2009) e Visintainer *et al.* (2023).

Modelagem Computacional

O cânion urbano utilizado na presente investigação baseia-se na configuração utilizada por Madalozzo *et al.* (2014) e outros autores. A Figura 1 mostra o domínio computacional empregado junto com as condições de contorno, onde as linhas de prédios têm uma altura (H) de 5 m, largura de H e comprimento de $10H$, com um espaçamento de H entre os prédios. O domínio tem um comprimento total de $36H$, altura total de $8H$ e largura total de $24H$. Os prédios estão centralizados no domínio em relação ao eixo y a uma distância de $5H$ da entrada, sendo modelados como corpos rígidos fixos ao solo.

A condição de entrada do escoamento corresponde a um perfil de velocidade dado pela lei de potência:

$$u(z) = 4,7 \left(\frac{z}{H} \right)^{0,3} \quad (6)$$

em que u é a velocidade longitudinal do vento e z é a altura acima do solo. As componentes transversal e vertical da velocidade do vento são adotadas como zero na entrada. No solo e na superfície do cânion urbano utiliza-se a condição de não deslizamento (velocidade igual a zero em todas as direções). Na saída, uma condição de pressão nula é adotada, sendo que nas laterais e no topo do domínio, adota-se a condição de simetria (velocidade normal ao plano igual a zero).

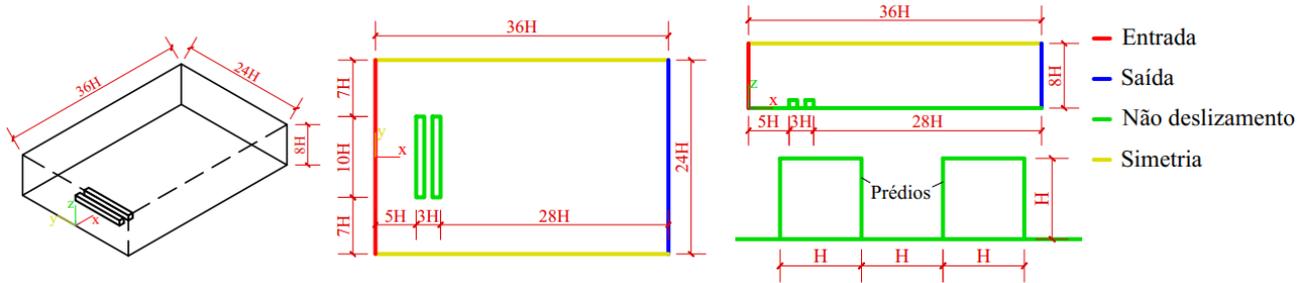


Figura 1 – Domínio computacional e condições de contorno

Considerando como velocidade de referência (V_{ref}) a velocidade do vento na entrada a uma altura de 5 m (4,7 m/s) e a altura dos prédios como o comprimento característico do escoamento, valores de massa específica (ρ) e viscosidade dinâmica (μ) do fluido são escolhidos de forma a obter um número de Reynolds de 10.000. A massa específica empregada é de 1 kg/m^3 , com uma viscosidade dinâmica de $2,35 \times 10^{-3}\text{ kg m}^{-1}\text{ s}^{-1}$. As condições iniciais para as simulações são de campos de pressão e velocidade iguais a zero em todo o domínio.

Realiza-se um total de três simulações: sem a presença do *outdoor* (caso 1), com a presença do *outdoor* no centro do cânion urbano (caso 2) e com a presença do *outdoor* junto à extremidade do cânion urbano (caso 3), conforme indicado na Figura 2. O modelo de *outdoor* utilizado neste trabalho tem uma altura de $H/4$, uma largura de $H/2$ e uma espessura (T) de 0,5 m, apoiado sobre uma coluna cilíndrica com altura de $H/4$ e diâmetro (D) de 0,25 m. Em todos os casos o vento é aplicado na direção transversal ao cânion urbano. Todas as malhas usadas na investigação foram geradas como malhas estruturadas, com os menores elementos localizados próximos a superfícies sólidas para uma adequada representação do escoamento nas regiões de camada limite, levando a valores aceitáveis para o parâmetro y^+ . Um passo de tempo de $2 \times 10^{-4}\text{ s}$ foi escolhido para o caso 1, sendo reduzido para $5 \times 10^{-5}\text{ s}$ nos casos 2 e 3 devido à presença de elementos menores. As especificações das malhas são dadas na Tabela 1 e mais detalhes são mostrados na Figura 3.

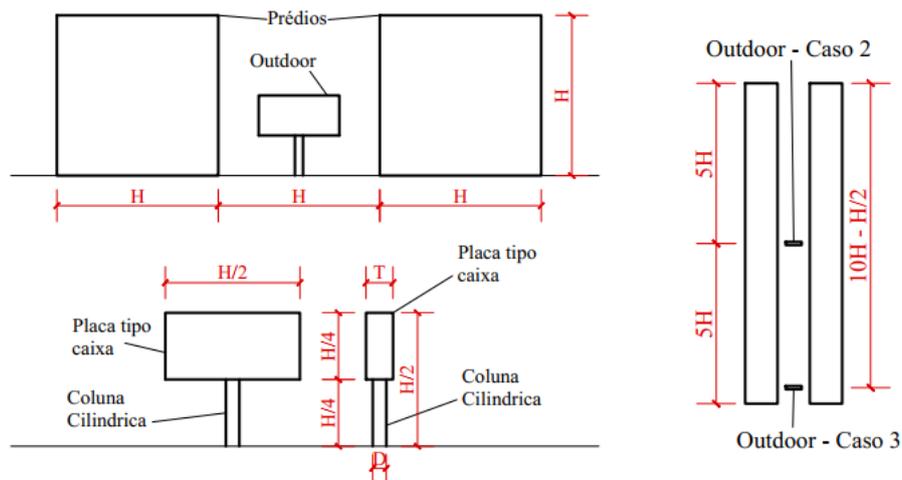


Figura 2 – Localização e medidas do *outdoor* no cânion urbano

Tabela 1 – Especificações das malhas

Caso	Nós	Elementos Hexaédricos	Menor Elemento		y^+ Estimado	Δt
			Absoluto	Relativo		
1	2.169.971	2.116.000	0,05 m	H/100	3,39	2×10^{-4}
2	5.808.441	5.693.850	0,015 m	H/333	1,017	5×10^{-5}
3	6.427.441	6.300.850	0,015 m	H/333	1,017	5×10^{-5}

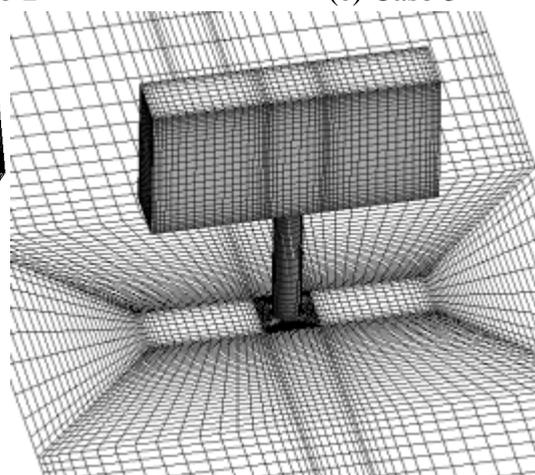
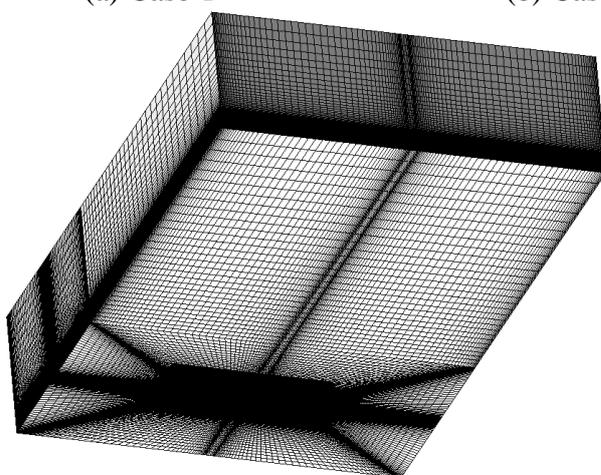
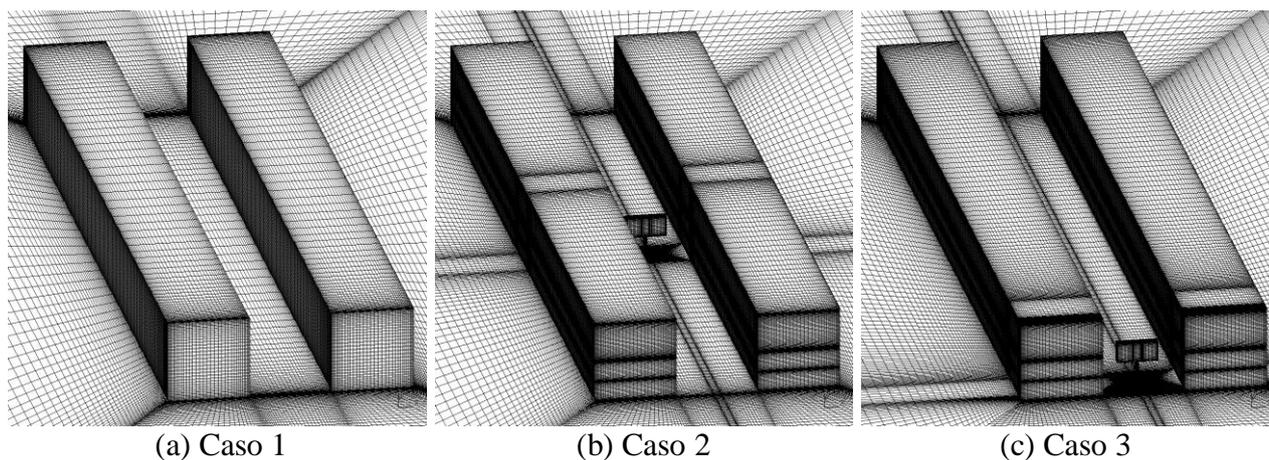


Figura 3 – Detalhes das malhas

Resultados

Os resultados obtidos da simulação do caso 1 são utilizados para validar o modelo computacional. Na Figura 4, o campo de pressões e as linhas de corrente obtidos sobre um plano correspondente à seção central do cânion são apresentados, obtendo-se resultados similares aos obtidos por Madalozzo *et al.* (2014). Na Figura 5, a velocidade transversal do vento na extremidade do cânion é apresentada, onde valores negativos indicam que o ar está entrando no cânion urbano, obtendo-se resultados semelhantes àqueles obtidos por Gromke e Ruck (2007).

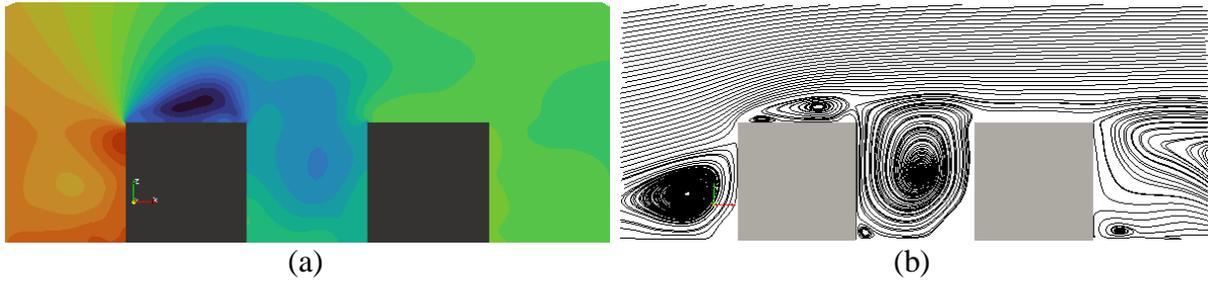


Figura 4 – (a) Campo médio de pressões e (b) linhas de corrente no centro do cânion urbano

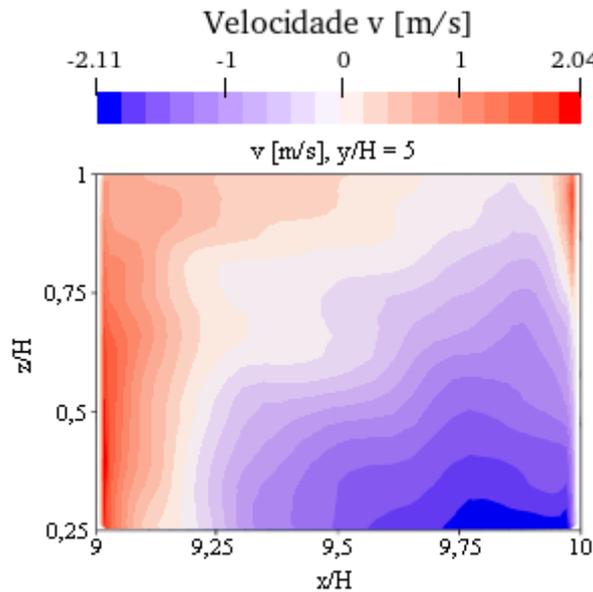


Figura 5 – Velocidade transversal (v) do vento na extremidade do cânion urbano

Para os casos 2 e 3, onde há a presença do *outdoor*, as forças e momentos atuando no *outdoor* foram calculadas e armazenadas ao longo do tempo, sendo normalizados e expressos em termos de coeficiente de força normal C_{fn} dado por:

$$C_{fn} = \frac{2F_n}{\rho V_{ref}^2 WH} \quad (7)$$

de coeficiente de força tangencial C_{ft} , dado por:

$$C_{ft} = \frac{2F_t}{\rho V_{ref}^2 WH} \quad (8)$$

de coeficiente de torção C_T dado por:

$$C_T = \frac{2M_z}{\rho V_{ref}^2 W^2 H} \quad (9)$$

e de coeficiente de sustentação C_l dado por:

$$C_l = \frac{2F_z}{\rho V_{ref}^2 WH} \quad (10)$$

em que F_n é a força resultante normal à placa, F_t é a força resultante tangencial à placa, M_z é o momento em torno do eixo vertical da placa e F_z é a força resultante no eixo vertical da placa. Para a velocidade de referência (V_{ref}) adotou-se a velocidade não perturbada do escoamento a uma altura de 2,5 m ($V_{ref} = 3,82 \text{ m/s}$). Os históricos dos coeficientes são apresentados na Figura 6.

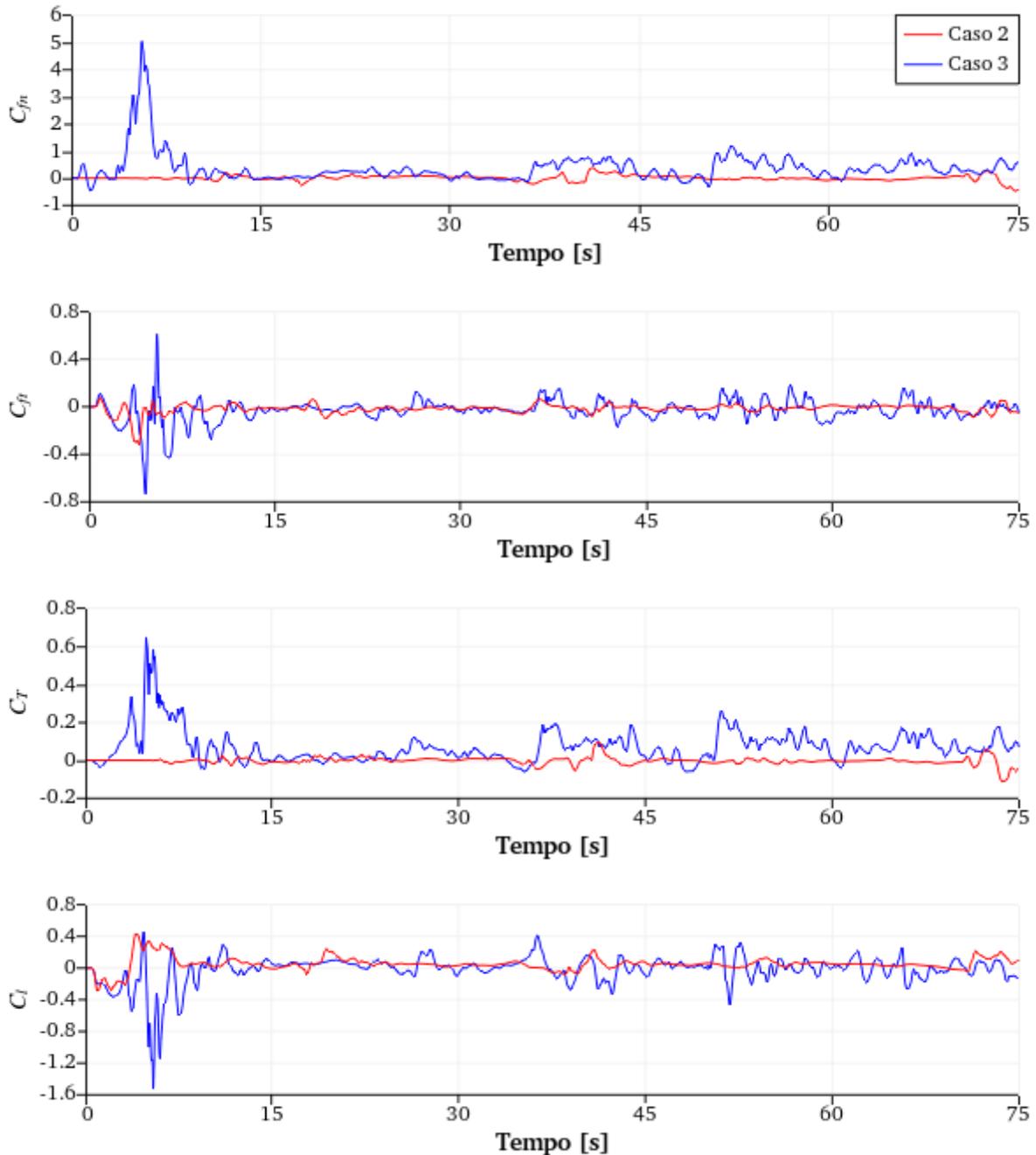


Figura 6 – Históricos de coeficientes de força e momento no *outdoor* em cânion urbano

Valores extremos para os coeficientes são observados nos primeiros segundos de simulação. Isso ocorre devido ao fato de o escoamento ainda estar se desenvolvendo. Portanto, os primeiros 25 segundos de simulação foram descartados para cálculo dos valores médios. Os coeficientes médios e máximos absolutos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes aerodinâmicos médios e máximos

Coeficiente	Caso 2		Caso 3	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo
C_{fn}	0.006	0.374	0.329	1.212
C_{ft}	-0.010	0.087	-0.012	0.183
C_T	-0.004	0.112	0.069	0.263
C_l	0.048	0.242	0.007	0.462

No caso 2, quando o *outdoor* está no centro do cânion, os valores médios são próximos de zero, porém os máximos atingem valores significativos. Já no caso 3, os valores médios de força normal e torção são mais consideráveis e os valores máximos mais elevados, não podendo ser desprezados. A Figura 7 mostra a distribuição do coeficiente de pressão (C_p) média (no tempo), dado por:

$$C_p = \frac{2P}{\rho V_{ref}^2} \quad (11)$$

em que P é a pressão. Os resultados são apresentados nas faces esquerda e direita do painel do *outdoor* para os casos 2 e 3. Considerou-se a mesma velocidade de referência de 3,82 m/s.

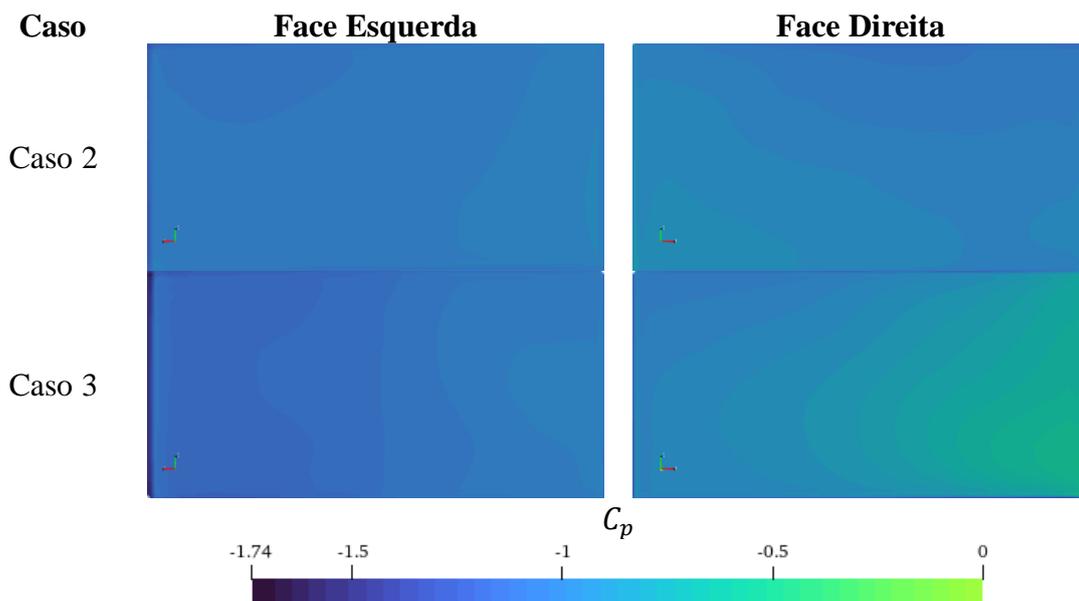


Figura 7 – Valores médios no tempo dos campos de coeficiente de pressão nos painéis

A distribuição de pressões no *outdoor* tende a ter maior excentricidade quando o mesmo está localizado mais próximo à extremidade do cânion, o que justifica o aumento no coeficiente de torção médio observado na Figura 6 e na Tabela 2. Os campos de pressão médios (no tempo) em volta do cânion urbano são apresentados na Figura 8.

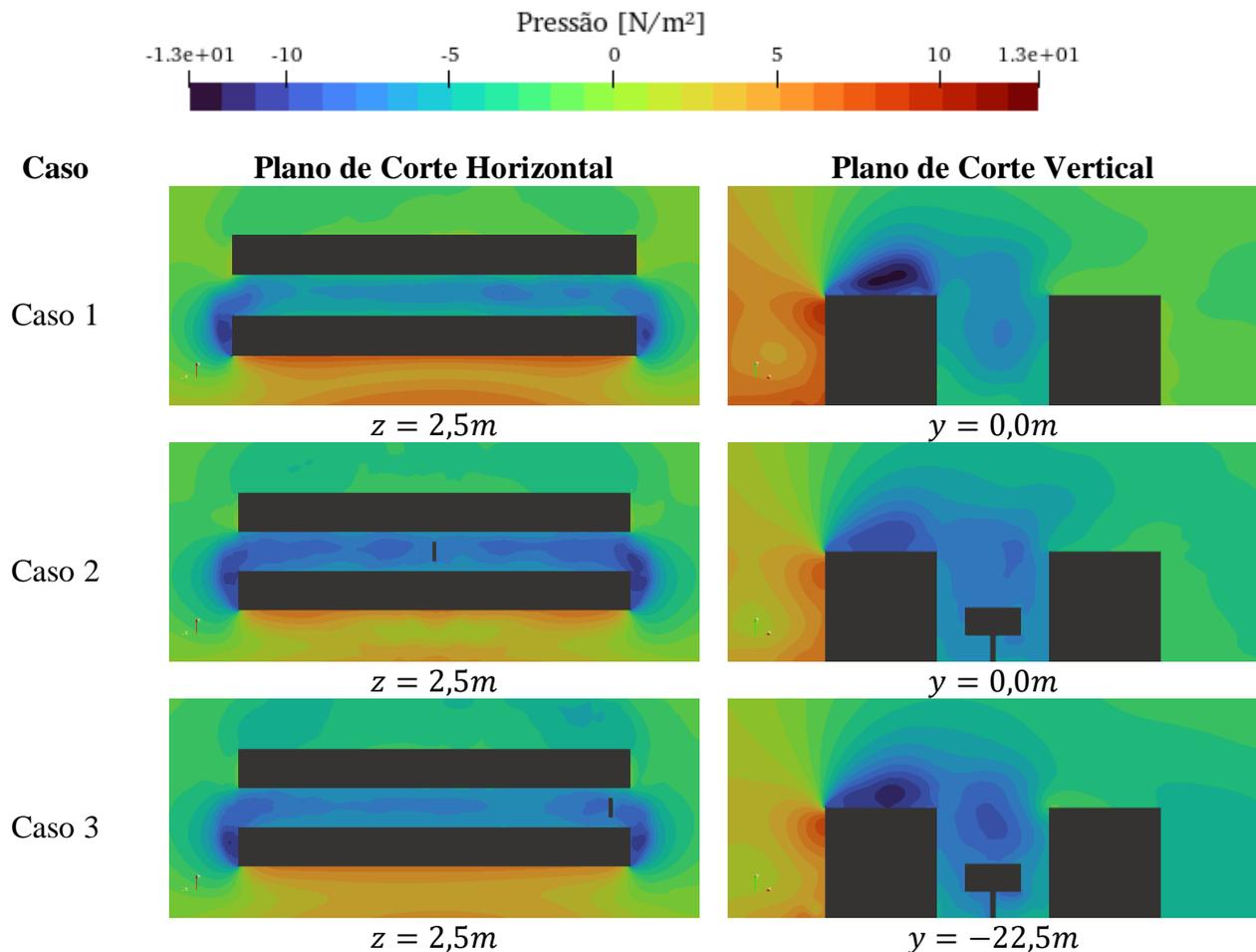


Figura 8 – Campos instantâneos de pressão ao redor do cânion urbano

Observa-se que não há uma mudança significativa no escoamento global devido à presença do *outdoor*, já que o mesmo é uma estrutura de porte pequeno se comparado com o cânion urbano.

Conclusões

Um modelo numérico em elementos finitos baseado no esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin e na Simulação de Grandes Escalas (LES) foi utilizado neste trabalho para simular a ação do vento sobre um modelo de *outdoor* localizado em diferentes posições ao longo do eixo de uma configuração típica de cânion urbano. As simulações realizadas mostram que o modelo é capaz de reproduzir os resultados de outros autores quanto ao escoamento próximo ao cânion. É possível notar também que quando o *outdoor* está localizado junto à extremidade do cânion, esforços consideravelmente superiores podem ser observados em relação à condição de *outdoor* localizado no centro do cânion, especialmente para os coeficientes de força normal e de torção. Os valores são significativos e mostram que a força do vento não pode ser desprezada, mesmo quando o mesmo atua de forma perpendicular ao cânion. Além disso, quando o *outdoor* está localizado mais próximo à extremidade do cânion, há uma maior excentricidade na distribuição de pressões sobre o seu painel. Verifica-se que a presença do *outdoor* não altera o escoamento ao redor do cânion de forma significativa.

Agradecimentos: Este artigo foi possível devido ao suporte financeiro concedido pela Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A investigação foi conduzida utilizando

recursos computacionais disponibilizados pelo Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) e pelo Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho em São Paulo (CENAPAD-SP), projeto UNICAMP/FINEP – MCTI.

Declaração de Autoria: Os autores aqui confirmam que são unicamente responsáveis pela autoria deste trabalho e que todos os materiais aqui incluídos são de propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários para serem aqui incluídos.

Referências

- BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. **Computers and Structures**, 2009. 564-581.
- CHORIN, A. J. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. **Journal of Computational Physics**, 1967. 12-26.
- CHORIN, A. J. Numerical solution of the Navier-Stokes equations. **Mathematics of Computation**, 1968. 745-762.
- FAROOQUI, K. M.; YADAV, N. A Study on the Role of the Peak Wind Pressure Coefficient for Design of Billboard in High-rise Buildings. **GIS Science Journal**, Agosto 2022.
- GERMANO, M. et al. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. **Physics of Fluids**, 1991. 1760-1765.
- GROMKE, C.; RUCK, B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon - Experimental investigation of the flow and concentration fields. **Atmospheric Environment**, 2007. 3287-3302.
- LILLY, D. K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. **Physics of Fluids**, 1992. 633-635.
- MADALOZZO, D. M. S. et al. Numerical simulation of pollutant dispersion in street canyons: Geometric and thermal effects. **Applied Mathematical Modelling**, 2014.
- PAULOTTO, C.; CIAMPOLI, M.; AUGUSTI, G. Wind tunnel evaluation of mean wind pressure on a frame-type signboard. **Journal of Wind Engineering**, Maio 2006. 397-413.
- SMITH, D. A.; ZUO, D.; MEHTA, K. C. Characteristics of wind induced net force and torque on a rectangular sign measured in the field. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Outubro 2014. 80-91.
- VISINTAINER, M. R. M.; G. W. ALMINHANA, A. L. B. Numerical simulation of wind-structure-soil interaction effects on the CAARC tall building model using hybrid CUDA-OpenMP parallelization. **Journal of Building Engineering**, 2023.
- WEN, J.; XIE, Q. Field investigation and structural analysis of wind-induced collapse of outdoor single-post billboards. **Engineering Failure Analysis**, Shanghai, 11 Agosto 2020.