

ANÁLISE NUMÉRICA DA AÇÃO DO VENTO EM *OUTDOOR* DO TIPO CAIXA SOBRE COLUNA CILÍNDRICA EM TERRENO PLANO

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. Muitas falhas estruturais em *outdoors* são observadas todo ano, usualmente durante eventos climáticos com ventos de grande magnitude. Pesquisas indicam que recomendações encontradas em códigos e normas ao redor do mundo subestimam as cargas de vento para *outdoors*, o que aumenta o interesse em mais investigações na área. Assim, propõe-se neste trabalho uma investigação numérica considerando um modelo de *outdoor* com painel de duas faces fechadas, também conhecido como *outdoor* do tipo caixa, montado sobre uma coluna cilíndrica centralizada e apoiada em terreno plano. Utiliza-se aqui uma formulação numérica baseada no Método dos Elementos Finitos e no modelo explícito de dois passos de Taylor-Galerkin para 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. O modelo de *outdoor* utilizado corresponde a uma configuração em escala real empregada em análises realizadas na Universidade Tecnológica do Texas. Múltiplas malhas são propostas e diferentes direções do vento são consideradas. Os resultados são comparados com medições em campo realizadas por outros autores para validar a simulação. Campos de velocidade e pressão médios e instantâneos são analisados, junto com os históricos de força e momento nas diferentes componentes estruturais do *outdoor*. Os coeficientes de força e torção encontrados se mostraram em acordo com resultados experimentais em escala real, indicando que o modelo utilizado é eficaz na replicação das cargas no *outdoor*. Pressões localizadas na coluna de magnitude elevada e reduções drásticas de pressão ocasionadas pela separação do escoamento também foram observadas, diferindo de situações idealizadas.

Palavras-chave

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

Introdução

Painéis publicitários, também conhecidos como *outdoors*, são muito utilizados em centros urbanos e próximo a rodovias, 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* são 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 melhora contínua na área de computação de alto desempenho.

Outdoors são estruturas suscetíveis a cargas aerodinâmicas devido a 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 de efeitos dinâmicos em *outdoors*. Um fator que contribui para estas deficiências é a complexidade em prever as cargas de vento, já que existe uma grande quantidade de parâmetros que afetam o escoamento e a distribuição de pressões, como razão de aspecto, direção do vento, relevo, dentre outros.

Neste trabalho, uma investigação numérica da carga de vento em *outdoor* do tipo caixa em terreno plano é conduzida utilizando uma formulação em elementos finitos para Engenharia do Vento Computacional (EVC). O modelo numérico utilizado é baseado em um algoritmo do método explícito de dois passos de Taylor-Galerkin usando elementos hexaédricos de oito nós com um ponto de integração e controle dos modos espúrios via algoritmo *hourglass* (Braun e Awruch, 2009). A turbulência do escoamento é reproduzida numericamente via o método da Simulação de Grandes Escalas (LES) com modelo submalha dinâmico de Smagorinsky. O modelo de *outdoor* utilizado para a investigação numérica corresponde a uma configuração em escala real estudada por Smith, Zuo e Mehta (2014).

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 $n + 1$:

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

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

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 *outdoor* usado na presente investigação é baseado em uma estrutura em escala real localizada no campo de Ciência e Engenharia do Vento do Centro Tecnológico Reese em Lubbock, Texas (Smith, Zuo e Mehta, 2014). A Figura 1 mostra o domínio computacional junto com as condições de contorno, onde se observa que o *outdoor* tem uma largura (W) de 7,5 m, uma altura (H) de 3,75 m e uma espessura (T) de 1,75 m, montado em uma coluna cilíndrica com diâmetro externo (D) de 0,274 m e uma altura (h) de 3,75 m, resultando em uma altura total de 7,5 m (Smith, Zuo e Mehta, 2014). O domínio tem um comprimento total de $10W$, com um comprimento de $2W$ antes do *outdoor*, uma altura total de $20H$ e uma largura total de $5W$ ou $9W$, dependendo da simulação. O *outdoor* é modelado como um corpo rígido fixado na base da coluna.

A condição de entrada do escoamento é um perfil de velocidade dada pela lei de potência:

$$u(z) = 8,9 \left(\frac{z}{7,5} \right)^{0,132} \quad (6)$$

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 *outdoor* adota-se a condição de não deslizamento (velocidade igual a zero em todas as direções). Na saída, uma condição de zero pressão é empregada. Nas laterais e no topo do domínio, a condição de simetria (velocidade normal ao plano igual a zero) é utilizada.

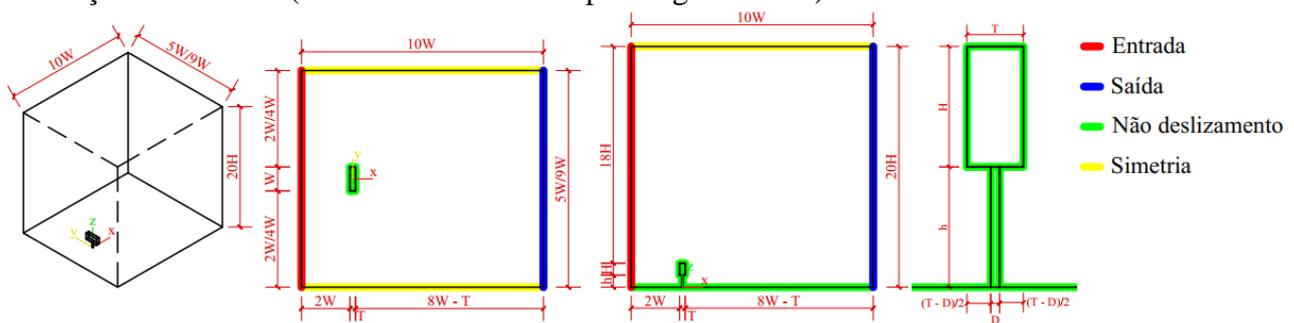


Figura 1 – Domínio computacional e condições de contorno

Considerando como velocidade de referência (V_{ref}) a velocidade do vento na entrada em uma altura de 7,5 m (8,9 m/s) e a largura da placa como o comprimento característico do *outdoor*, valores de massa específica (ρ) e viscosidade dinâmica (μ) do fluido foram escolhidos de forma a obter um número de Reynolds de 99.627. Fixando a massa específica em 1 kg/m^3 , a viscosidade dinâmica obtida é de $6,7 \times 10^{-4}\text{ kg m}^{-1}\text{ s}^{-1}$. Usando esses valores, a velocidade do vento a uma altura de 3,75 m e o diâmetro da coluna como comprimento característico, o número de Reynolds específico para a coluna pode ser calculado, resultado em um valor de 3.322. A condições iniciais para as simulações são de campos de pressão e velocidade iguais a zero em todo o domínio.

Três direções do vento α são investigadas neste trabalho: 90° , 70° e 50° , calculadas em relação ao plano da placa. Para definir a orientação do modelo em relação ao vento, é realizada a rotação do *outdoor* ao redor do seu eixo vertical antes de gerar a malha de elementos finitos, conforme a Figura 2, onde os eixos normal (n) e tangencial (t) da placa também são indicados. Para o vento atuando a 90° , três malhas foram geradas, nomeadas M1, M2 e M3, onde M1 é a malha mais grosseira e M3 a malha mais refinada. Para o vento atuando a 70° e 50° , apenas as malhas M1 e M2 são usadas. Para todas as direções do vento, a malha M1 utiliza um domínio com largura total de $5W$, enquanto as malhas M2 e M3 usam um domínio com a largura total de $9W$. Todas as malhas usadas na investigação foram geradas como malhas estruturadas, sendo que os menores elementos estão localizados próximos a superfícies sólidas, levando a valores aceitáveis para o parâmetro y^+ . O passo de tempo empregado é de $2 \times 10^{-5}s$ para as malhas M1 e M2, com uma redução para $1,989 \times 10^{-5}s$ para a simulação com a malha M3. As especificações das malhas são dadas na Tabela 1 e mais detalhes são mostrados na Figura 3.

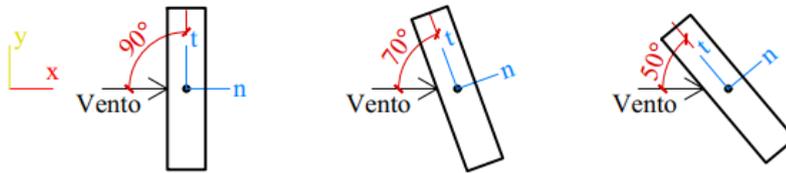


Figura 2 – Configurações de *outdoors*

Tabela 1 – Especificações das malhas

Malha	Direção	Nós	Elementos	Menor Elemento		y^+ Estimado		Δt
				Absoluto	Relativo	Placa	Coluna	
M1	90°	2424016	2364884	0.02m	W/375	7.156	9.176	$2 \times 10^{-5}s$
	70°	2424016	2364884	0.02m	W/375	7.156	9.176	$2 \times 10^{-5}s$
	50°	2424016	2364884	0.02m	W/375	7.156	9.176	$2 \times 10^{-5}s$
M2	90°	6832237	6704750	0.0075m	W/1000	2.684	3.441	$2 \times 10^{-5}s$
	70°	6832237	6704750	0.0075m	W/1000	2.684	3.441	$2 \times 10^{-5}s$
	50°	6832237	6704750	0.0075m	W/1000	2.684	3.441	$2 \times 10^{-5}s$
M3	90°	9791800	9621375	0.0055m	W/1364	1.968	2.523	$1,989 \times 10^{-5}s$

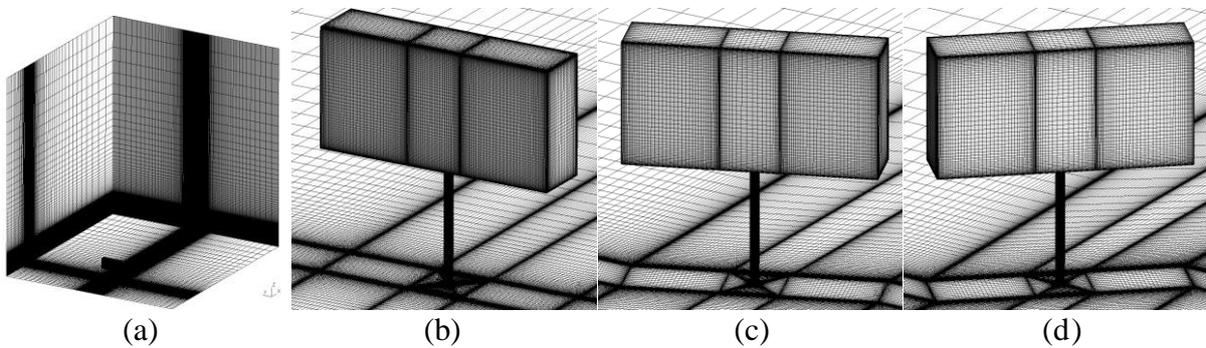


Figura 3 – Detalhes das malhas: (a) visão geral, (b) vento atuando a 90° e malha M3, (c) vento atuando a 70° e malha M2, (d) vento atuando a 50° e malha M2

Resultados

As forças e momentos atuando no *outdoor* foram calculados e armazenados para todas as simulações. Os mesmos foram normalizados e apresentados na forma de coeficiente de força normal (C_{fn}), dado por:

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

e de coeficiente de torção (C_T), dado por:

$$C_T = \frac{2M_z}{\rho V_{ref}^2 W^2 H} \quad (8)$$

onde F_n é a força resultante normal à placa e M_z é o momento em torno do eixo da coluna. Os históricos de coeficiente de força normal e coeficiente de torção são apresentados na Figura 4.

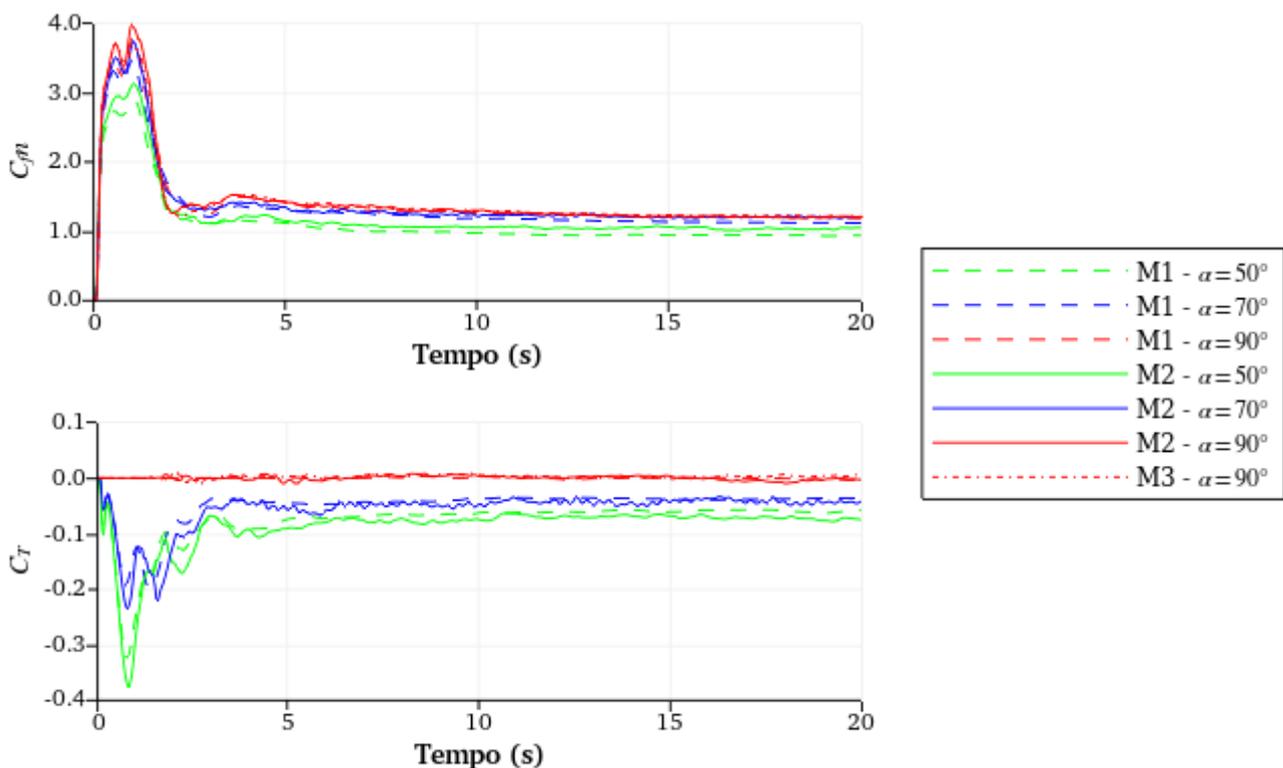


Figura 4 – Históricos dos coeficientes de força normal C_{fn} e de torção C_T

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 10 segundos de simulação foram descartados para cálculo dos valores médios. Os coeficientes de força normal médios são mostrados na Tabela 2 e os coeficientes de torção médios são mostrados na Tabela 3, onde os valores são comparados com as medições em escala real feitas por Smith, Zuo e Mehta (2014), sendo apresentado o erro relativo entre os resultados, dado por:

$$E = \frac{C_{num} - C_{real}}{C_{real}} \cdot 100\% \quad (9)$$

em que E é o erro relativo, C_{num} é o coeficiente médio obtido pela simulação numérica e C_{real} é o coeficiente médio obtido pelas medições em escala real. Os coeficientes médios obtidos pela simulação numérica diferem das medidas em escala real devido a aproximações adotadas no modelo numérico e ao grau de refinamento da malha de elementos finitos, mas apresentam

convergência ao resultado em escala real e representam uma boa aproximação das medições, atestando a eficácia do modelo numérico utilizado.

A Figura 5 mostra a distribuição do coeficiente de pressão (C_p) média (no tempo), dado por:

$$C_p = \frac{2P}{\rho V_{ref}^2} \quad (10)$$

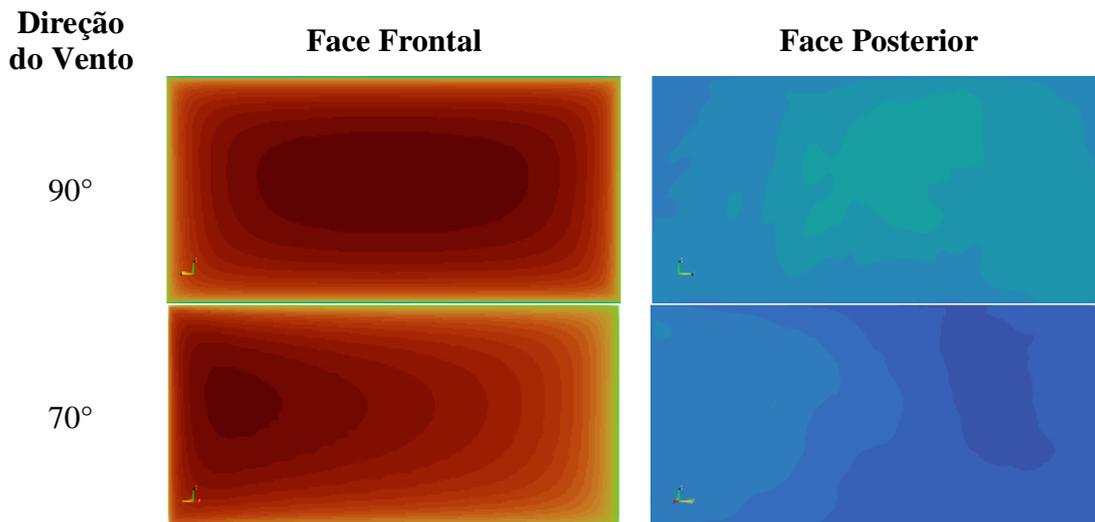
em que P é a pressão. Os resultados são apresentados nas faces frontal e posterior do painel do *outdoor* para cada ângulo de ataque. Adotou-se a mesma velocidade de referência de 8,9 m/s.

Tabela 2 – Coeficiente de força normal médio

Direção do Vento	Medições em Escala Real	Malha	Resultado	Erro
90°	1,24	M1	1,221	-1,54%
		M2	1,226	-1,10%
		M3	1,237	-0,21%
70°	1,23	M1	1,143	-7,03%
		M2	1,214	-1,33%
50°	1,13	M1	0,946	-16,30%
		M2	1,046	-7,46%

Tabela 3 – Coeficiente de torção médio

Direção do Vento	Medições em Escala Real	Malha	Resultado	Erro
90°	0,0032	M1	-0,0006	-
		M2	-0,0007	-
		M3	0,0023	-
70°	-0,0488	M1	-0,0374	-23,44%
		M2	-0,0429	-12,00%
50°	-0,0678	M1	-0,0590	-13,00%
		M2	-0,0702	3,49%



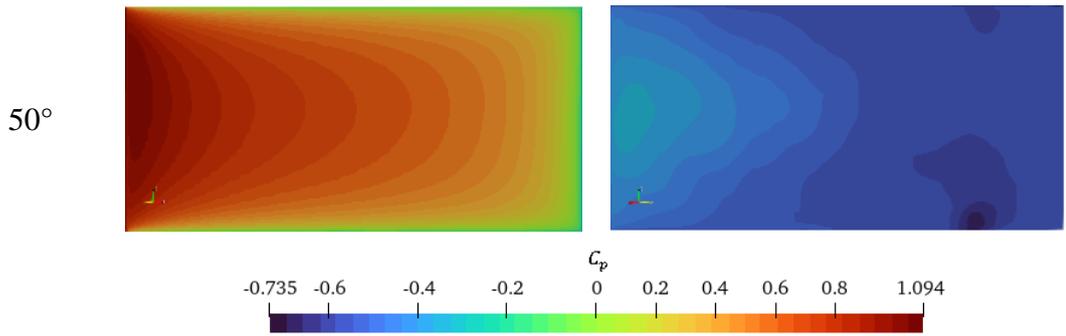


Figura 5 – Valores médios no tempo dos campos de coeficiente de pressão nos painéis

Diminuindo o ângulo de incidência do vento obtém-se pressões na face frontal mais concentradas e próximas à extremidade lateral da placa, o que resulta nos coeficientes de torção maiores em módulo observados na Figura 4 e Tabela 3. As linhas isobáricas na face posterior são menos uniformes que na face frontal devido a flutuações turbulentas associadas com a esteira aerodinâmica do *outdoor*. Os campos de pressão instantâneos em volta do modelo de *outdoor* no final das simulações são apresentados na Figura 6 usando planos de corte através do centro geométrico do *outdoor*.

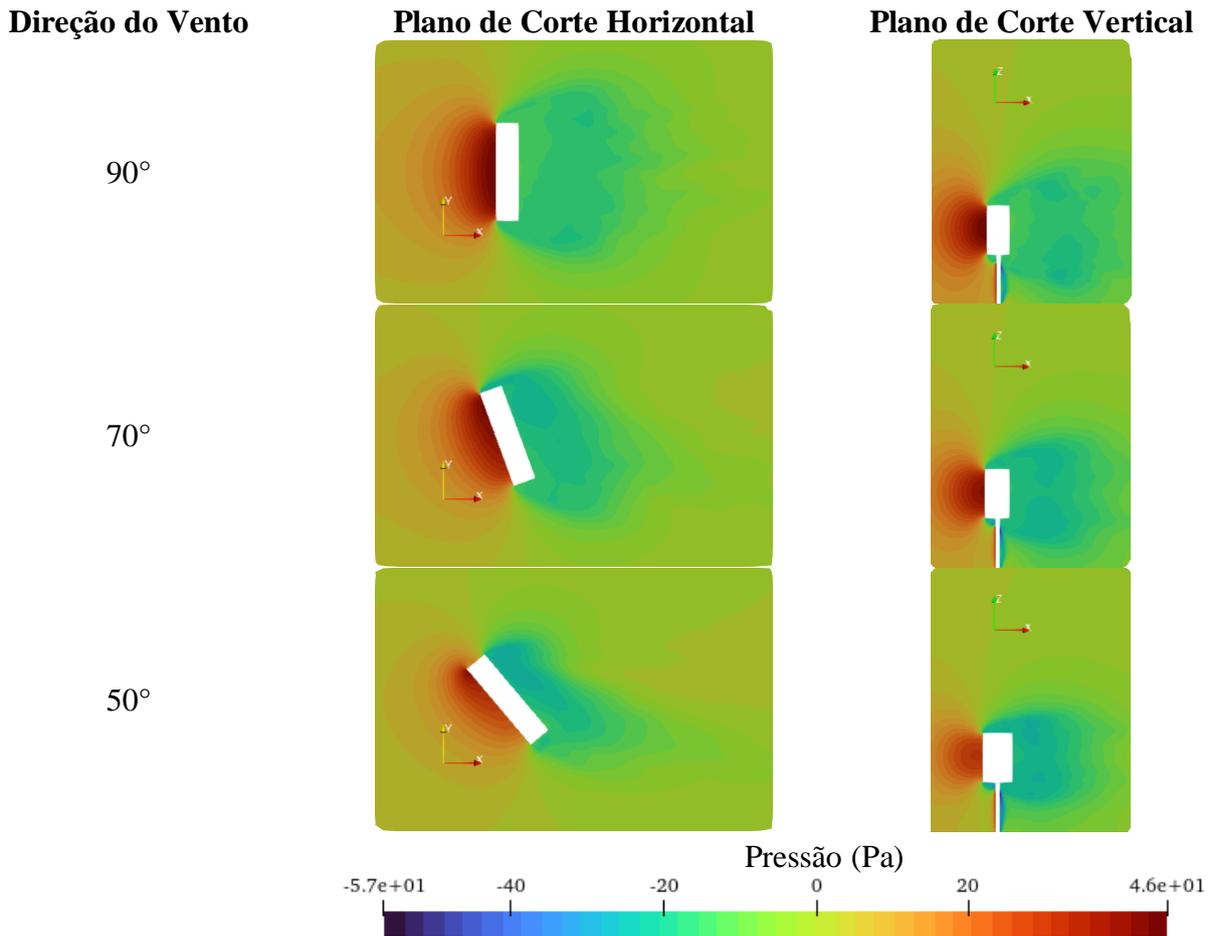


Figura 6 – Campos instantâneos de pressão ao redor do *outdoor*

Conforme o ângulo de incidência do vento muda, ocorre uma mudança na distribuição de pressões na esteira do *outdoor*. É observada a formação de zonas de baixa pressão abaixo da placa devido à separação do escoamento. O coeficiente de arrasto C_D da coluna é dado por:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho V_{ref}^2 D h} \quad (11)$$

onde F_D é a força de arrasto na coluna. O histórico de coeficiente de arrasto é apresentado na Figura 7 para a malha M3. A velocidade de referência foi adotada como a velocidade não perturbada a uma altura de 3,75 m ($V_{ref} = 8,12 \text{ m/s}$). Foi calculado um coeficiente de arrasto médio de 0,67, inferior ao esperado para uma coluna isolada. Essa diferença se deve em parte à redução no campo de pressões observada no topo da coluna, no entanto mais investigações são necessárias para a validação do presente resultado. Essa redução pode ser também observada analisando a distribuição de forças ao longo da altura da coluna na Figura 8.

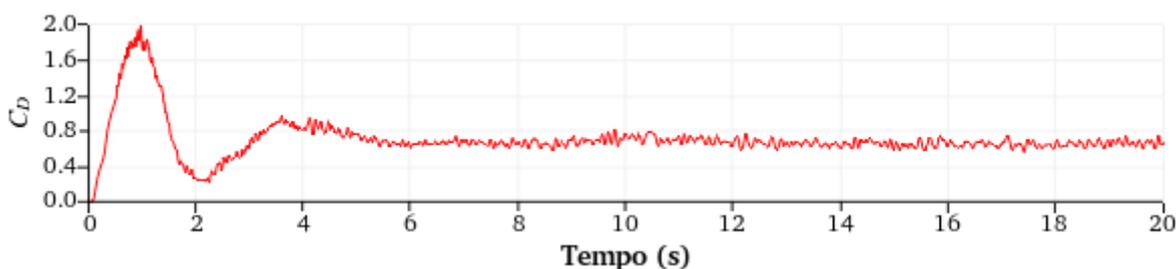


Figura 7 – Coeficiente de arrasto da coluna

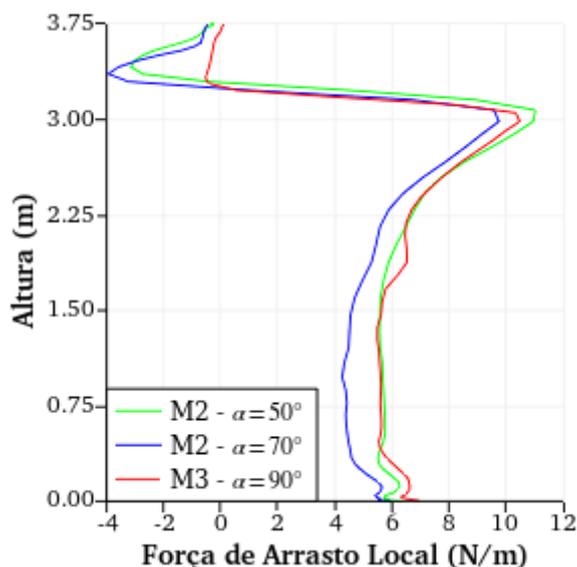


Figura 8 – Distribuição de forças ao longo da altura da coluna

Como pode ser observado, o carregamento aumenta de magnitude acima de 2 metros de altura, atingindo o seu máximo em uma altura próxima de 3 metros, diminuindo drasticamente a partir deste ponto. Verifica-se uma distribuição de forças com valores negativos entre 3,25 m e 3,75 m de altura, o que leva a uma diminuição considerável na força de arrasto total na coluna. Os coeficientes de pressão ao redor da coluna em algumas alturas são apresentados na Figura 9 considerando uma velocidade de referência de 8,12 m/s, assim como os valores obtidos pela NBR 6123.

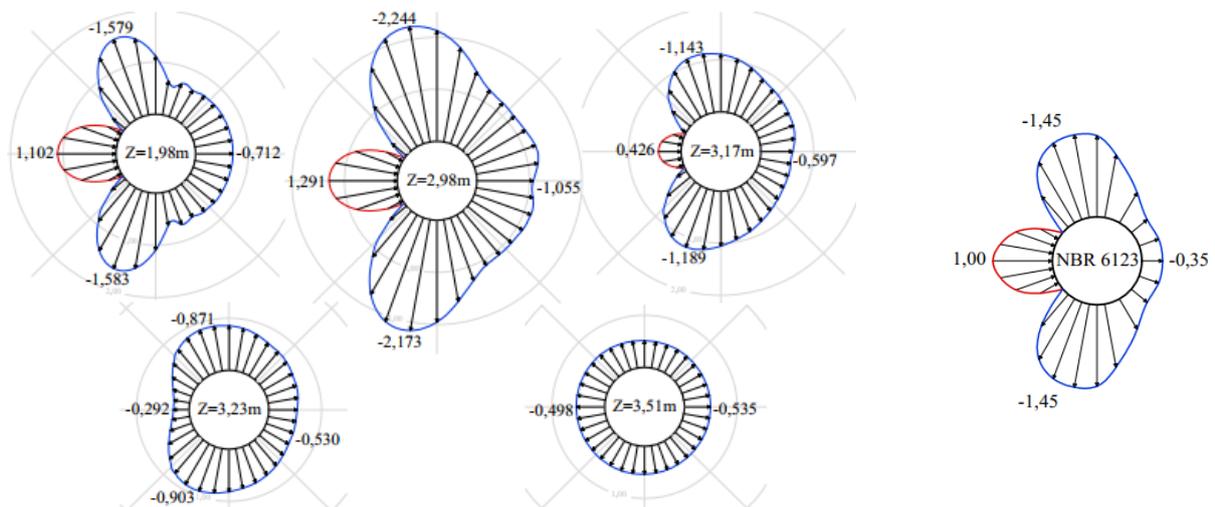


Figura 9 – Coeficiente de pressão médios ao redor da coluna em diferentes alturas

Os coeficientes de pressão ao redor da coluna atingem valores maiores que aqueles obtidos pela NBR6123. Próximo ao topo da coluna o comportamento muda, levando a uma distribuição de pressões negativas quase uniforme.

Conclusões

Um modelo numérico em elementos finitos, baseado no modelo explícito de dois passos de Taylor-Galerkin e usando Simulação de Grandes Escalas (LES) foi utilizado para simular a ação do vento em uma estrutura de *outdoor*. As simulações realizadas mostraram a eficácia do modelo ao replicar medições em escala real relacionadas a forças e torções induzidas pelo vento em um *outdoor*. Foi observado um aumento do coeficiente de torção conforme o ângulo entre a direção do vento e a placa diminuiu, estando de acordo com as observações experimentais e os campos de pressão gerados na análise mostraram-se em concordância com os coeficientes calculados. Uma redução significativa na força de arrasto na coluna é observada devido à separação do escoamento observada abaixo do painel. Coeficientes de pressão ao redor da coluna atingiram valores maiores do que aqueles esperados de uma coluna isolada, podendo levar a tensões maiores em pontos localizados da coluna. Junto ao topo da coluna, a separação do escoamento abaixo do painel levou a uma distribuição de pressões de sucção quase uniforme ao redor da coluna.

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.
- LILLY, D. K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. **Physics of Fluids**, 1992. 633-635.
- 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.