

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

**ESTUDO COMPARATIVO DE CARREGAMENTO QUASI-ESTÁTICO DE VENTO
SOBRE A COBERTURA DE UM GALPÃO ATRAVÉS DE MÉTODO TRANSIENTE DE
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Aron L. Zavelinski¹
Rodrigo S. Romanus²
Alan Lugarini³
Admilson T. Franco⁴

Resumo

Elementos metálicos apresentam uma boa relação de resistência a tração por peso, e por isso são amplamente utilizados em estruturas que sustentam coberturas de edifícios baixos, como galpões e estádios. Por se tratarem de estruturas relativamente leves, a ação do vento acaba sendo bastante significativa no dimensionamento dos elementos. A depender da concepção arquitetônica da obra e da topografia do entorno, o uso de soluções analíticas fornecidas em normas de vento pode acarretar em importantes incertezas de projeto. Dentro desse contexto, o uso da fluidodinâmica computacional (CFD) surge como uma alternativa que tem despertado interesse neste mercado. No presente trabalho, são realizadas comparações entre resultados de túnel de vento e de simulações de grandes vórtices (CFD-LES) para a carga de vento sobre a cobertura de um galpão padrão. O objetivo do estudo é investigar a viabilidade e o nível de precisão que se pode esperar deste método para projetos estruturais de edifícios baixos. Uma boa concordância com resultados experimentais foi obtida para as três direções de incidência de vento analisadas. As características e ressalvas a respeito do método são oportunamente discutidas.

Palavras-chave: Carga de vento; Carregamento quasi-estático; Fluidodinâmica computacional; Simulação de grandes vórtices; Edificação horizontal.

**COMPARATIVE STUDY OF QUASI-STATIC WIND LOADING ON THE ROOF OF A LOW-RISE
BUILDING USING A TRANSIENT METHOD OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

Abstract

Metallic elements exhibit a good strength-to-weight ratio, which is why they are widely used in structures that support roofs of low-rise buildings, such as warehouses and stadiums. Due to their relatively lightweight nature, wind action becomes highly significant in the design of these elements. Depending on the architectural design and the topography of the surroundings, the use of analytical solutions provided in wind codes may lead to significant design uncertainties. In this context, the use of computational fluid dynamics (CFD) emerges as an alternative that has sparked interest in this market. This work compares wind tunnel results

¹ Eng. Mecânico pela Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), Engenheiro de CFD na AeroSim e estudante de mestrado na UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil.

² M.Sc. em engenharia mecânica pela UTFPR, Gerente de produto na AeroSim, Curitiba, Paraná, Brasil.

³ Dr. em engenharia mecânica pela UTFPR, Diretor de engenharia na AeroSim, Curitiba, Paraná, Brasil.

⁴ Dr. em Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos pela UNICAMP, Professor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais na UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil.

with large eddy simulations (CFD-LES) for the wind load on the roof of a standard warehouse. The objective of the study is to investigate the feasibility and level of accuracy that can be expected from this method for structural designs of low-rise buildings. Good agreement with experimental results was achieved for the three wind incidence directions analyzed. The method's characteristics and caveats are appropriately discussed.

Keywords: Wind load; Quasi-static loading; Computational fluid dynamics; Large eddy simulation; Low-rise building.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas são frequentemente leves e flexíveis, de forma que as cargas de vento apresentam especial relevância no dimensionamento de tais estruturas, podendo em alguns casos ser o mais importante carregamento em consideração. As normas técnicas internacionais ligadas à ação do vento, dentre as quais a norma brasileira NBR 6123 [1], especificam um conjunto de formulações (aqui chamadas de “soluções analíticas”) baseadas em testes experimentais, que estabelecem procedimentos e critérios para compor as cargas de vento para projetos de estruturas. Tais soluções analíticas especificam variáveis para cada tipo de efeito capaz de influenciar as cargas de vento, como perfil da camada limite atmosférica, efeitos topográficos, fatores de segurança, geometria da edificação, etc. No entanto, a real carga de vento que uma estrutura está sujeita depende do efeito combinado das variáveis relevantes, de uma maneira mais complexa do que as soluções analíticas são capazes de representar [2]. Em decorrência disso, as normas reconhecem a impossibilidade de apresentar soluções para todas as combinações vento-estrutura possíveis e frequentemente explicitam a importância da realização de estudos avançados de túnel de vento.

Devido à progressiva redução no custo de recursos computacionais, e à melhoria dos algoritmos de simulação, a dinâmica de fluidos computacional (CFD) vem sendo cada vez mais utilizada como solução de engenharia. A utilização de modelos geométricos digitais facilita a integração de análises de vento nos processos de IPD (*Integrated Project Delivery*) e BIM (*Building Information Modeling*). Os resultados obtidos podem ser facilmente acoplados em softwares de análise estrutural, de forma que sua utilização oferece flexibilidade e redução em tempo de projeto [3]. Kataoka, Ono e Enoki [4] antecipam que a utilização de análise numérica para o dimensionamento de forças sobre estruturas se tornará cada vez mais comum nos próximos anos. Segundo os autores, a técnica será utilizada em fases iniciais do desenho estrutural, enquanto o formato final será avaliado em túnel de vento. Os autores sugerem, ainda, a utilização da técnica para a estimativa de cargas de vento em construções de pequeno e médio porte que foram dimensionadas com base somente em normas técnicas, como forma de verificação de segurança e otimização de formatos.

Para a realização da estimativa de cargas de vento por meios computacionais, no entanto, é importante que se utilizem métodos numéricos capazes de reproduzir com precisão o comportamento transiente do vento. As cargas pertinentes ao dimensionamento de estruturas são as ações extremas, originadas das flutuações turbulentas, e diferem bastante da carga média do vento. O método numérico mais difundido em softwares de CFD são baseados na resolução da média de Reynolds nas equações da Navier-Stokes (RANS), tais como os métodos $k-\epsilon$ e $k-\omega$, os quais são incapazes de reproduzir as flutuações turbulentas [5]. Dessa maneira,

tais algoritmos apresentam estimativas imprecisas de cargas em zonas de separação do escoamento e são incapazes de modelar fenômenos dinâmicos, tais como o surgimento de forças transversais ao vento, efeitos de golpe devido a construções vizinhas, entre muitos outros. Porém, existem métodos numéricos que solucionam porções do espectro turbulento, dentre os quais o mais adequado é a simulação de grandes vórtices (Large Eddy Simulation – LES). Com LES, a dinâmica de formação e dissipação de vórtices é reproduzida com alta fidelidade, o que resulta na obtenção de medições de pressão bastante próximas às que se obteriam em um ensaio físico [6]. Deve-se destacar que o custo computacional deste método é bastante significativo, o que o torna inviável em várias aplicações como solução de mercado.

Diversos trabalhos vem sendo apresentados nos últimos 10 anos apontando a capacidade do método LES em reproduzir as características do escoamento turbulento no entorno de geometrias complexas [7-19]. Dentre esses alguns analisaram as flutuações de pressão sobre edificações baixas, tais como galpões e casas [9][10][14][15][17][18]. Kataoka, Ono e Enoki [4] indicam que com o adequado ajuste de parâmetros numéricos é possível se obter medições de pressão que atingem boa concordância com resultados de túnel de vento para estatísticas de até quarta ordem.

Para se obter resultados de CFD-LES com qualidade adequada para projeto estrutural é necessário cumprir os requisitos corretos de resolução espaço-temporal e amostragem. Somente com o apropriado dimensionamento do caso pode-se conseguir convergência estatística e a correta reprodução do espectro turbulento. Tanto os requisitos de resolução quando de amostragem demandam memória e capacidade de processamento e se convertem, em última instância, em custo e tempo de simulação.

Os avanços recentes em aplicações de inteligência artificial vem impulsionando o desenvolvimento de unidades de processamento gráficos (GPUs) direcionadas para aplicações científicas. A capacidade de processamento e memória RAM destas máquinas vem aumentando, sem aumentar na mesma proporção os preços de tais componentes. Por isso, vale a pena constantemente reavaliar a viabilidade do método LES. Os algoritmos mais tradicionais e dominantes na área de CFD são baseados na discretização das equações de Navier-Stokes por meio do método dos volumes finitos [19]. No entanto, métodos alternativos baseados na resolução da equação de Boltzmann por meio do método LBM (*Lattice-Boltzmann Method*) vem se tornando cada vez mais atrativas devido ao seu grande potencial de paralelização. Por conta disso, o método apresenta grande potencial de aproveitar as características das GPUs [20].

Nesse trabalho, são apresentados resultados de uma aplicação do método LBM para a simulação de grandes vórtices (LES) para o estudo de cargas de vento quasi-estática sobre um galpão padrão. Analisaram-se três incidências de vento e validaram-se, com base em resultados de túnel de vento físico, as medidas de coeficiente de pressão medidas sobre a cobertura da edificação. Utilizou-se um padrão de camada limite atmosférica compatível com a categoria II da norma NBR-6123 [1]. O objetivo do trabalho é avaliar o nível de precisão e a viabilidade do método, como alternativa as soluções analíticas para o projeto de cargas de vento sobre edificações baixas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metodologia Numérica

O método lattice-Boltzmann (LBM) é utilizado para computar a evolução do escoamento. O LBM consiste na discretização da equação de Boltzmann e utiliza uma abordagem mesoscópica para descrever o escoamento. Dessa forma, o fluido é representado por populações $\{f_i\}$, que consistem na densidade de partículas com certo estado de velocidade, em uma certa posição no espaço e no tempo.

No LBM a discretização do domínio é realizada tanto para o espaço-tempo quanto para o espaço de velocidades, conforme ilustrado no arranjo de velocidade D3Q19 abaixo:

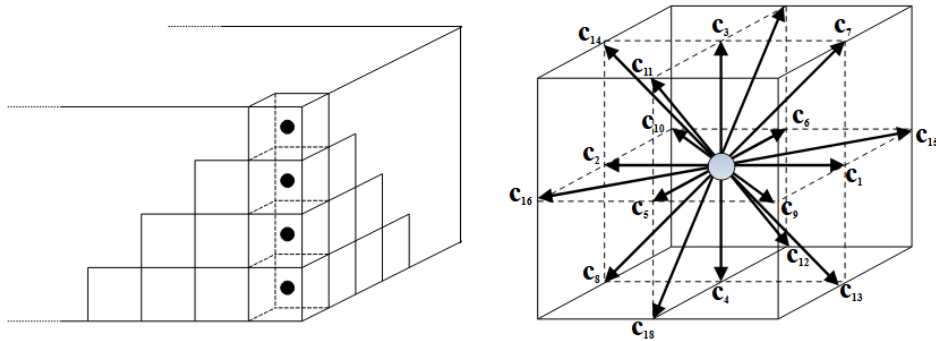


Figura 1: Discretização do domínio em elementos cúbicos em um arranjo D3Q19. Definido para 3 dimensões e 19 direções de velocidade.

A equação de lattice Boltzmann é resolvida em duas etapas: a colisão, na qual as populações sofrem colisões e tem alteração de seu valor:

$$f_i^* = f_i^{eq} + (1 - \omega) f_i^{neq} + \Delta t \left(1 - \frac{\omega}{2}\right) F_i \quad (1)$$

Em que ω é a frequência de relaxação não dimensional. E a propagação, na qual as populações migram para os nós vizinhos.

$$f_i(x + \Delta x, t + \Delta t) = f_i^*(x, t) \quad (2)$$

Para cada direção de velocidade há uma população f_i associada, sendo que os momentos de $\{f_i\}$ retornam propriedades macroscópicas do fluido, por exemplo:

$$\sum_{i=1}^n f_i = \frac{\rho}{C_s^2} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n f_i e_i = \rho u - \frac{\Delta t}{2} F \quad (4)$$

Em que p , ρ e u são, a pressão, massa específica e velocidade do fluido, respectivamente, c_s é a velocidade do som no meio e F é uma força macroscópica volumétrica. Para mais detalhes sobre o método o leitor é referido à literatura especializada no método [21].

A maior parte das operações em LBM são locais e por esse motivo o método é altamente eficiente para computação paralela. Neste trabalho, o LBM é usado para representar o modelo LES de Smagorinsky [22]. Os obstáculos e edificações no domínio computacional são representados com o método da fronteira imersa (IBM), que utiliza uma malha de nós Lagrangeanos e impõe a condição de não-deslizamento no fluido por meio de um campo de forças [23].

2.2 Modelagem do Problema

A metodologia numérica apresentada na seção 2.1 será usada para reproduzir um dos casos avaliados no NIST/TTU *Cooperative Agreement – Windstorm Mitigation Initiative*, projeto financiado conjuntamente pelo *National Bureau of Standards and Technology* e pela *Texas Tech University* [24][25]. Utilizou-se como referência os resultados relativos ao teste 1 da segunda fase do experimento, caracterizada pela medição das pressões externas de um modelo de um galpão de duas águas com altura de beiral, largura e comprimento iguais a 6,10m, 30,48m e 60,96m, respectivamente, em escala de 1:200. Além disso, o caimento do telhado é de 1:24.

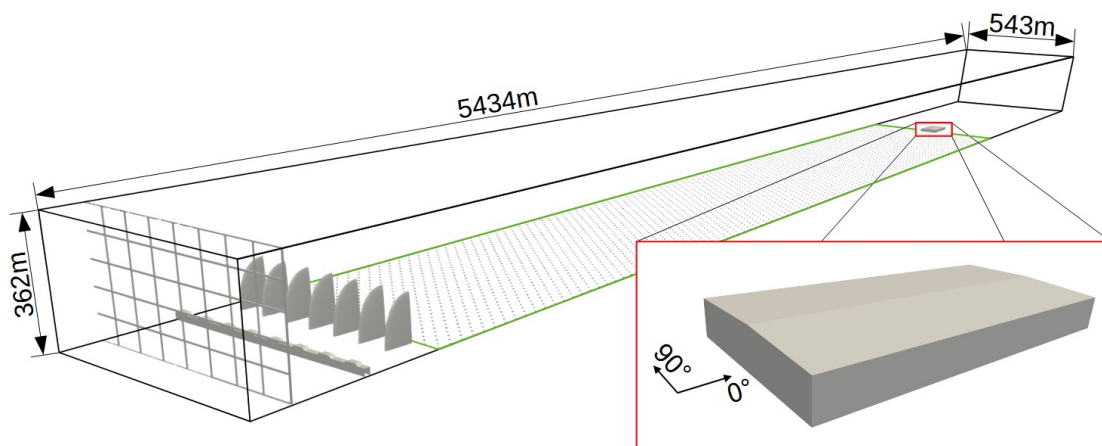


Figura 2 – Dimensões do túnel de vento digital com elementos de rugosidade e posição do galpão, em unidades de escala real.

Utilizou-se como condição de contorno na entrada do domínio um escoamento turbulento proveniente de uma simulação precursora com plano liso. Por meio da utilização de elementos de rugosidade com altura de 2,80m e com distanciamento de 14,70m entre si, conforme apresentado na Figura 2, corrigiu-se as estatísticas da camada limite e obteve-se um perfil de

velocidade média e intensidade turbulenta compatível com a categoria II, como mostrado na Figura 3. A grade apresentada na Figura 2 foi utilizada para evitar a re-laminarização do escoamento nas regiões superiores da camada limite atmosférica, o que não é incomum de ocorrer quando se empregam modelos de dissipação numérica. Contudo, o padrão de escoamento típico de camada-limite atmosférica é gerado pelas torres elípticas e aletas de rugosidade. Utilizou-se uma malha estruturada cartesiana com refinamentos diferentes para cada região de interesse. No entorno do galpão estudado utilizou-se a malha mais refinada, com $H/\Delta x = H/\Delta y = H/\Delta z = 42$, onde H representa a altura do galpão. Foi resolvida uma amostragem de $600 \text{ CST} = H/U_H$ (escala de tempo convectiva), em que U_H é a velocidade média do vento na altura H , com passo de tempo igual a $\text{CST}/1060$. O controle da escala do problema foi realizado por meio do número de Reynolds, definido como $H \cdot U_H / \nu$, em que ν é a viscosidade cinemática do ar. Para as simulações realizadas utilizou-se um número de Reynolds igual a $8,34 \times 10^4$, igual ao da solução experimental. Enquanto na solução experimental a escala de comprimento (H) é reduzida em relação à escala real, na solução numérica optou-se por reduzir a escala de velocidade (U_H). Cada simulação levou aproximadamente 4 horas de processamento em uma GPU Nvidia Tesla V100 SXM2 16GB.

Realizou-se a análise de três direções de incidência de vento sobre o galpão: 0° , 45° e 90° , em conformidade com o sistema de referências indicado na Figura 2. Devido à simetria da geometria e do escoamento é possível utilizar tais resultados como representativo de todas as incidências entre 0° e 360° com incrementos de 45° .

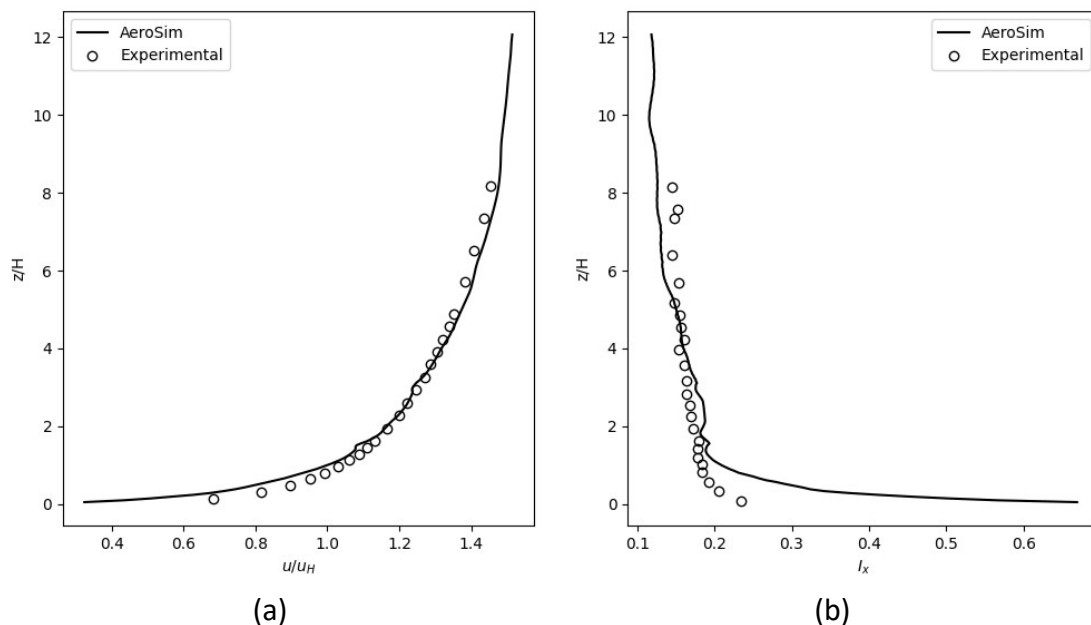


Figura 3 – Comparativo entre os perfis verticais de (a) velocidade média e (b) intensidade turbulenta obtidos experimentalmente e numericamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparativo numérico-experimental

As Figuras 4.(a) e 4.(b) apresentam um mapa de cores das pressões médias indicando as zonas de sobrepressão e sucção para as incidências de vento de 0° e 45°, respectivamente. Nas figuras as cores em tons de vermelho indicam zonas de sobrepressão, enquanto zonas azuladas indicam sucção. É possível observar que em ambos os casos ocorre sobrepressão nas faces frontais exposta à barlavento e sucção em todas as demais faces. No caso da incidência oblíqua tem-se duas faces posicionadas à barlavento, de forma que a sobrepressão se estende também para a parede lateral do galpão. Observa-se, também, que nas bordas posicionadas à barlavento, altas sucções são aferidas, devido à existência de separação do escoamento, ou formação de vórtices cônicos nessa região. No restante da cobertura, tem-se uma grande zona de leve sucção. O fenômeno descrito representa corretamente os padrões de escoamento avaliados experimentalmente [26-29].

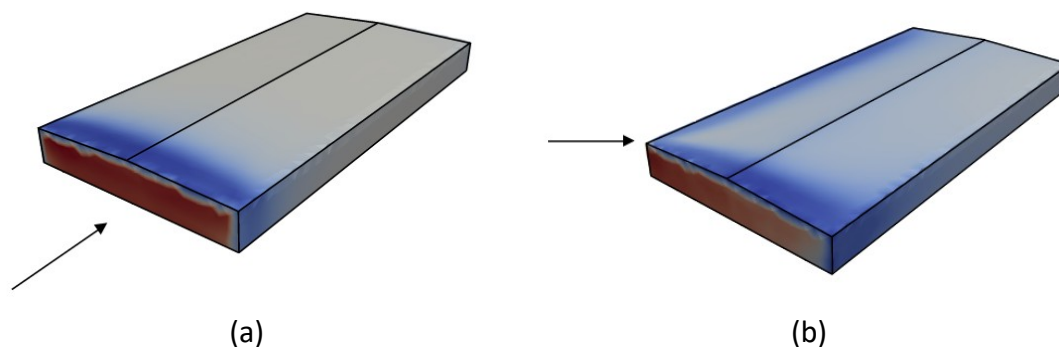


Figura 4 – Mapa de cores indicando as zonas de sobrepressão e sucção para vento com incidência de (a) 0° e (b) 45°.

As pressões são normalizadas conforme a definição de coeficiente de pressão, apresentada na Equação (5).

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_H^2} \quad (5)$$

Em que C_p é o coeficiente de pressão, p e p_∞ são a pressão medida e de referência, respectivamente. Ao se utilizar em p as pressões média, mínima, máxima e média quadrática da série histórica, obtêm-se os coeficientes de pressão correspondentes (médio, mínimo, máximo e rms).

As Figuras de número 5 a 8 apresentam um comparativo entre os coeficientes de pressão obtidos experimentalmente e numericamente. As medidas foram realizadas somente na cobertura, sendo uma linha de medidas localizada ao longo da cumeeira e outra transversal (de uma ponta a outra da cobertura). Nessas figuras, o lado (a) apresenta os coeficientes de

pressão mínimo, médio e máximo e o lado (b) apresenta o coeficiente médio quadrático (root mean squared, rms) das séries históricas. É possível se observar um bom nível de concordância entre os valores experimentais e numéricos.

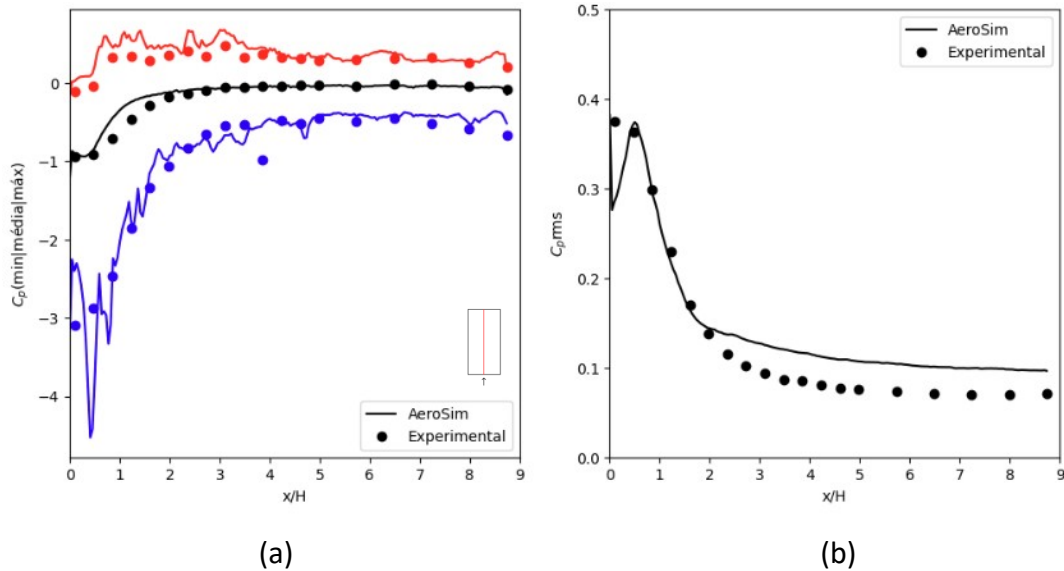


Figura 5 – (a) Coeficiente de pressão mínimo (azul), médio (preto) e máximo (vermelho) e (b) rms, ambos para o vento de incidência de 0°. Norma NBR-6123 (verde, tracejado) especifica o valor extremo mínimo. Leituras de pressão retiradas do telhado ao longo da cumeeira.

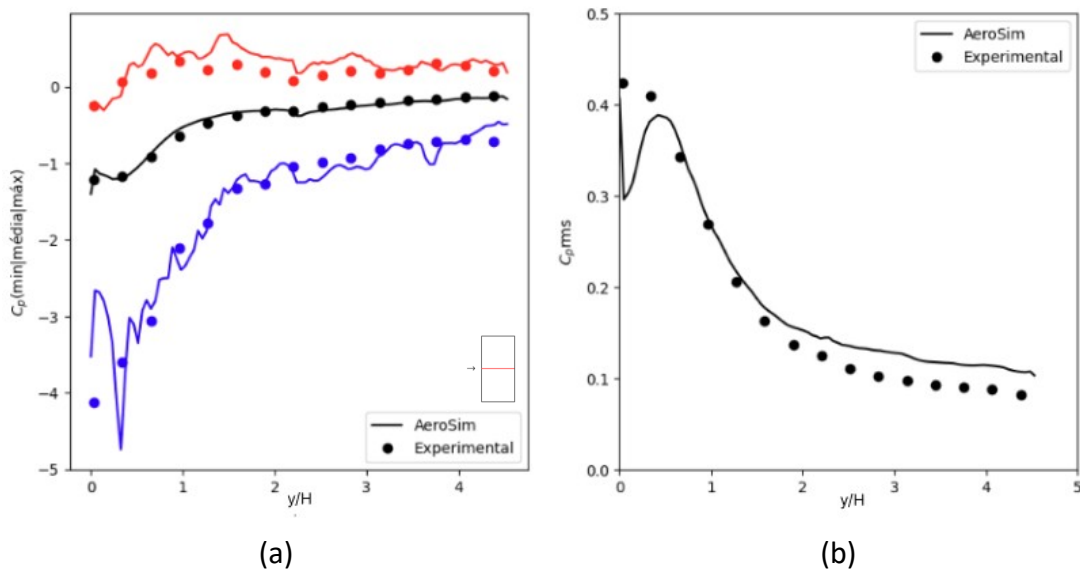


Figura 6 – (a) Coeficiente de pressão mínimo, médio e máximo e (b) rms, ambos para o vento de incidência de 90°. Norma NBR-6123 especifica o valor extremo mínimo. Leituras de pressão retiradas do centro do telhado em direção transversal à cumeeira.

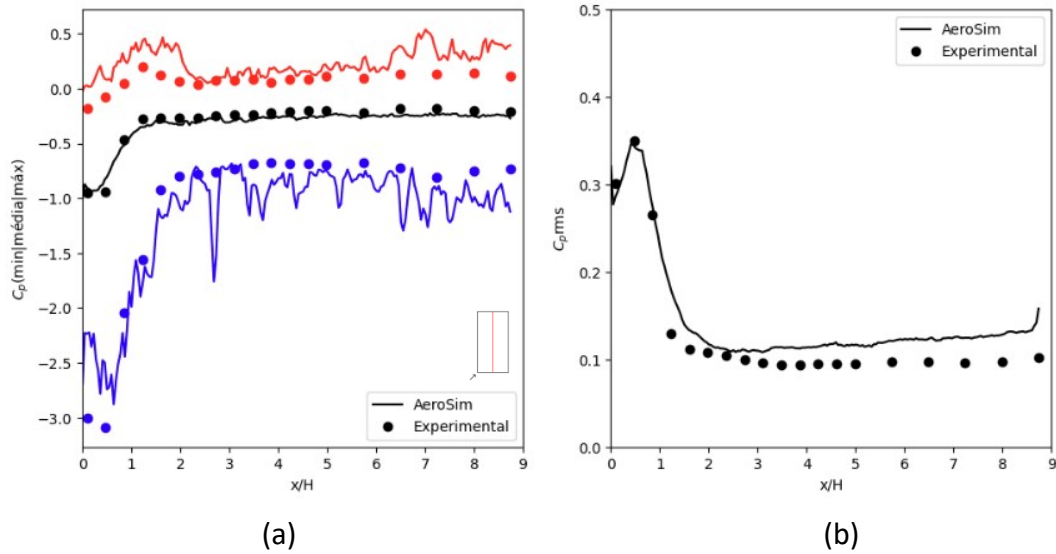


Figura 7 – (a) Coeficiente de pressão mínimo, médio e máximo e (b) rms, ambos para o vento de incidência de 45°. Leituras de pressão retiradas do telhado ao longo da cumeeira.

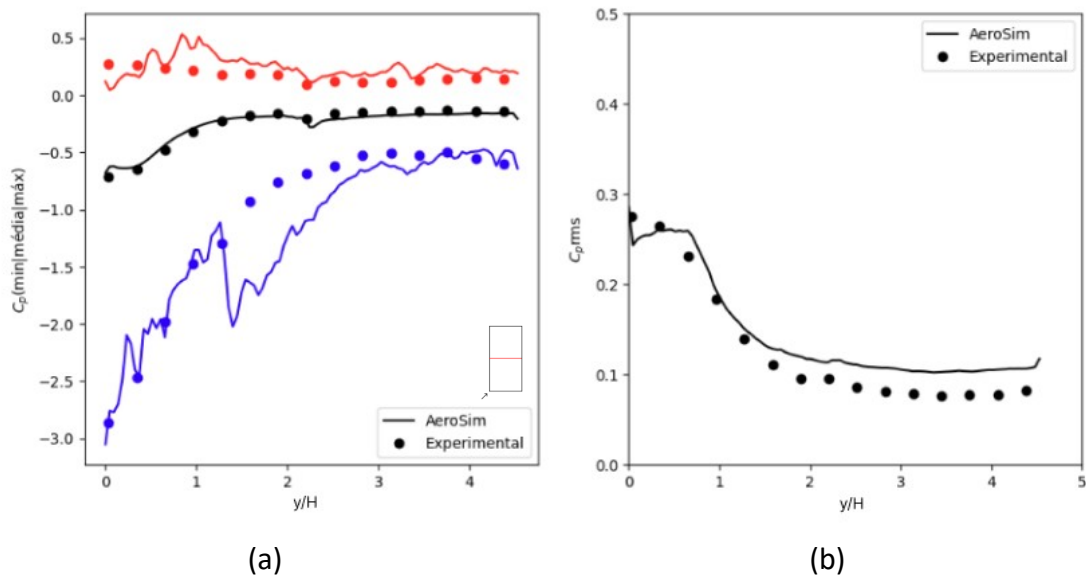


Figura 8 – (a) Coeficiente de pressão mínimo, médio e máximo e (b) rms, ambos para o vento de incidência de 45°. Leituras de pressão retiradas do centro do telhado em direção transversal à cumeeira.

3.2 Cálculo de cargas de projeto

As séries históricas de c_p são caracterizadas por picos de curta duração, os quais são determinantes para definir as cargas extremas para projeto. Os picos são mais acentuados para o caso de incidência de vento de 45° , o que se justifica pela existência de vórtices cônicos com alta velocidade de turbilhonamento, e zonas de sucção mais intensa do que nos casos das orientações aprumadas com o telhado. Pode-se observar nas Figuras 7 e 8 que no caso de incidência oblíqua os picos obtidos nas simulações excederam os valores experimentais. Isto provavelmente ocorreu devido à instabilidades numéricas que surgem na interferência de ondas de pressão no método LBM.

Uma vez que os valores de c_p max e min são dependentes da amostragem, podendo conter muita volatilidade, existem diferentes formas de definição dos valores de c_p extremos para projeto. No presente trabalho, utiliza-se o fator de pico, conforme apresentado na Equação (6).

$$\check{C}_p = \overline{C}_p - g C'_p \quad (6)$$

Em que \check{C}_p , \overline{C}_p e C'_p indicam os coeficientes de pressão extremo, médio e rms, respectivamente, e g indica o fator de pico, normalmente situado entre 3 e 4. O projeto de estruturas metálicas de cobertura é mais sensível aos esforços de sucção do que de sobrepressão. Portanto, somente os extremos de sucção são discutidos a seguir. Aplicando-se o cálculo da Equação (6), com fator de pico igual a 4 obteve-se os resultados apresentados na Figura 9, a qual também contém os valores indicado pela norma NBR 6123. Todos os coeficientes mostrados na Figura 9 foram ajustados para uma pressão dinâmica de 10 minutos.

Os comparativos apresentados nas Figuras 9.(a) e 9.(d) apontam que a norma NBR 6123 [1] representa bem a pressão de projeto (extremo de sucção) para o caso investigado, embora possa apresentar valores conservadores. Tal comportamento é esperado, pois, em primeiro lugar, a norma utiliza coeficientes de forma, que precisam ser seguros em toda a faixa abrangida pelas zonas. Em segundo lugar, a normatização deve ser capaz de generalizar o comportamento das cargas em geometrias variadas, devendo adotar uma postura conservadora mesmo em casos canônicos e bem documentados. A análise de túnel de vento (seja experimental ou digital), considera todas as particularidades da forma arquitetônica da edificação e do padrão do vento, inclusive quando é afetado pela vizinhança ou pela topografia, por isso seus resultados podem reduzir consideravelmente as incertezas nas cargas de vento para projeto. Devido ao baixo desvio observado do resultado numérico em relação ao experimental, conclui-se que a metodologia CFD-LES pode ser utilizada enquanto ferramenta complementar em estudos avançados, podendo oferecer resultados compatíveis com projetos de engenharia na análise estrutural de galpões.

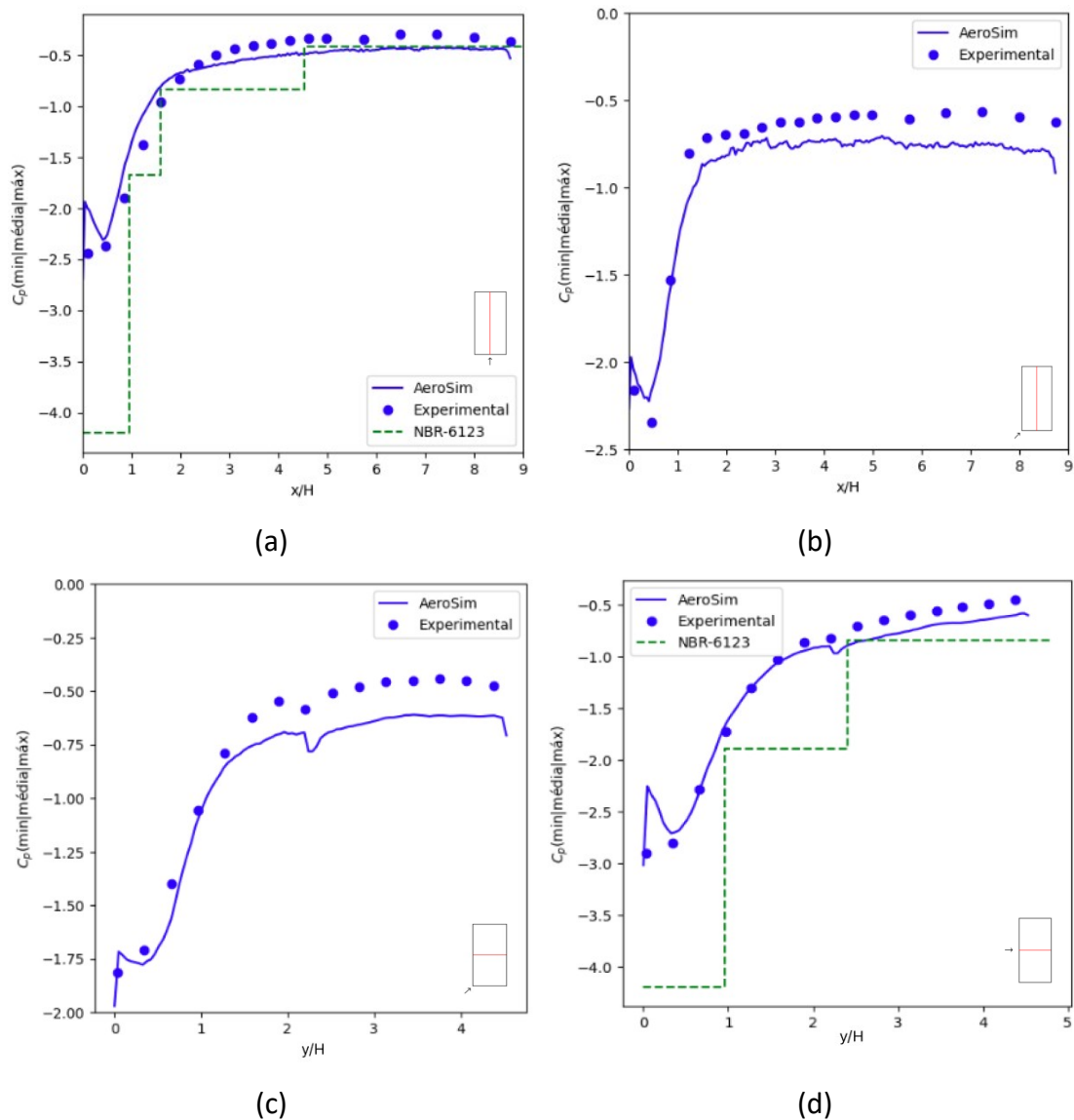


Figura 9 – Coeficientes de pressão mínima calculada a partir da equação (6), para vento com incidência de (a) 0° e (b)(c) 45° e (d) 90° . Leituras em direção (a)(b) paralela e (c)(d) ortogonal à cumeeira.

4 CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou um trabalho de validação de uma metodologia numérica CFD-LES para calcular as cargas de vento sobre a cobertura de uma edificação baixa. Foi possível reproduzir com boa precisão os resultados experimentais feitos em túnel de vento para um galpão duas águas padrão. Os valores médios de pressão não são apropriados para a determinação das cargas de vento para projeto de estruturas, por isso, empregou-se uma solução transiente de CFD que resolve a porção energética do espectro turbulento. Com isto, as cargas extremas, como mínimos e máximos e o desvio padrão (rms) são bem representados. Deve-se destacar a ressalva de que as simulações estacionárias em CFD (ex.: RANS) são muito

mais difundidas no mercado do que a solução empregada neste trabalho. Porém, as simulações estacionárias não são apropriadas para capturar os picos de pressão que geram os esforços extremos.

Devido à grande implementação do método LBM em um ambiente de alto desempenho de computação em GPUs, foi possível realizar as simulações apresentadas nesse trabalho em apenas 4 horas de máquina por direção de incidência de vento. Este tempo é considerado excelente para o referencial de simulações LES na engenharia, que costuma levar dias de processamento. Dessa maneira, conclui-se que a técnica apresentada no presente artigo pode ser utilizada de forma viável para complementar as soluções analíticas para cargas de vento, quando as mesmas apresentarem limitações que podem acarretar em grandes incertezas de projeto. A flexibilidade fornecida pela modelagem computacional permite que se avaliem com segurança cargas de vento em condições de um entorno complexo, como prédios vizinhos, morros ou taludes.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123: Forças Devidas ao Vento. Rio de Janeiro. 1988.
- 2 Holmes JD. Wind Loading of Structures. Third Edition. Taylor & Francis Group, LLC; 2015.
- 3 Thordal MS, Bennetsen JC, Holger H, Koss H. Review for practical application of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2019; 186 (2019); 155-168.
- 4 Kataoka H, Ono Y, Enoki K. Applications and prospects of CFD for wind engineering fields. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2020; 205.
- 5 Durbin PA, Pettersson Reif BA. Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows. John Wiley & Sons, Ltd; 2011.
- 6 Tannehill JC, Anderson DA, Fletcher RH. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Second Edition. Taylor & Francis; 1997.
- 7 Xing J, Patruno L, Pozzuoli C, Pedro G, de Miranda S, Uebertini F. Wind Loads Prediction using LES: Inflow Generation, Accuracy and Cost Assessment for the Case of Torre Gioia 22. Engineering Structures. 2022; 262.
- 8 Zheng X, Montazeri H, Blocken B. CFD Analysis of the Impact of Geometrical Characteristics of Building Balconies on Near-Façade Wind Flow and Surface Pressure. Building and Environment. 2021; 200.
- 9 Ong R H, Patruno L, Yeo D, He Y, Kwok KC. Numerical simulation of wind-induced mean and peak pressures around a low-rise structure. Engineering Structures. 2020; 214.

- 10 Aly AM, Zaroudi HG. Peak pressures on low-rise buildings: CFD LES versus full-scale and wind tunnel measurements. *Wind and Structures*. 2020; 30(1); 99-117.
- 11 Thordal MS, Bennetsen JC, Capra S, Kragh AK, Koss HHH. Towards a standard CFD setup for wind load assessment of high-rise buildings: Part 1 – Benchmark of the CAARC building. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2020; 205.
- 12 Thordal MS, Bennetsen JC, Capra S, Kragh AK, Koss HHH. Towards a standard CFD setup for wind load assessment of high-rise buildings: Part 2 – Blind test of chamfered and rounded corner high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2020; 205.
- 13 Han M, Ooka R, Kikumoto H. Validation of lattice Boltzmann method-based large-eddy simulation applied to wind flow around single 1: 1: 2 building model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020; 206.
- 14 Xing F. Experimental and Numerical Investigation of Wind Flow Around Gable Roof Low-Rise Buildings With Different Geometries. Doctorate thesis. Faculty of Engineering and Information Technologies The University of Sydney; 2019.
- 15 Ricci M, Patruno L, de Miranda S. Wind loads and structural response: Benchmarking LES on a low-rise building. *Engineering Structures*. 2017; 144; 26–42.
- 16 Richards P, Norris S. LES modelling of unsteady flow around the Silsoe cube. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 2015; 144; 70–78.
- 17 Nozawa K, Tamura T. Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 2002; 90; 1151–1162.
- 18 Kumar KS, Stathopoulos T. Computer simulation of fluctuating wind pressures on low building roofs. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. 1997; 69:485-95.
- 19 Moukalled F, Mangani L, Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®*. Springer International Publishing Switzerland; 2016.
- 20 de Oliveira Jr WB, Lugarini A, Franco AT. Performance analysis of the lattice Boltzmann method implementation on GPU. In *Proceedings of the XL Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Natal, Brazil 2019 Nov* (pp. 11-14).
- 21 Krüger T, Kusumaatmaja H, Kuzmin A, Shardt O, Silva G, Viggen EM. *The lattice Boltzmann method*. Springer International Publishing. 2017;10(978-3):4-15.
- 22 Dong YH, Sagaut P. A study of time correlations in lattice Boltzmann-based large-eddy simulation of isotropic turbulence. *Physics of Fluids*. 2008; 20(3).



- 23 Peskin CS. The immersed boundary method. *Acta numerica*. 2002;11:479-517.
- 24 Ho TCE, Surry D, Morrish D. NIST/TTU cooperative agreement—windstorm mitigation initiative: Wind tunnel experiments on generic low buildings. London, Canada: BLWTSS20–2003, Boundary-Layer Wind Tunnel Laboratory, Univ. of Western Ontario. 2003.
- 25 Ho TCE, Surry D, Nywening M. NIST/TTU cooperative agreement—Windstorm mitigation initiative: Further experiments on generic low buildings. BLWTSS21-2003, Phase. 2003; 2.
- 26 Alrawashdeh H, Stathopoulos T. Wind pressures on large roofs of low buildings and wind codes and standards. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015 Dec 1;147:212-25.
- 27 Stathopoulos T. Wind loads on low buildings: in the wake of Alan Davenport's contributions. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. 2003 Dec 1;91(12-15):1565-85.
- 28 Stathopoulos T. Wind loads on low-rise buildings: a review of the state of the art. *Engineering Structures*. 1984 Apr 1;6(2):119-35.