ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Avaliação da predição de coeficientes de pressão para Edifício em H usando simulações CFD RANS

Assessment of The Wind Pressure Coefficient Data Prediction on H-Shape Buildings Using RANS CFD Simulations

Talita Andrioli Medinilha de Carvalho
Universidade Estadual de Campinas | Campinas | Brasil | talitamedinilha@gmail.com
Juan M Gimenez
Centro de Investigación de Métodos Computacionales | Santa Fe |Argentina
Institute of Construction and Building Materials | Darmstadt | Germany | jmgimenez@cimne.upc.edu
Facundo Bre
Centro de Investigación de Métodos Computacionales | Santa Fe |Argentina
Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria | Barcelona | Spain | bre@wib.tu-darmstadt.de
Lucila Chebel Labaki
Universidade Estadual de Campinas | Campinas | Brasil | lucila@fec.unicamp.br

Resumo

A simulação *Airflow Network* (AFN)/*Building Energy Simulat*ions (BES) é muito usada para incluir os efeitos da ventilação natural em análises de conforto térmico e eficiência energética. Para isso os coeficientes de pressão (Cp) são um dado de entrada importante; embora esta informação possa ser obtida através de Simulações fluidodinâmicas (CFD), estas podem apresentar incertezas, além disso, alguns modelos de cálculos podem demandar um longo tempo de processamento, como o LES (*Large Eddy Simulation*). A planta em formato de "H" é bastante usada em projetos arquitetônicos, sendo o estilo mais comum em residenciais multifamiliares de interesse social no Brasil. Este trabalho buscou avaliar a precisão da simulação CFD usando modelos de turbulência *Reynolds-averaged Navier–Stokes* (RANS: K-ω SST e RNG k-ε) para prever o valor de Cp para prédios baixos (até 4 pavimentos) e formato de "H". Foram realizadas simulações CFD usando a plataforma CpSimulator e experimentos com modelos em escala 1:60 em túnel de vento (Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lisboa) para 20 ângulos de ataque do vento, reproduzindo uma camada limite atmosférica compatível com a suburbana (α=0,23). Em suma, todos os modelos de turbulências testados apresentam boa concordância com os resultados do experimento (coeficiente de determinação R2=0.9).

Palavras-chave: Edifícios em H, Coeficiente de pressão, Ventilação natural, *Building Performance Simulation* (BES), Simulações fluidodinâmicas (CFD).

Como citar:
CARVALHO, T. A. M. et. al. Avaliação da predição de coeficientes de pressão para Edifício em H usando simulações CFD RANS. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

Airflow Network (AFN)/Building Energy Simulations (BES) is a common approach to include natural ventilation effect in the thermal comfort and energy usage analyzes. For this method the Wind Pressure Coefficient (Cp) is an important input; although this information can be found though Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, it can carry some uncertainties, also some calculation models can be time consuming, such as the LES (Large Eddy Simulation). The "H" floor plan is frequently used in residential design, and in Brazil it is common for social housing porpoise. This work objective is to evaluate the accuracy of RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) CFD simulations (K-ω SST and RNG k-ε) in predicting Cp for a low-rise (up to 4 floors) and H-shaped model. There were performed CFD simulations (Cp simulator) and Wind Tunnel experiments (LNEC -Lisbon) for 20 wind attack angles, reproducing an atmospheric boundary layer consistent to the suburban condition (α=0,23). Overall, the CFD turbulence models analyzed are in good agreement with the wind tunnel results (R^2=0.9)..

Keywords: H-shaped buildings. Wind pressure coefficients. Natural ventilation. Building Performance Simulation. Computational Fluid Dynamics (CFD).

INTRODUÇÃO

A ventilação natural é uma importante estratégia passiva para se atingir a eficiência energética e desempenho térmico dos edifícios. Seus benefícios podem ser divididos em duas categorias: conforto térmico e saúde [1]. Esta estratégia permite resfriar naturalmente o ambiente, sendo uma variável climática que contribui para o conforto térmico dos usuários [2]. A ventilação também permite a troca de ar reduzindo a concentração de CO_2 e patógenos do ar [3], desta maneira melhora a qualidade do ar interno e reduz o espalhamento de doenças transmitidas pelo ar [4][5]. Este atributo é de grande relevância para climas quentes e frios, e esteve em evidência nos últimos anos devido a consciência trazida pela pandemia do COVID-19 [6].

A simulação do tipo *Airflow Network* (AFN) acoplada a *Building Energy Simulations* (BES) é um método simplificado para avaliar o efeito da ventilação natural no consumo energético e conforto térmico, e tem sido adotadas por muitos pesquisadores da área do conforto térmico [7]. Embora este seja um método aceito no meio acadêmico, este requer o conhecimento dos coeficientes de pressão do vento (Cp) como um dos dados de entrada para o programa [8] e a precisão deste é essencial para acuidade dos resultados finais [9].

Bases de dados de Cp são um método conveniente e rápido para se obter esta informação, porém elas tratam em grande parte de edifícios genéricos e retangulares [10]. Alternativas para se obter dados de Cp precisos para formas irregulares são: experimentos em túnel de vento e simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics / Simulações fluidodinâmicas*). Ambos os métodos são adequados para realizar estudos sobre a ventilação em um cenário urbano, desde que eles estejam configurados para reproduzir a camada limite atmosférica desejada (ABL, *Atmospheric boundary layer*) [11][12]. Uma vantagem de experimentos em túneis de vento é que a física da fluidodinâmica é considerada precisa, por outro lado o CFD é uma predição numérica dessas condições o que pode trazer algum nível de incerteza [7]. Por outro lado, experimentos em túnel de vento levam em torno de 2 semanas a um mês para serem realizados [13] e dependem de equipamentos raros . Já, usando o CFD é possível chegar a um nível de refinamento maior da grade de pontos medidos *(grid)* [7]. Por

esta razão, é recomendado usar dados de experimentos em túnel de vento como referência para validar a simulação CFD, assim garantindo precisão dos resultados [14][9][7].

O método mais preciso para simular a ventilação de formas irregulares em CFD é o *Large Eddy Simulation* (LES), porém, ele leva muito mais tempo para computar os resultados que outros modelos, como o *Reynolds-averaged Navier–Stokes* (RANS), por exemplo. Para formas complexas e irregulares o primeiro modelo (LES) pode levar um mês para com para obter resultados enquanto o outro levaria um dia (RANS), assim o LES se torna inacessível para usos que não sejam acadêmicos [15].

Uma planta irregular comum na construção civil é a planta em formato de “H”, frequentemente usada em edifícios comerciais e residenciais [16][17]. No Brasil, essa configuração é predominantemente aplicada em edifícios de baixa altura, sendo a mais adotada em habitações multifamiliares de interesse social [18]. Nos últimos anos, o país investiu pesadamente nesse tipo de habitação, financiando 3,828,054 unidades habitacionais entre 2009 e 2020 através do programa Minha Casa Minha Vida [19]. Entretanto, estudos indicam que esses edifícios podem apresentar uma ventilação abaixo da ideal [20][21]. Um exemplo alarmante foi observado durante um surto de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS) na China, onde foi registrado um número maior de mortes em edifícios com formato de 'H' em comparação com outras configurações [21][22].

Neste sentido, [16] observou que, em edifícios altos com planta em 'H', a largura do recuo tem um papel crucial na flutuação do vento dentro da cavidade, mas apenas quando os ventos incidem a 90°. Em outras direções, o recesso não teve efeito significativo nas cargas induzidas pelo vento [16]. Este fenômeno pode ser explicado pela proporção do edifício; em edifícios altos, o recesso torna-se estreito e pode ter menos influência do que em edifícios baixos [13]. Além disso, quando os ventos incidem a 0°, cavidades largas são melhor ventiladas, enquanto ventos a 90° favorecem cavidades rasas [23]. Também foi identificado que cavidades perpendiculares à direção do vento apresentam baixo fluxo de ar, assim favorecendo o espalhamento de doenças transmitidas pelo ar e aumentando o risco em incêndios [21]. Todos esses pontos indicam a relevância de avaliar precisamente a ventilação por ação dos ventos em edifícios com esta planta.

Esse trabalho tem o objetivo de avaliar a precisão de modelos de turbulência RANS (k-ω SST e RNG k-ε) em prever o Cp para edifícios de baixa altura (até 4 pavimentos). Este modelo de referência passou por testes anteriores em túnel de vento adotando uma camada limite suburbana (α=0,23) [13]. As simulações CFD foram configuradas de maneira a reproduzir as especificações do experimento com relação a escala e perfil de velocidade da camada limite.

As discussões apresentadas nesse artigo são valiosas para pesquisadores que se especializam em simulação CFD, reduzindo as incertezas da aplicação do método em edifícios irregulares, incluindo análises sobre a acuidade dos modelos e turbulência testados com relação os casos estudados. Também, foi disponibilizado neste trabalho um detalhamento da distribuição de pressão em edifícios de baixa altura com planta “H” (ver MATERIAL COMPLEMENTAR), apresentando uma variedade de proporções e

direções do vento; este material é de grande importância para usuários de programas do tipo BES e AFN.

MÉTODO

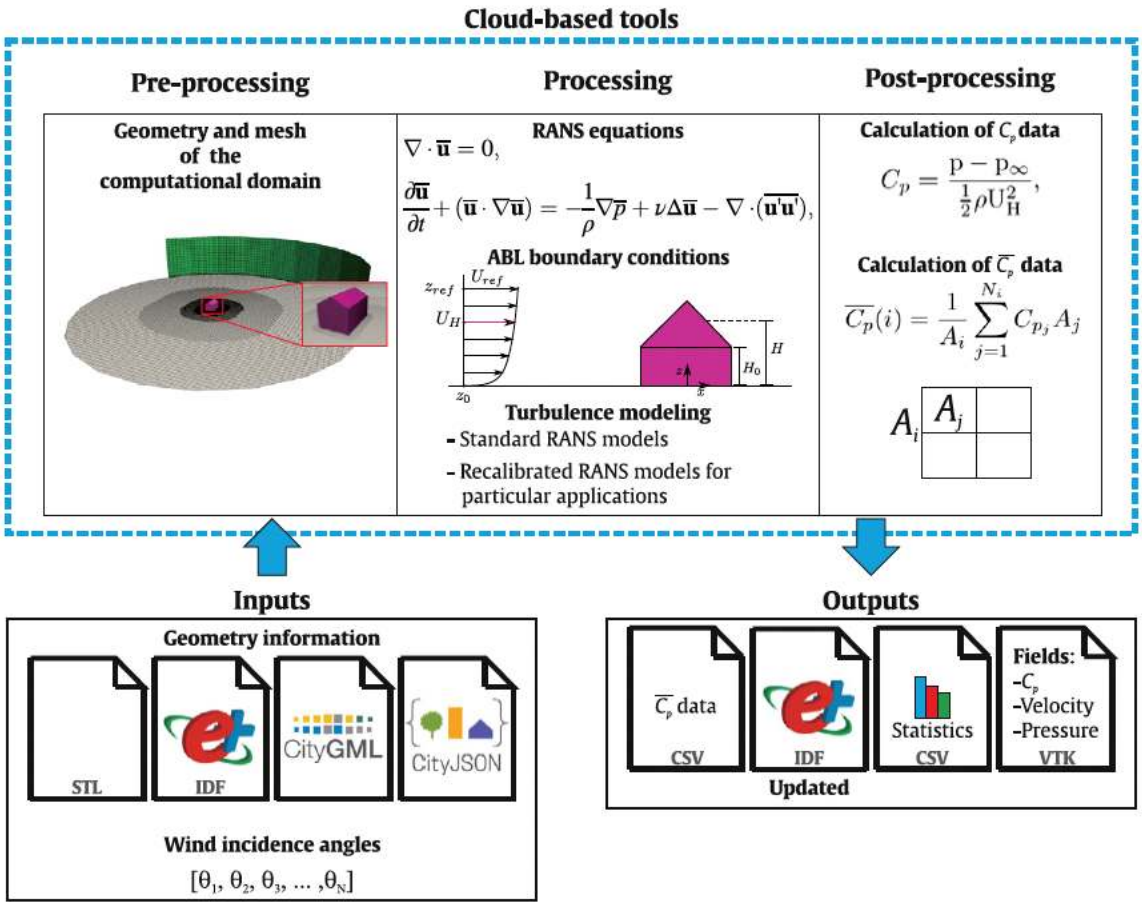
Nesta seção serão descritas as instalações do túnel de vento e especificações das simulações CFD (plataforma web CpSimulator), detalhes sobre os estudos de casos (dimensões e escala), condições de simulação (velocidade, ângulo de ataque do vento, perfil ABL) e manipulação de dados (cálculo de Cp e métodos estatísticos).

A pesquisa se deu em três passos, primeiro (1) foram conduzidos os experimentos em túnel de vento: os modelos físicos foram construídos com PVC de 4 mm e os sensores de pressão foram instalados (PSI® DTC *miniature ESP pressure scanners*), e então, foram feitos os testes no túnel de vento. Então as (2) simulações CFD foram implementadas usando dois modelos de turbulência. Os modelos digitais (Input Data File, IDF) foram construídos usando o programa Sketchup e a extensão Euclid, então o perfil da ABL foi configurado para equivaler aos valores medidos em túnel de vento, em seguida as simulações foram iniciadas. Por fim, (3) os dados foram processados utilizando a linguagem de programação Python: incluindo a manipulação de dados e geração de estatísticas e gráficos.

O túnel de vento utilizado para o experimento se localiza no Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil), em Lisboa – Portugal; as dimensões da seção de teste são 9,0 m por 3,1 m (comprimento e largura, respectivamente) e a altura de 2,0 m. A ABL foi configurada como suburbana usando elementos de rugosidade triangulares e cúbicos instalados na primeira seção do túnel de vento (geradores de vórtices de Couhinan). O perfil de velocidade gerado foi medido com o túnel de vento sem o modelo utilizando um tubo pitot (à 40 cm para o lado do centro da mesa giratória). Detalhes sobre o experimento do túnel de vento podem ser encontrados em [24][13], incluindo detalhes técnicos e imagens dos modelos, equipamentos e túnel de vento.

As simulações CFD foram realizadas utilizando o CpSimulator, uma ferramenta online que usa o programa OpenFOAM prever o CP de um modelo de forma automatizada considerando uma ABL determinada [25]. Para esta etapa foram fornecidos como dados de entrada: a geometria do estudo de caso (IDF), as coordenadas dos pontos de medição e o perfil da ABL (a partir dos dados do experimento em túnel de vento). Então, com esta informação a plataforma foi programada para realizar as simulações em CFD e retornar os dados de Cp desejados. O fluxo de trabalho do CpSimulator consiste em: pré processamento, processamento, e pós processamento (ver Figura 1).

Figura 1. Fluxo de trabalho e componentes chaves do CpSimulator.



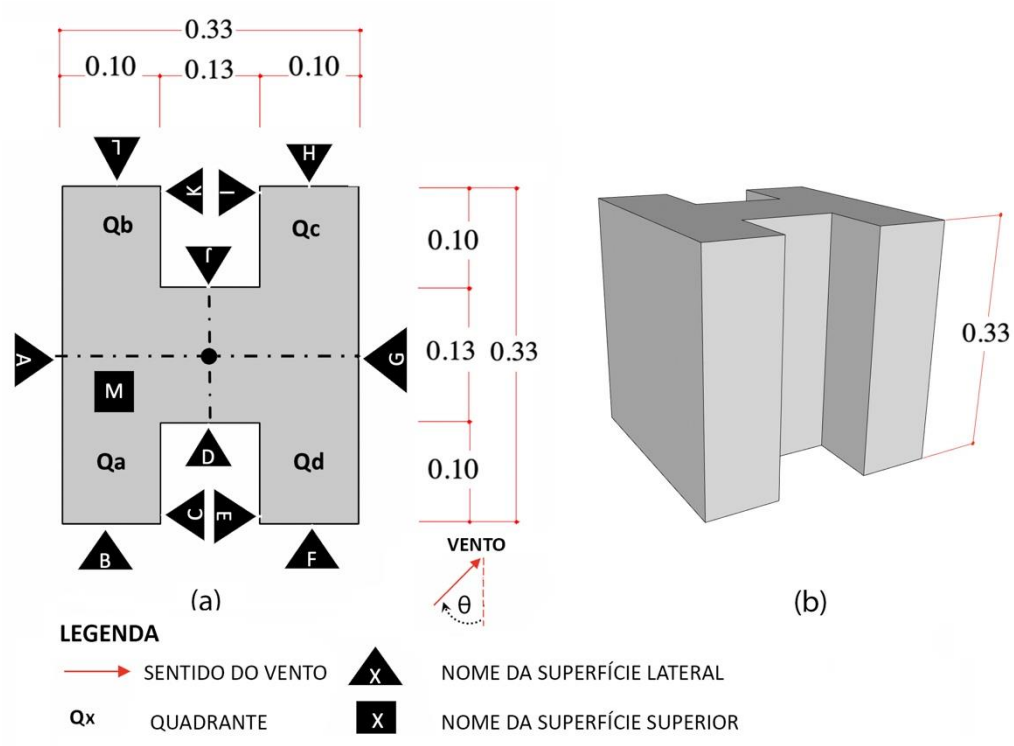
Fonte: [25]

O domínio computacional foi configurado como um polígono de 24 lados, sendo H = altura do modelo, a distância do modelo até limite lateral/superior foi de 5H, o limite lateral a sotavento está a 15H do modelo [26]. A malha escolhida foi a hexaédrica com pelo menos 20 células por direção e, como este modelo apresenta formato não convexo, o nível geral de refinamento é aumentado e a assimetria (*skewness*) máxima foi de 4 nas faces internas e 20 nas faces do perímetro (seguindo as recomendações de refinamento de [27]).

Com propósito de identificar a configuração de simulação mais adequada aos casos estudados, dois modelos de turbulências foram testados: *Re-Normalisation Group* (RNG k-ε) e k- ω *Shear Stress Transport* (k-ω SST).

A escala do modelo foi definida como 1:60 por ser a maior escala possível, dado o limite de 5% de obstrução permitido para experimentos em túnel de vento e visando ter mais espaço para se instalar os sensores. Esta escala foi mantida na simulação CFD para garantir a reprodução dos fenômenos físicos ocorridos no experimento. Suas dimensões são descritas na Figura 2 (em escala real: altura = 20 m e largura = 20 m), assim a relação altura/largura (*height-to-width*) do modelo é 1, configurando um edifício de baixa altura [28]. Destaca-se que os pontos de tomada de pressão na simulação do CFD foram os mesmos que os medidos em túnel de vento, a posição destes pode ser encontrada em [24][13].

Figura 2. Caracterização geométrica do modelo em H em metros: (a) planta baixa, divisões dos quadrantes, e nome das superfícies (sem escala); (b) modelo 3D.



IMPLEMENTAÇÃO

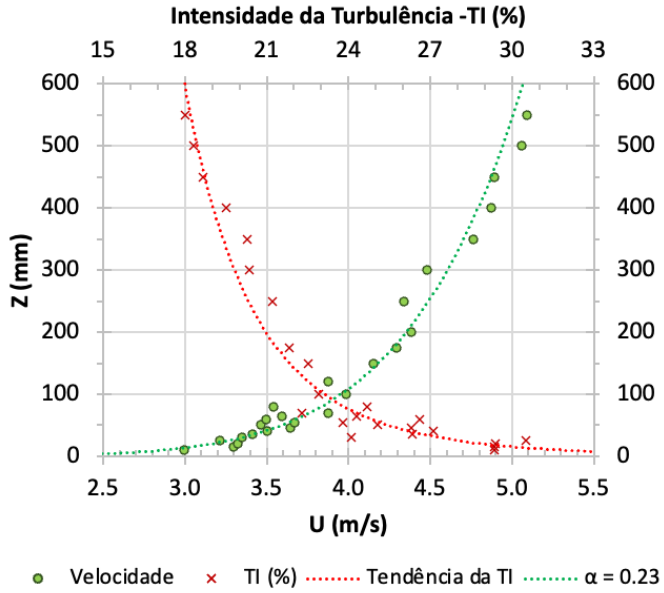
O procedimento, tanto para o experimento em túnel de vento quanto para as simulações em CFD, serão definidos nesse item. A velocidade média à altura do modelo foi de 4.5 m/s. A incidência do vento foi de 0º, 10º, 20º, 30º, 45º, 60º, 90º, 120º, 135º, 150º, 160º, 170º, 180º, 225º, 270º, 300º, 315º, 330º, 340º, 350º (em sentido horário como mostrado na Figura 2). Na sequência serão descritas as configurações do perfil da ABL, bem como o método de cálculo usado para se obter os valores de Cp.

A ABL usada foi a suburbana como mostra Figura 3 que foi reproduzida no túnel de vento colocando elementos de rugosidade espirais e cúbicos próximo à região de entrada de ar (primeira sessão do túnel). Já na simulação em CFD, foi usado o coeficiente potencial α (adimensional) de 0.23 para ajustar as velocidades da ABL às medidas no experimento, este coeficiente foi determinado pela equação 1 (referência U_s = 4 m/s, Z_s= 0.2 m), definida como:

$$U = U_s (Z/Z_s)^{\alpha} \quad (1)$$

onde U [m/s] é a velocidade do ar a altura Z [m] de um ponto determinado; U_s [m/s] é a velocidade do ar altura Z_s [m] (altura de referência); e α é o coeficiente potencial e adimensional. O Número de Reynolds (Re) mínimo é 2.4×10^4 , tomando como referência altura do modelo.

Figura 3. Perfil da ABL: intensidade da turbulência e velocidade.



*A tendência de potência foi aplicada.

O Cp é o coeficiente a dimensional de pressão calculado como segue:

$$Cp = P_x - P_{ref}/(U_h^2/2) \quad (2)$$

Onde P_x [Pa] é a pressão estática na face do edifício, P_{ref} [Pa] é a pressão estática de referência, e U_h [m/s] é a velocidade do ar (tomada altura do edifício a barlavento em um ponto não perturbado do domínio).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados desse estudo serão apresentados nesta sessão, os dados calculados pela simulação em CFD serão comparados com os medidos em túnel de vento. Primeiro, o Cp médio (media simples de cada superfície) será analisado para todos os ângulos estudados, então as análises estatísticas serão mostradas juntas ao gráfico de dispersão, por último, serão apresentadas as isolinhas de pressão do modelo de turbulência com melhor performance.

Analisando a média de Cp das faces (Figura 3), em geral, as maiores diferenças foram encontradas nos valores abaixo de zero, foram em média 0,2 mais baixos (detalhes estatísticos sobre a confiabilidade entre os resultados serão apresentados a seguir). Apesar disso, ambos modelos de turbulência demonstraram boa capacidade em prever as médias dos valores, não apresentando diferenças expressivas entre si, exceto nestes pontos.

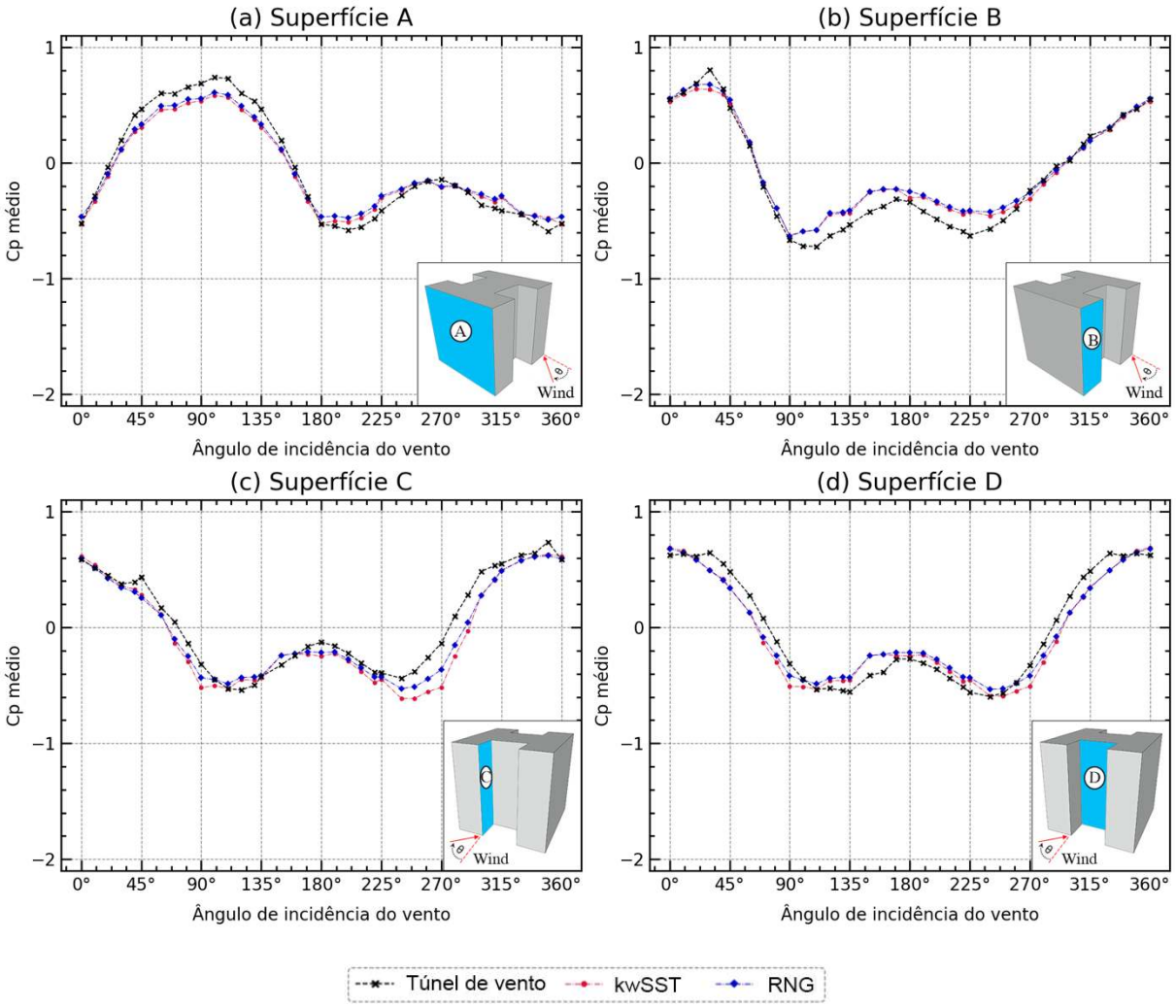
Para a superfície A (Figura 3-a) o CFD performou melhor nas incidências de vento 0º, e de 180º a 360º (quando a superfície está à sotavento); já entre 45 e 135º todos os

modelos subestimaram os valores de Cp em aproximadamente -0,2. Indicando que em situações mais complexas a similaridade dos resultados pode ser reduzida.

Considerando a superfície B, (Figura 3-b) também houve bom desempenho, exceto entre os ângulos de 90 e 270º onde os valores foram superestimados em cerca de +0,2. Para a superfície C os resultados também foram semelhantes entre os modelos (Figura 3-c), ainda sim o modelo RNG k-ε apresentou um comportamento mais próximo ao medido (90º e 250º). Entre os ângulos de 45 e 315º todos os modelos subestimaram o Cp em cerca de -0,2, devido a complexidade do fluxo dado que a cavidade está paralela à incidência do vento e o movimento do ar ocorre por sucção. Pode-se observar que nos ângulos 0º e 360º as previsões são as mais próximas dos valores experimentais, pois a cavidade está na incidência direta do vento, sendo menos turbulenta.

As previsões do Cp para a superfície D (Figura 3-d) também estão de próximas as medições do túnel de vento, sendo o modelo RNG k-ε mais eficiente (as maiores diferenças se encontram nos valores mais negativos). Até 90º e após 250º incidência de vento todos os modelos previram um Cp -0,15 inferior ao medido; embora, entre 90 e 250º os valores calculados estavam 0,1 acima do esperado.

Figura 3. Comparação dos coeficientes de pressão médios das superfícies: dados do experimento em túnel de vento *versus* CFD (K-ω SST e RNG k-ε).

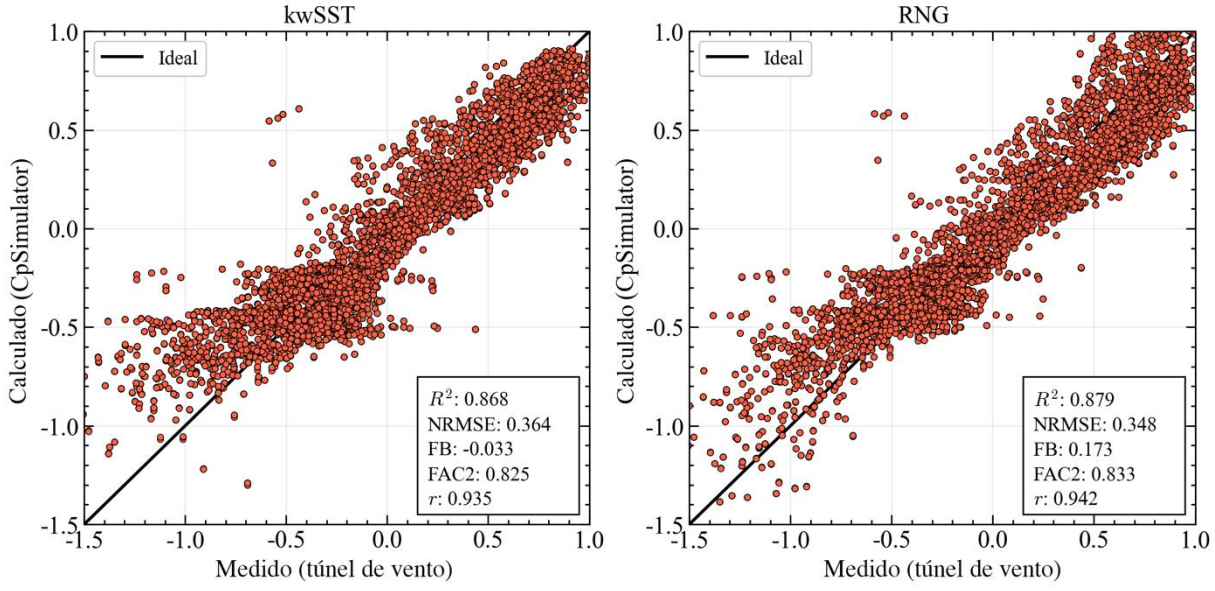


Para avançar a discussão sobre a eficiência de cada modelo em prever o Cp, os dados foram plotados como gráficos de dispersão (ponto a ponto) compilando os resultados de todos os ângulos de ataque do vento em uma imagem. Além disso, as seguintes métricas estatísticas foram aplicadas: coeficiente de determinação (R^2 - mede a proporção da variação nos dados), raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE- avalia a magnitude dos erros de previsão em relação à média observada), o viés fracionário (FB - tendência do modelo em superestimar ou subestimar os dados) e a fração das previsões dentro de um fator de 2 das observações (FAC2- Avalia a proporção de previsões que estão dentro de um fator de 2 dos valores observados), coef**ic**iente de correlação de Pearson (**r**- quantifica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis) [30]. Sendo seus valores ideais R^2=1, NRMSE= 0, FB=0 - 0.5, FAC2= 1 e r = 1 [30].

De modo geral, todos os gráficos mostram que os valores previstos se ajustam bem ao experimento como será demostrado a seguir e assim como já foi observado na Figura 3, as principais divergências estão nos valores abaixo de Cp -0,5, tendo sido calculado valores acima dos medidos (Figura 4). Embora existam pequenas diferenças entre os modelos, nota-se que o RNG k-ε apresenta a menor dispersão no gráfico e os pontos estão mais próximos da linha de referência ideal (linha preta - R^2=1), com poucos pontos divergentes. Além disso, existem incertezas em ambos métodos, no caso do túnel de vento existem limites à precisão, oque pode afetar muitas etapas do processo, como por exemplo a configuração do ângulo de incidência do vento.

Observando os valores das métricas estatísticas, os modelos apresentaram bons resultados, porem o RNG k-ε apresentou valores mais próximos do ideal (R2=0.9, FB=-0.03, FAC2= 0.8 e NRMSE= 0.3, r = 0.9), no geral. A exceção foi no valor de FB, onde o K-ω SST teve melhor desempenho estando mais próximo de zero, demonstrando a já observada tendência do modelo em superestimar os dados.

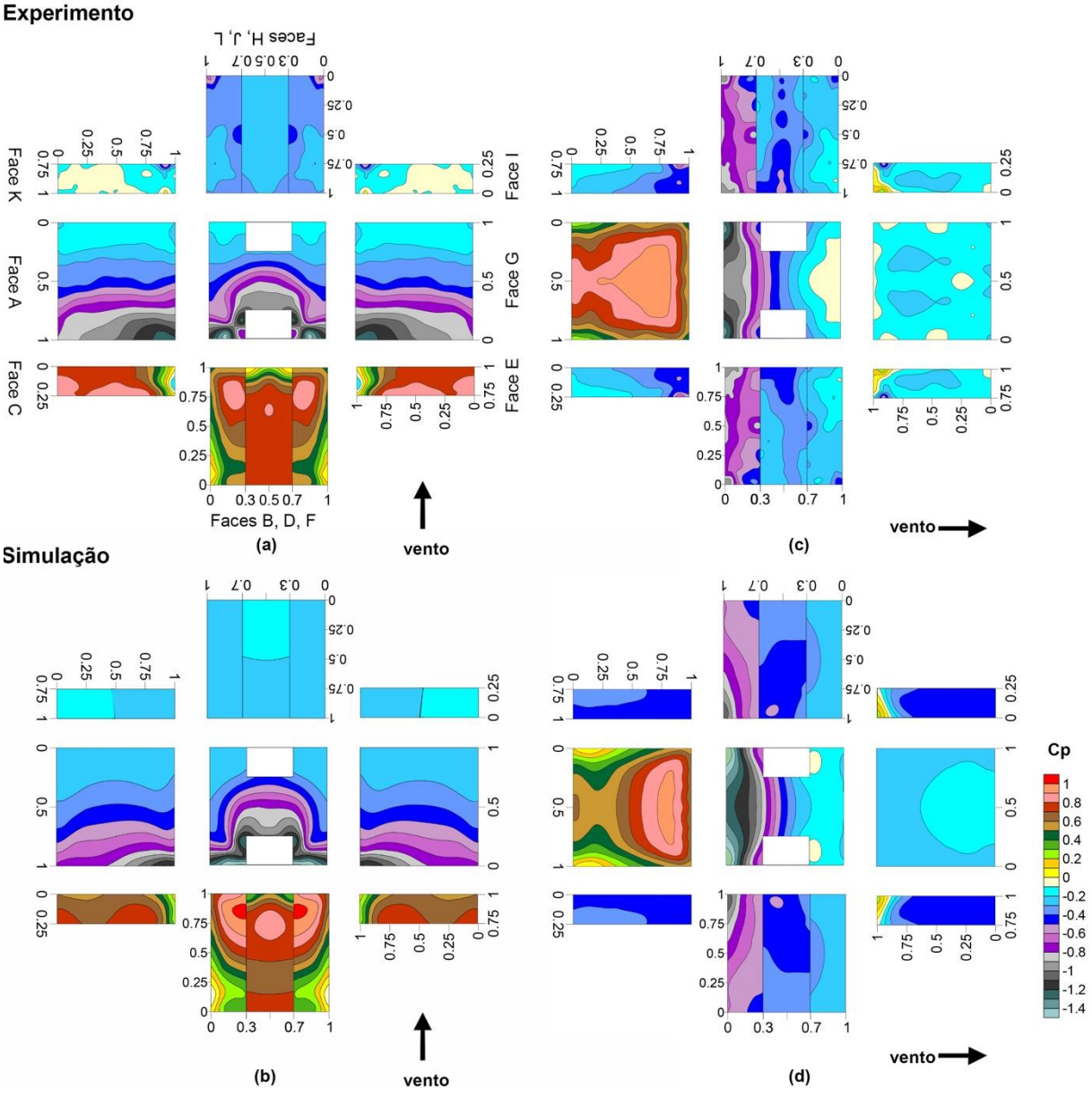
Figura 4. Gráfico de Dispersão de Cp: dados medidos em túnel de vento versus simulados em CFD.



* A linha preta contínua é uma referência e representa o ajuste ideal dos dados.

Então, para ilustrar a precisão da previsão do Cp, optamos por mostrar uma comparação entre os resultados experimentais e os dados numéricos calculados usando o modelo RNG k-ε (incidência do vento 0º e 90º), uma vez que teve melhor desempenho na análise anterior.

Figura 5. Isolinhas de Cp: dados experimentais ((a) 0º e (b) 90º) versus calculados com modelo RNG k-ε ((c) 0º e (d) 90º).



A Figura 5 mostra que nas as imagens de isolinhas o CFD continua a apresentar um comportamento semelhante ao experimental, apesar de se observar algumas discrepâncias, observando os valores médios apresentados anteriormente a predição apresenta bom desempenho. Nas superfícies a barlavento (considerando as duas incidências do vento), os valores foram subestimados pela simulação na porção inferior das superfícies (onde há um vórtice de recirculação devido à influência do solo [13]). Além disso, considerando as superfícies a sotavento com direção do vento de

90º, os valores previstos de Cp são mais baixos que os medidos. Por fim, as superfícies internas das cavidades apresentaram na simulação o mesmo comportamento do experimento, porém com uma sub predição (média superficial de -15%). Estes resultados confirmam as análises anteriores (apresentada na Figura 3 e Figura 4), demonstrando a eficácia do modelo RNG k-ε na predição do Cp.

CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar a eficiência da simulação CFD usando em prever o valor de Cp para prédios baixos e formato de "H" utilizando modelos de turbulência *Reynolds-averaged Navier–Stokes* (RANS: K-ω SST e RNG k-ε). Foram realizados experimentos em túnel de vento e simulações CFD (plataforma Cpsimulator), sendo em ambos considerada uma camada limite atmosférica suburbana.

Todos os modelos de turbulência CFD analisados nesta pesquisa apresentam boa concordância com os resultados do túnel de vento (R2=0.9 , FAC2= 0.8 e NRMSE= 0.3, r = 0.9), porém o RNG k-ε apresentou o melhor ajuste aos dados do experimento (FB=-0.03), enquanto o RNG k-ε demonstrou uma tendência do modelo em superestimar os dados. Em uma análise mais detalhada observa-se que existem algumas discrepâncias em ambos os modelos, com a sub previsão de alguns valores de Cp, principalmente em superfícies a sotavento.

Estas discrepâncias podem serem atribuídas às dificuldades dos modelos RANS em reproduzir situações de alta complexidade e/ou às incertezas de experimentos em túnel de vento. Nos dados experimentais, há um número limitado de pontos de medição (restrições físicas), possíveis imprecisões na reprodução dos fenômenos da dinâmica dos fluidos devido a redução de escala; também podem ocorrer pequenos no ajuste dos ângulos de incidência por serem posicionado manualmente.

Assim, pôde se concluir que a plataforma CpSimulator com os modelos de turbulência RANS padrões é adequada para calcular o Cp para edifícios baixos e com recuos côncavos, como o caso estudado; de maneira que é recomendado para resultados mais rápidos, pois possui um bom equilíbrio entre custo computacional e acuidade. Porém recomenda-se cautela ao considerar os valores a sotavento ou em regiões de alta complexidade, visto que ambos modelos previram valores mais baixos que os medidos.

Neste sentido, um novo modelo de turbulência k-ω SST foi recentemente desenvolvido pela equipe responsável pela plataforma CpSimulator visando resolver as limitações dos modelos atuais em prever os negativos valores de Cp [29]. Assim, em trabalhos futuros analisaremos a precisão deste modelo otimizado com o objetivo de gerar uma base de dados de Cp baseada em simulações de CFD.

MATERIAL COMPLEMENTAR

Para mais informações sobre os resultados do experimento em túnel de vento (mencionado na seção MÉTODO) está disponível em https://doi.org/10.5281/zenodo.8257276, acesso em 11-03-2024. Incluindo (i) valores

médios de Cp para todas as superfícies testadas (20 ângulos de ataque do vento) e (ii) coordenadas dos pontos de medição.

AGRADECIMENTOS

Agências de fomento.

REFERÊNCIAS

[1] GIVONI, B. **Energy and buildings**, 1992.

[2] PARKINSON, Thomas; DE DEAR, Richard; CANDIDO, Christhina. **Building Research & Information**, p. 1–14, 2015. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09613218.2015.1059653>. Acesso em: 16 jul. 2015.

[3] RIVERO, Roberto. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1986.

[4] RUDNICK, S. N.; MILTON, D. K. **Indoor Air**, v. 13, n. 3, p. 237–245, 2003.

[5] ZEMOURI, C; AWAD, S F; VOLGENANT, C M C; *et al*. **Journal of dental research**, p. 22034520940288, 2020. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32614681>.

[6] FADAEI, Abdolmajid. **European Journal of Sustainable Development Research**, v. 5, n. 2, p. em0157, 2021.

[7] BLOCKEN, B. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 129, p. 69–102, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84899526959&doi=10.1016%2Fj.jweia.2014.03.008&partnerID=40&md5=edbee306f7a441fdf70dba490d3ad3de>.

[8] ENERGYPLUS. 2015. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/inputoutputreference.pdf>.

[9] CÓSTOLA, Daniel; ALUCCI, Marcia. **Proceedings: Building Simlation 2007**, n. 2003, p. 999–1006, 2007.

[10] BRE, Facundo; GIMENEZ, Juan M.; FACHINOTTI, Víctor D. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1429–1441, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85035068263&doi=10.1016%2Fj.enbuild.2017.11.045&partnerID=40&md5=5c11777852034a87f5d1240af7a1ef9e>. Acesso em: 14 fev. 2020.

[11] NIEMANN, Hans-Jürgen. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 48, n. 2–3, p. 145–161, 1993. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167610593901339>.

[12] COOK, N.J. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 1, p. 3–12, 1975. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167610575900033>.

[13] MEDINILHA-CARVALHO, Talita Andrioli; MARQUES DA SILVA, Fernando Vítor; BRE, Facundo; *et al*. **Buildings**, v. 14, n. 3, p. 762, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/762>.

[14] STATHOPOULOS, Theodore. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 67–68, p. 509–532, 1997.

[15] GIMENEZ, Juan M.; BRE, Facundo; NIGRO, Norberto M.; *et al*. **Building Simulation**, v. 11, n. 6, p. 1255–1271, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12273-018-0461-9>. Acesso em: 2 jul. 2019.

[16] WONG, S.Y. Y.; LAM, K.M. M. *In*: **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. [s.l.]: Elsevier, 2013, v. 114, p. 72–82. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610513000044>. Acesso em: 13 out. 2023.
[17] TEIXEIRA, Cristiano André; INVIDIATA, Andrea; SORGATO, Márcio José; *et al*. Florianopolis: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3e), 2015.
[18] MONTES, María Andrea Triana. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
[19] SECRETARIA NACIONAL DA HABITAÇÃO. Disponível em: <http://sishab.mdr.gov.br/dados_abertos/sistema_habitacao>. Acesso em: 19 dez. 2022.
[20] MORAIS, Juliana M S C; LABAKI, Lucila Chebel. *In*: **PLEA**. [s.l.: s.n.], 2013.
[21] CHENG, C. K.C.; LAM, K. M.; LEUNG, Y. T.A.; *et al*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 2–3, p. 79–90, 2011.
[22] HONG KONG GOVERNMENT. Hong Kong: Legislative Council of Hong Kong, 2004. Disponível em: <https://www.legco.gov.hk/yr03-04/english/sc/sc_sars/reports/sars_rpt.htm>.
[23] WANG, Dayang; YU, X.J.; ZHOU, Y.; *et al*. **Wind and Structures**, v. 20, n. 4, p. 579–607, 2015. Disponível em: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=KJKHCF&py=2015&vnc=v20n4&sp=579>.
[24] MEDINILHA-CARVALHO, Talita Andrioli; SILVA, Fernando Vítor Marques da; BRE, Facundo; *et al*. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8257276>. Acesso em: 1 set. 2023.
[25] BRE, Facundo; GIMENEZ, Juan M. **Building Simulation**, v. 15, n. 8, p. 1507–1525, 2022. Disponível em: <https://cpsimulator.cimec.org.ar/>.
[26] BRE, Facundo; GIMENEZ, Juan M. **BUILDING SIMULATION**, v. 15, n. 8, p. 1507–1525, 2022.
[27] FRANKE, Jörg; HELLSTEN, Antti; SCHLÜNZEN, Heinke; *et al*. Brussels: COST European Cooperation in Science and Technology, 2007. Disponível em: <https://hal.science/hal-04181390>. Acesso em: 11 ago. 2024.
[28] ALI, Mir M; AL-KODMANY, Kheir. **Buildings**, v. 2, n. 4, p. 384–423, 2012. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2075-5309/2/4/384>.
[29] GIMENEZ, Juan M.; BRE, Facundo. **Building and Environment**, v. 237, p. 110321, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132323003487>.
[30] LIU, Y X; HONG, H P. **WIND AND STRUCTURES**, v. 34, n. 6, p. 469–482, 2022.