

Análise do Impacto do Coeficiente de Pressão na Simulação de Ventilação Natural em Ambientes Internos

Analysis of the Impact of the Pressure Coefficient in the Simulation of Natural Ventilation in Indoor Environments

¹Camila Carvalho Ferreira, ²Daniel de Oliveira Amaral, ³Eleonora Sad de Assis,

¹Doutora em Engenharia Civil – Universidade Federal de Minas Gerais (camilacferreira@yahoo.com.br)

²Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável – Universidade Federal de Minas Gerais (danielamaral.arquiteto@yahoo.com.br)

³Professora Associada da Escola de Arquitetura – Universidade Federal de Minas Gerais (elsad@ufmg.br)

RESUMO: Para climas predominantemente quentes, a ventilação possui papel fundamental no conforto térmico ao retirar carga térmica dos ambientes e auxiliar nos processos de trocas térmicas do usuário. No entanto, os processos de ventilação natural não são elementares, demandando modelagens complexas para sua estimativa e verificação das exigências de conforto térmico. O objetivo deste trabalho é comparar diferentes estimativas de coeficiente de pressão de ventos para uma edificação: estimados pelo EnergyPlus e por simulação em CFD, assim como os respectivos impactos na renovação do ar dos ambientes. Foi estudada uma edificação educacional localizada em Palmas, TO, com uma geometria e soluções de ventilação natural complexas. Às taxas de renovação de ar obtidas com os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus e os coeficientes nulos, aplicou-se o indicador de desempenho desvio médio (MBD) para avaliar a sub ou superestimação em relação às taxas de renovação de ar resultante da simulação com os coeficientes de pressão obtidos pelo CFD. Os resultados mostram que apesar de o comportamento das curvas de renovação de ar ser similar com os coeficientes de pressão do CFD e do EnergyPlus, os resultados obtidos com o EnergyPlus tendem a subestimar as taxas de renovação de ar. Não é recomendado para edificações com geometria não retangular e/ou complexa o uso do EnergyPlus para o cálculo dos coeficientes de pressão e o uso de coeficientes nulos. Recomenda-se a obtenção dos coeficientes de pressão através de simulações com um CFD.

Palavras Chave: Ventilação natural. Coeficiente de pressão. Renovação do ar.

ABSTRACT: In hot climates natural ventilation assumes an important role in thermal comfort. Natural ventilation not only removes thermal load from the buildings, but also assists in the user's evapotranspiration process, contributing to the feeling of comfort. Natural ventilation processes are not simple, involving complex modeling in simulation software to estimate and verify thermal comfort requirements. This work aimed to compare different estimates of wind pressure coefficients for an educational building: pressure coefficients estimated by EnergyPlus and those obtained through CFD simulation, as well as the respective impacts on the air change rates. To this end, an building located in Palmas, TO, which has a complex geometry and natural ventilation solutions was studied. The air change rates obtained with the pressure coefficients calculated by EnergyPlus and the null coefficients were applied to the average deviation performance indicator (MBD) to assess the under or overestimation in relation to the air change rates resulting from the simulation with the pressure coefficients obtained by the CFD. The results show that although the behavior of the air change rate curves is similar between the pressure coefficients of the CFD and the EnegyPlus, the results obtained with the EnergyPlus tend to underestimate the air change rates. From the results it is not recommended for buildings with non-rectangular and/or complex geometry the use of EnergyPlus for the calculation of pressure coefficients, nor the use of null coefficients. Therefore, it is recommended to obtain pressure coefficients through of CFD simulations.

Keywords: Natural ventilation. Pressure Coefficients. Air change rates.

1. INTRODUÇÃO

Em climas quentes, como os predominantes ao longo do território brasileiro, a ventilação natural assume um papel de relevância para o conforto térmico. A ventilação natural não só retira carga térmica dos ambientes, como auxilia no processo de evapotranspiração do usuário, contribuindo para o aprimoramento da sensação de conforto (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006).

Entretanto, os processos de ventilação natural não são simples, envolvendo uma modelagem complexa em *softwares* de simulação para sua estimativa e verificação das exigências de conforto térmico do usuário.

A ventilação natural é dependente de fatores fixos, dentre os quais podemos citar: a disposição dos edifícios, dos espaços abertos próximos (entorno) e a presença de obstáculos; a localização, a orientação, a forma e as características construtivas do edifício (tipologia); e a posição, tamanho e tipo de aberturas. É também dependente de fatores variáveis, tais como: direção, velocidade e frequência dos ventos; e diferenças de temperatura do ar interior e exterior. Os processos de ventilação podem ocorrer por duas formas distintas: pela ação do vento ou ventilação cruzada, resultante dos diferentes campos de pressão sobre o edifício, e por diferenças de temperatura entre o ar exterior e interior, resultante das diferenças de densidade do ar, denominado efeito chaminé, bem como pela conjugação dos dois processos (AFLAKI et al., 2015).

A distribuição das pressões sobre o edifício depende da direção dos ventos com relação ao edifício e do fato de estar exposto às correntes de ar ou protegido por outros edifícios ou qualquer obstáculo. A pressão exercida sobre um determinado ponto do edifício depende também da velocidade do vento e do seu ângulo de incidência (XIE *et al.*, 2023). O cálculo das pressões sobre o edifício é um ponto crucial e, ao mesmo tempo, um dos fatores de limitação para a estimativa da ventilação natural.

Um dos programas de ampla utilização para a análise de conforto térmico e de desempenho termoenergético de edificações, o EnergyPlus, possui um módulo para o cálculo da ventilação natural em ambientes, o *AirFlow Network*. No manual do próprio programa são descritos os potenciais e limitações do algoritmo de cálculo aplicado (USA, 2019). Neste documento, a ventilação natural é descrita como o fluxo de ar pelas aberturas ou por janelas e portas externas parcialmente abertas, a partir da pressão do vento conforme as suas características locais ~~do vento~~ (direção, velocidade e orientação da fachada da edificação). Dentre as limitações do algoritmo de cálculo, o manual cita a circulação do ar e/ou a estratificação da temperatura do ar dentro um ambiente (ou zona térmica). Isto ocorre em razão dos cálculos do algoritmo de equilíbrio térmico ocorrerem para o ponto médio do ambiente. O processo de ventilação por efeito chaminé, em que o ar quente ascende e dá lugar ao ar frio, não é considerado pelo algoritmo, pois ele não calcula a estratificação da temperatura do ar nos ambientes. Ou seja, o *software* é capaz de realizar a estimativa da ventilação cruzada, mas não é capaz de estimar a ventilação por efeito chaminé (USA, 2019). Deste modo, a fluxo de ar calculado pode ser subestimado em relação ao que de fato ocorre.

Outra limitação relevante no módulo de cálculo *AirFlow Network* refere-se à geometria da edificação. O manual do EnergyPlus especifica que o algoritmo está apto para a determinação dos coeficientes de pressão a serem aplicados nos cálculos da ventilação natural apenas para edificações que apresentem formas retangulares, com fachadas sem detalhes e com alguns cenários de entorno construído dependentes dos parâmetros de adensamento selecionados pelo usuário do EnergyPlus. Caso a edificação não seja retangular, tenha fachadas com volumetria complexa ou entorno construído muito específico, os valores de coeficiente de pressão devem ser devidamente obtidos externamente ao programa e inseridos no campo correspondente para que o cálculo da ventilação natural ocorra apropriadamente, sem haver prejuízo na exatidão dos dados de saída gerados (USA, 2019).

Para edificações com geometria complexa, com soluções diferenciadas de fachada para obstrução solar e ventilação natural, existem três possibilidades de obtenção de coeficientes de pressão confiáveis: (i) a medição *in loco*; (ii) o experimento em túneis de vento e (iii) o cálculo por um CFD (*Computational Fluid Dynamic*) - sendo a primeira não aplicável à etapa de projeto e a segunda muito onerosa financeiramente. As simulações em CFD são validadas e largamente

utilizadas na academia e no mercado em problemas de engenharia de vento, no escoamento urbano e no escoamento interno de edificações (SREBRIC, 2011; SHIRZADI *et al.*, 2018).

Um modelo CFD é baseado na discretização do volume do fluido estudado, onde se soluciona um conjunto de equações diferenciais de conservação da massa e do movimento (equações de Navier-Stokes), conservação da energia, da concentração de poluentes e turbulência. Como resultado, o modelo apresenta campos de distribuição espacial da pressão, velocidade e temperatura do ar, concentração de poluentes e parâmetros de turbulência do escoamento em ambientes internos e externos.

Segundo Ramponi e Blocken (2012), as principais vantagens do CFD são: calcular os dados para todo o domínio estudado em cada ponto, diferentemente de estudos como os de modelos experimentais e de modelos multizona; não possuir problemas de similaridade ao se reduzir a escala, como em modelos físicos experimentais, pois as simulações são feitas em escala real; e permitir total controle sobre as condições de contorno do modelo, sendo essas condições facilmente trocadas para se testar novas situações. Os modelos de CFD são capazes de mostrar detalhadamente como o fluido se comporta, de acordo com as condições de contorno descritas na modelagem.

Gimenez *et al.* (2018) realizaram um estudo de uma edificação ventilada naturalmente, localizada no litoral argentino, de planta não retangular, utilizando o CFD e o EnergyPlus para estimativa dos coeficientes de pressão e o EnergyPlus para análise do desempenho térmico e cálculo do fluxo de ar. Os autores observaram que houve uma diferença considerável entre as taxas de fluxo de ar conforme o coeficiente de pressão utilizado (calculado pelo CFD ou pelo EnergyPlus), mas não houve uma diferença significativa no desempenho térmico da edificação (GIMENEZ *et al.*, 2018).

Neste trabalho, o objetivo é comparar o fluxo de ar resultante em uma edificação educacional de grande porte, a partir dos coeficientes de pressão de vento estimados pelo EnergyPlus e pelo CFD, avaliando as diferenças entre os valores obtidos e o impacto na renovação do ar dos ambientes. Pretende-se assim, avaliar se há subdimensionamento na renovação do ar no caso do uso dos coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus para uma edificação não retangular que utiliza a estratégia de efeito chaminé e, em caso afirmativo, qual a magnitude de tal subdimensionamento.

2. MATERIAIS E MÉTODO

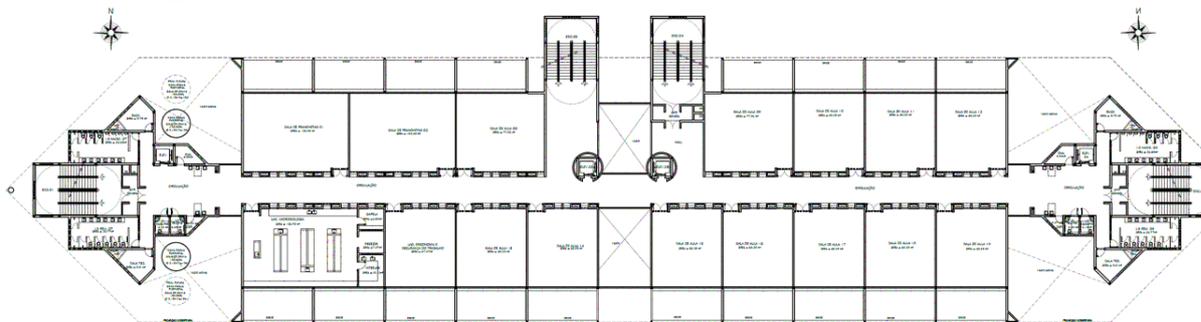
Para a comparação entre os coeficientes de pressão obtidos e as renovações de ar resultantes a partir dos coeficientes de pressão de vento estimados pelo EnergyPlus e pelo ANSYS CFX versão 17.1, foram desenvolvidas análises utilizando simulação computacional. A obtenção do número de renovações por hora foi feita pelo *software* EnergyPlus versão 9.1.0 para o período de um ano típico. Serão comparados os resultados obtidos por três simulações. As diferenças entre as três simulações estão no dado de entrada do coeficiente de pressão utilizado nos cálculos: 1) simulação utilizando os coeficientes de pressão obtidos pelo *software* ANSYS CFX, de maior confiabilidade e precisão, e, por isso, considerado como referência neste trabalho; 2) simulação utilizando os coeficientes de pressão obtidos pelo EnergyPlus; 3) simulação utilizando coeficientes de pressão nulos para o cálculo da ventilação cruzada, considerando a predominância do efeito chaminé para a ventilação natural. Os resultados alcançados em cada simulação serão comparados e a eles aplicados tratamento estatístico apropriado para a determinação de sub ou superdimensionamento dos fluxos de ar.

A edificação selecionada como estudo de caso é uma edificação educacional que contempla soluções de projeto bioclimático e está situada em Palmas, TO, de clima predominantemente quente durante todo o ano, em que a ventilação se apresenta como uma estratégia importante para o conforto térmico do usuário.

2.1. A edificação

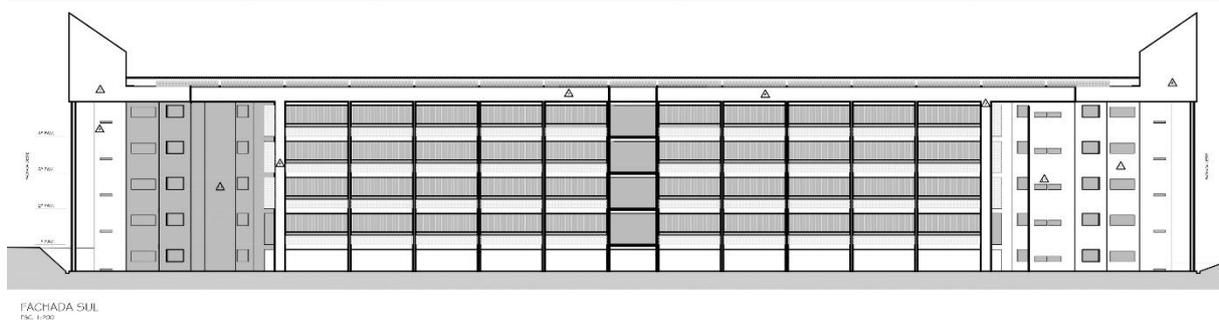
A edificação escolhida como estudo de caso foi uma edificação educacional de uma instituição privada, com quatro pavimentos e planta-tipo com salas e laboratórios de cada lado e um corredor central, conforme a planta apresentada na Figura 1. A escolha desta edificação reside no diferencial em adotar estratégias de projeto que promovem tanto a ventilação cruzada quanto por efeito chaminé. O projeto adota uma série de soluções bioclimáticas para o aproveitamento da ventilação natural, tais como uma fachada de maior permeabilidade aos ventos com cobogós, venezianas e janelas basculantes (Figuras 2 e 3), e dutos de ventilação em paredes duplas entre as salas e o corredor central, que terminam em um lanternim na cobertura para exaustão do ar. Além destas estratégias para a promoção da ventilação natural para retirada de carga térmica e melhoria das condições de conforto térmico, foram propostos elementos de sombreamento para a redução da incidência solar direta nos ambientes. A edificação possui pavimentos típicos com pé direito de 4,30 m. O detalhe das aberturas na fachada da edificação com a representação dos basculantes, venezianas e cobogós é representado na Figura 4.

Figura 1 – Planta do pavimento tipo da edificação em análise. Desenho sem escala.



Fonte: ArqSol Tecnologia e Arquitetura

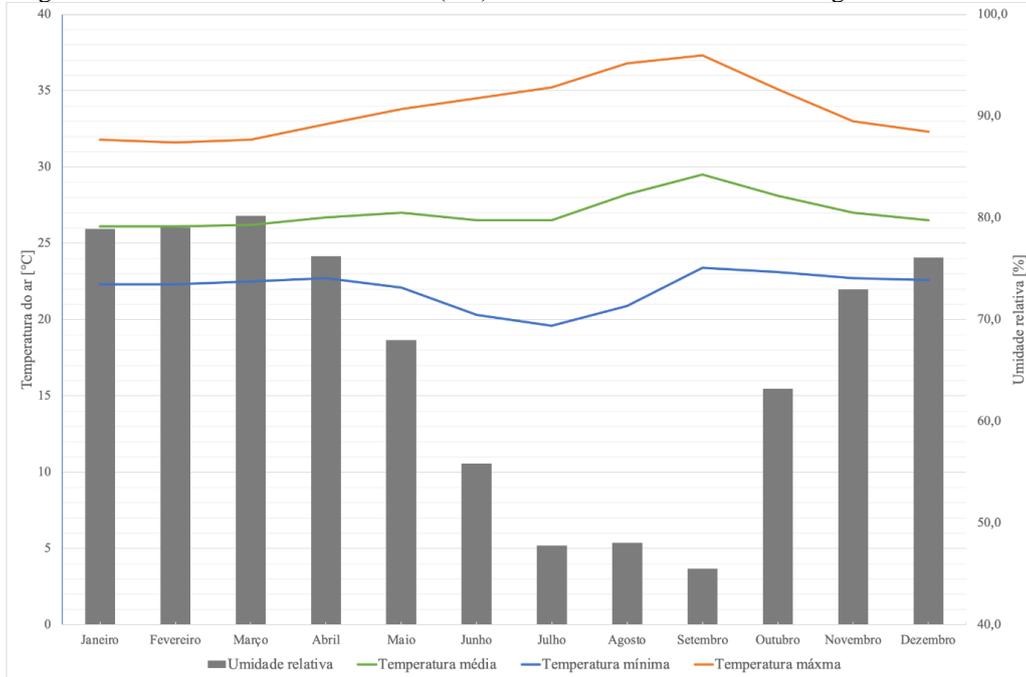
Figura 2 – Fachada sul da edificação em análise. Desenho sem escala.



Fonte: ArqSol Tecnologia e Arquitetura.

úmido é dezembro, havendo uma amplitude térmica média anual de 17,7°C, segundo os dados das Normais Climatológicas para o período de 1991 a 2020 (BRASIL, 2021), conforme é mostrado na Figura 5. De acordo com o zoneamento bioclimático da NBR-15220 (2005), Palmas está localizada na Zona Bioclimática 7.

Figura 5 - Dados climáticos de Palmas (TO) obtidos das Normais Climatológicas 1991-2020



As principais recomendações para as estratégias bioclimáticas para Palmas são: ventilação, sombreamento e inércia térmica para resfriamento. Para a caracterização climática local, as simulações serão executadas utilizando o arquivo climático do ano meteorológico típico (TMY) da cidade de Palmas, obtido de uma série histórica da estação meteorológica local.

2.3. Simulação no CFD

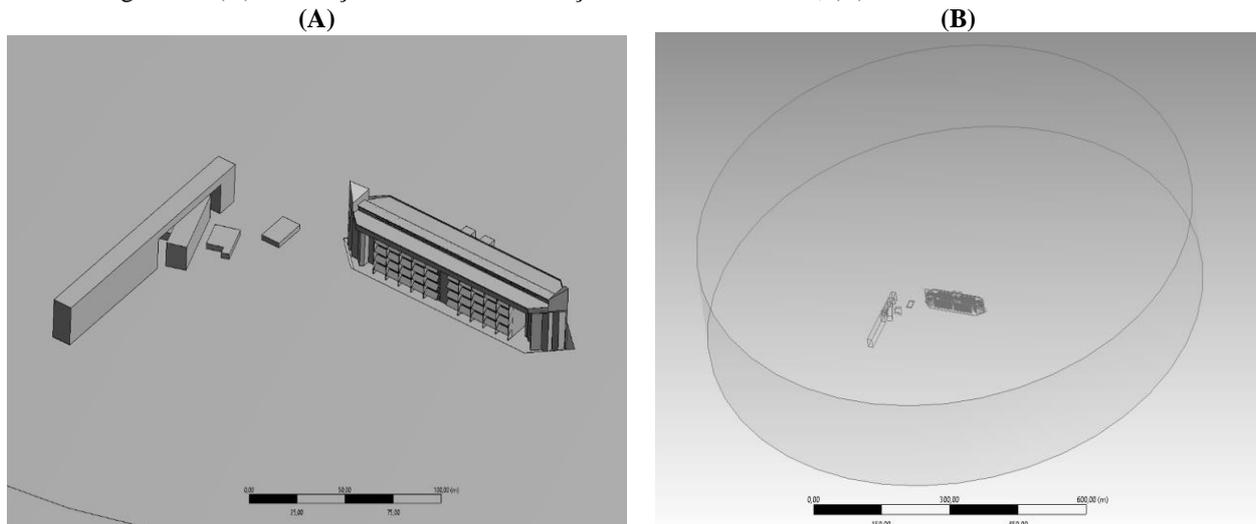
De forma a alimentar os dados de entrada solicitados pelo EnergyPlus referentes aos dados de vento, foram realizadas simulações em CFD para a obtenção dos coeficientes de pressão nas aberturas para a condição específica da edificação em análise.

As simulações apresentadas neste trabalho foram modeladas e configuradas de acordo com as principais referências bibliográficas que dispõem sobre: (a) o dimensionamento da área a ser simulada (domínio); (b) as edificações do entorno que devem ser representadas; (c) a porcentagem de obstrução que os edifícios causam na seção do domínio (bloqueio); (d) geração da malha e seus parâmetros de qualidade; (e) as condições de entorno (perfil de vento de entrada, saída de ar, paredes) e (f) os parâmetros de análise dos resultados encontrados (FRANKE, 2006; FRANKE et al., 2007; TOMINAGA et al., 2008).

Foram simuladas as cinco principais orientações de vento de Palmas (0°, 45°, 90°, 135°, 180°) que representam somadas a direção do vento em 79,22% das horas do ano. A velocidade do vento considerada foi a da média anual da cidade de Palmas, 1,88 m/s. Foram representados no modelo de simulação a edificação de estudo e uma edificação vizinha, as demais edificações próximas pelo porte e densidade foram consideradas através da rugosidade do piso do domínio simulado (Figura 3). O perfil de vento foi determinado considerando a rugosidade típica do terreno de área urbana pouco adensada ($k = 0,35$ e $a = 0,25$).

Foi criado um domínio circular de altura igual a seis vezes a altura da edificação e um raio mínimo igual a quinze vezes essa mesma altura, aumentado até que o modelo apresentasse uma blocagem máxima de 3% (Figura 4). Esse domínio foi discretizado em uma malha hexagonal e desestruturada com fator de expansão dos elementos da malha estipulado em 1,2 e, nas regiões próximas às quinas e espaços entre superfícies paralelas próximas, a malha foi mais refinada. Nos limites sólidos do domínio (piso e edificações) foi criada uma camada de elementos prismáticos para melhor descrever o desprendimento da camada limite superficial. A malha simulada apresenta 18.508.584 elementos totais. A qualidade da malha gerada foi aferida através dos parâmetros de qualidade ortogonal (*orthogonal quality*) e assimetria (*skewness*) (LEITE, 2015; AMARAL, 2019).

Figura 6 – (A) Edificação estudada e edificação vizinha modeladas; (B) Domínio circular simulado.



O modelo de turbulência utilizado foi o *Standard K-ε*, largamente utilizado em simulações de escoamento de ar ao redor de edificações (MONTAZERI e BLOCKEN, 2013; LIN *et al.*, 2014; LEITE, 2015; MARTINS e DA GRAÇA, 2016; AMARAL, 2019). Não foi considerada nessa simulação nenhuma troca de calor.

O coeficiente de pressão (C_p) é um número adimensional resultado da razão entre a pressão dinâmica medida em um ponto da superfície do modelo e a pressão dinâmica em um ponto do fluxo de ar não perturbado. Para este trabalho foram calculados os coeficientes de pressão no centro geométrico de cada superfície que representa uma abertura no modelo.

Outro dado de entrada requerido e importante para o cálculo da ventilação natural no EnergyPlus são os coeficientes de descarga das aberturas. Eles são números adimensionais que descrevem a relação de perda de pressão de um escoamento ao atravessar uma abertura. Esses coeficientes variam de acordo com o tipo da abertura, suas dimensões, ângulos da abertura, entre outros parâmetros. Devido ao caráter singular das soluções de aberturas projetadas para a edificação estudada, foram necessárias simulações em CFD individuais de cada sistema: veneziana, cobogó e janela basculante, para o cálculo dos respectivos coeficientes de descarga, visto não haver dados na literatura para essas soluções de aberturas. A metodologia utilizada nas simulações segue Karava *et al.* (2004), Shirzadi *et al.* (2018) e Yi *et al.* (2019) e os valores obtidos foram: veneziana (0,411); cobogós (0,205); e janela basculante (0,607).

2.4. Simulação no EnergyPlus

Para a análise do comportamento termoenergético da edificação em estudo, foram realizadas simulações no programa EnergyPlus© versão 9.1.0. Este *software* foi selecionado

por se prestar adequadamente às simulações de edificações expostas a climas tropicais que adotam estratégias de condicionamento passivo, em razão de seus algoritmos de cálculo avançado que consideram as trocas de calor transiente, regime no qual operam as edificações ventiladas naturalmente. Este é um diferencial de relevância particularmente neste caso, em que os ganhos e perdas térmicas por radiação solar e pela ventilação têm papel fundamental no conforto térmico dos usuários.

Para uma avaliação mais precisa do impacto da ventilação no desempenho térmico da edificação, optou-se por simular a ventilação natural no módulo *Airflow Network* do EnergyPlus. Os coeficientes de descarga foram calculados utilizando simulações em CFD e o coeficiente de descarga das portas internas foi considerado 0,65, valor *default*, conforme manual do próprio programa.

Não foi considerado nas simulações nenhum tipo de controle das aberturas, relacionados a variação de temperatura, radiação solar ou conforto térmico. O controle de abertura e o fechamento delas variou exclusivamente conforme o uso da edificação. O perfil de uso descrito das aberturas foi detalhado conforme o tipo de abertura: as portas de entrada foram consideradas abertas das 08:00 às 23:00 horas. As demais portas foram consideradas sempre fechadas; as janelas basculantes foram consideradas abertas das 08:00 às 23:00 horas; e os cobogós e venezianas, por serem fixos, foram considerados sempre abertos.

Quanto à ocupação, foi considerado como período letivo os intervalos de 04 de fevereiro a 22 de junho e 05 de agosto a 16 de dezembro, conforme calendário da própria instituição. Os horários de aula são o matutino (09:00 às 12:30 em dias de semana e das 09:30 às 13:00 aos sábados), vespertino (14:00 às 17:30) e noturno (18:50 às 22:25).

Como o intervalo mínimo trabalhado pelo programa de simulação é de uma hora, os horários (de funcionamento das salas de aula) considerados foram: matutino (09:00 às 13:00 em dias de semana e das 09:00 às 13:00 aos sábados), vespertino (14:00 às 18:00) e noturno (19:00 às 23:00), seguindo o período letivo. Já para os ambientes administrativos, os horários considerados foram: matutino (08:00 às 13:00 em dias de semana e das 08:00 às 14:00 aos sábados), vespertino (14:00 às 18:00) e noturno (19:00 às 23:00). O período de atividades considerado foi de 15 de janeiro a 20 de dezembro. A iluminação artificial foi considerada acesa durante o período de ocupação da edificação, conforme carga de projeto.

2.5. Tratamento estatístico

Com o intuito de avaliar o quanto os resultados de renovação de ar obtidos pela simulação, utilizando os coeficientes de pressão obtidos pelo EnergyPlus e os coeficientes nulos eram sub ou superestimados em relação à renovação de ar resultante da simulação utilizando os coeficientes de pressão obtidos pelo CFD, aplicou-se o indicador de desempenho desvio médio MBD, indicativo da tendência dos resultados à subestimação (valores negativos de MBD) ou à superestimação (valores positivos de MBD), sendo seu valor ideal zero. Sua unidade é a porcentagem (%). O MBD pode ser calculado através da seguinte equação:

$$MDB = 100 \times \frac{\frac{\sum(y_i - y)}{n}}{\frac{\sum(y)}{n}} \quad (1)$$

Onde:

y_i é o valor de referência;

y é o valor comparado;

n é o número de medidas consideradas.

Assim, os resultados de renovação de ar obtidos em cada caso poderão ser comparados em relação ao caso de referência, identificando o seu comportamento (sub ou superdimensionar) e a amplitude.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados da taxa de renovação de ar

Os resultados obtidos de número de renovações de ar a partir da simulação para os três casos (C_p 's calculados pelo CFD, pelo EnergyPlus e nulos) serão analisados para quatro ambientes: sala no primeiro pavimento e fachada norte (Figura 7); sala no primeiro pavimento e fachada sul (Figura 8); sala no último pavimento e fachada norte (Figura 9); sala no último pavimento e fachada sul (Figura 10). Para cada um dos ambientes foram gerados gráficos comparativos com os resultados anuais de renovações de ar obtidos por simulação. Os resultados do número de renovações obtidas utilizando os coeficientes de pressão estimados pelo CFD são representados pela linha azul e serão utilizados como referência em virtude da sua maior precisão. Já as renovações obtidas utilizando os coeficientes de pressão calculados pelo próprio EnergyPlus são representados pela linha laranja. Por fim, o número de renovações considerando os C_p 's nulos é representada pela linha cinza.

Analisando os resultados obtidos para o volume de infiltração de ar (m^3) para a sala localizada no primeiro pavimento com fachada voltada para norte (Figura 7), observa-se que o volume obtido a partir dos coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus apresentam um comportamento próximo ao volume obtido a partir dos coeficientes de pressão oriundos do CFD. Nota-se que há momentos em que o volume de ar considerando os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus é superestimado, principalmente durante o período de inverno. Contudo, em outros momentos, o volume de ar é subestimado. Já avaliando o volume de ar resultante da simulação utilizando coeficientes de pressão nulos em relação ao volume de ar com os coeficientes provenientes do CFD, observa-se um volume de ar muito inferior.

Figura 7 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no primeiro pavimento com fachada norte para os casos analisados: coeficientes de pressão obtidos a partir do CFD, coeficientes de pressão obtidos a partir do EnergyPlus e coeficientes de pressão nulos.

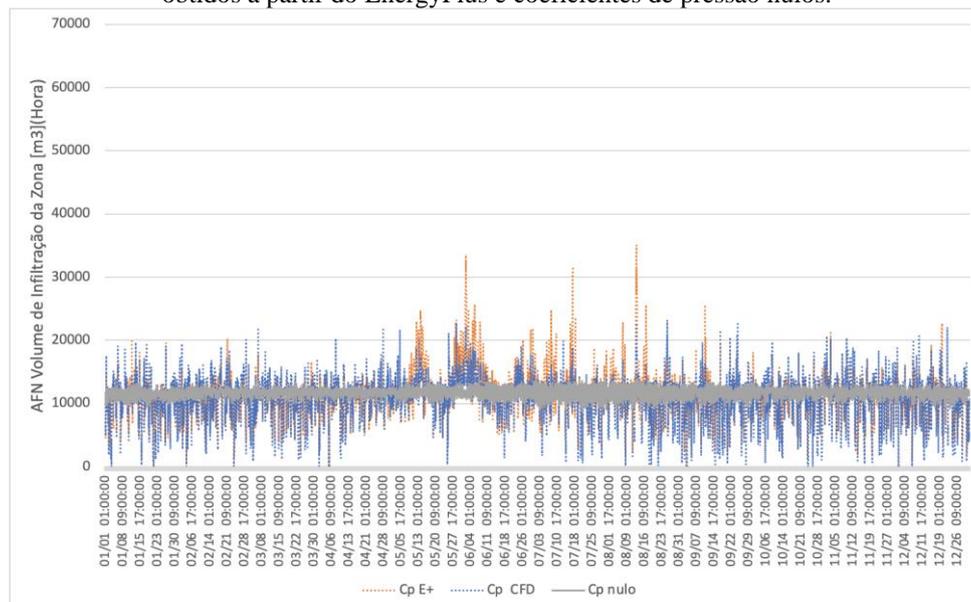
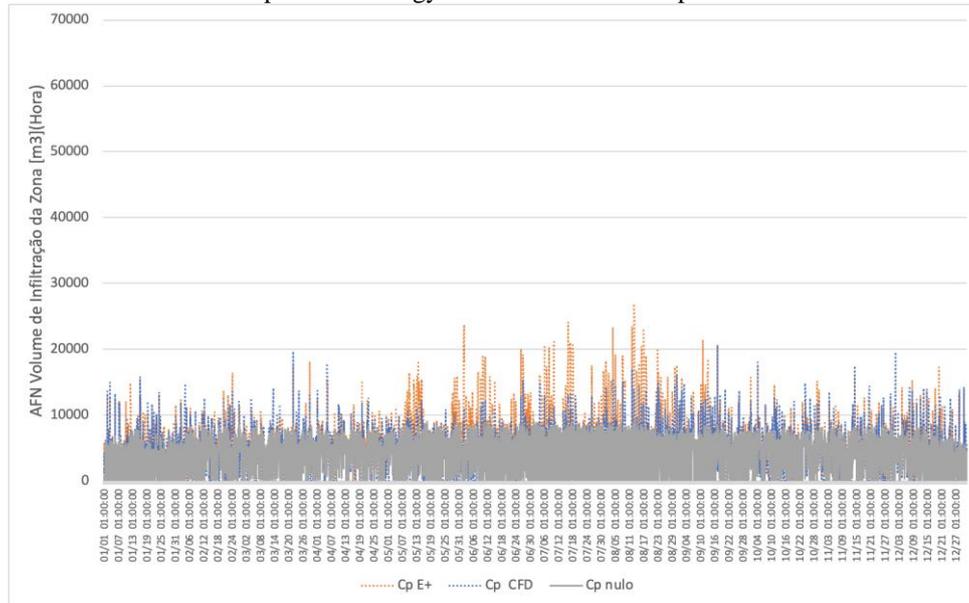


Figura 8 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no primeiro pavimento com fachada sul para os casos analisados: coeficientes de pressão obtidos a partir do CFD, coeficientes de pressão obtidos a partir do EnergyPlus e coeficientes de pressão nulos.



Comportamento similar ao da sala no primeiro pavimento com fachada voltada para norte foi observado na sala do primeiro pavimento com fachada para sul (Figura 8). O volume de ar resultante da simulação alimentada com os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus foi mais próximo ao volume de ar de referência, subestimando o volume em alguns momentos e superestimando o volume de ar principalmente no período de inverno.

No caso da sala de aula no quarto pavimento e com fachada voltada para norte (Figura 9), assim como para as salas do primeiro pavimento, há uma maior aproximação do volume de ar obtido utilizando os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus com o volume de ar obtido utilizando os coeficientes de pressão calculados pelo CFD. Contudo, para esta sala, ao longo de todo o ano o volume de ar foi subestimado em relação ao volume de referência. O volume de ar obtido a partir dos coeficientes de pressão nulos foi bastante inferior ao volume de referência. Os mesmos comportamentos observados para a sala de aula no quarto pavimento e com fachada norte foram observados para a sala no quarto pavimento e com fachada sul (Figura 10).

Figura 9 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no quarto pavimento com fachada norte para os casos analisados: coeficientes de pressão obtidos a partir do CFD, coeficientes de pressão obtidos a partir do EnergyPlus e coeficientes de pressão nulos.

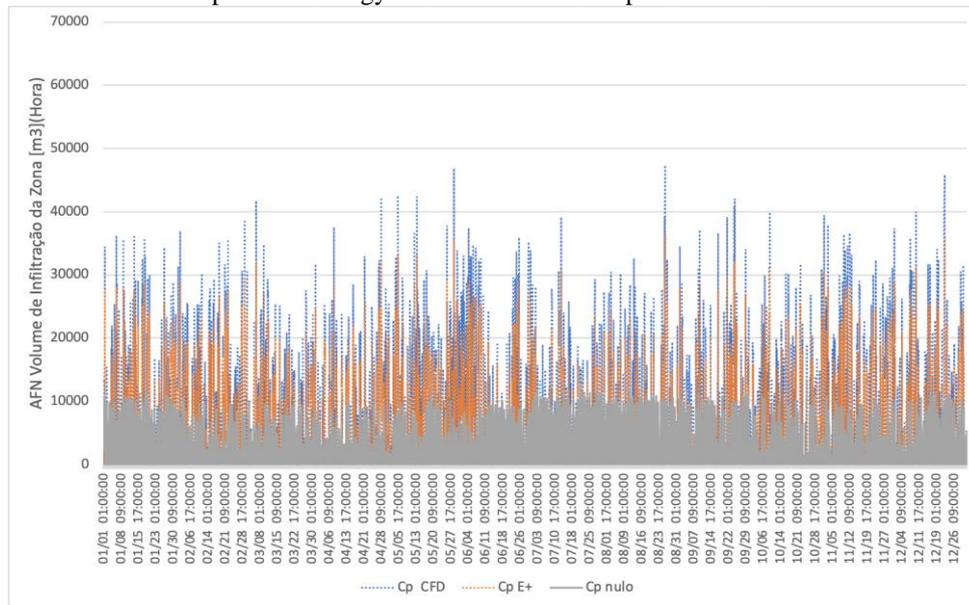
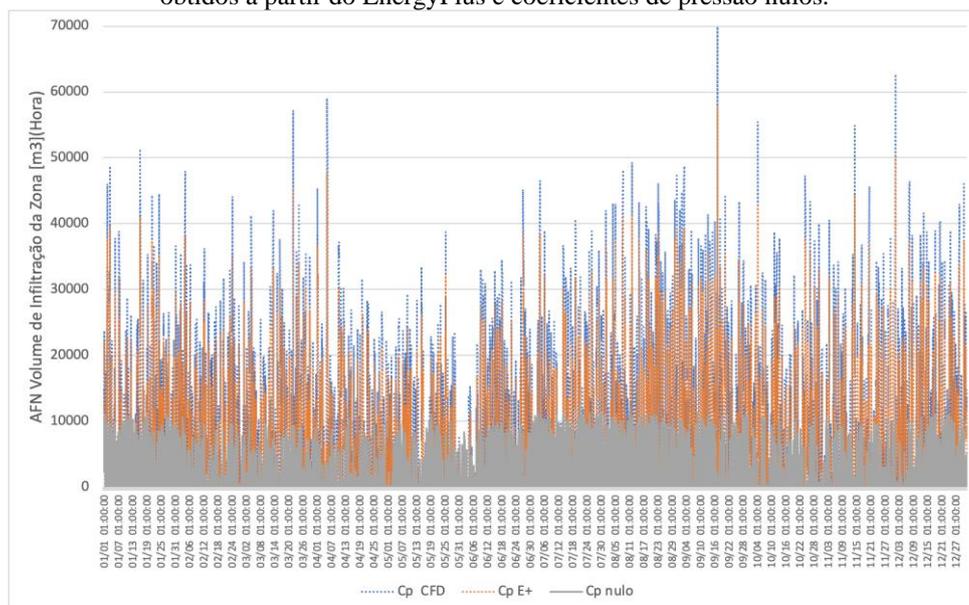


Figura 10 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no quarto pavimento com fachada sul para os casos analisados: coeficientes de pressão obtidos a partir do CFD, coeficientes de pressão obtidos a partir do EnergyPlus e coeficientes de pressão nulos.



Analisando os gráficos com os valores de volume de ar para todos os quatro ambientes, a utilização de coeficientes de pressão nulos resultou em um volume de ar bem inferior ao volume de ar resultante da aplicação dos coeficientes de pressão obtidos pelo CFD. Há, neste caso, prejuízo da ventilação natural, estratégia está de grande relevância para climas quentes como o de Palmas. Uma edificação pode aparentar pelas simulações não apresentar boas condições de ventilação, mesmo adotando estratégias bioclimáticas que promovam esta estratégia, como a edificação analisada, quando esta não é a realidade. O uso de coeficientes nulos pode prejudicar as análises de ventilação natural nos ambientes, bem como as análises de conforto térmico.

Quanto aos coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus, os volumes de ar para os ambientes apresentaram comportamentos similares, mas ainda sim observa-se haver variações quantitativas consideráveis - ora o volume de ar sendo subestimado, ora superestimado. Este

comportamento pode ser compreendido considerando que a edificação estudada não possui uma forma retangular e apresenta elementos complexos na fachada, ambas condições de limitação do *AirFlow Network* conforme manual do programa. Embora apresente resultados mais adequados do que considerando os coeficientes de pressão nulos, estes são ainda imprecisos e devem ser utilizados com cautela.

Utilizar coeficientes nulos não foi uma alternativa para avaliar a ventilação por efeito chaminé na edificação. De fato, o programa EnergyPlus considera apenas a ventilação cruzada pelas aberturas com diferentes alturas, sem considerar o efeito da ventilação por diferença de densidade do ar, que também acontece por estas aberturas. Adotar coeficientes de pressão nulos acaba por prejudicar a ventilação cruzada, que o *software* é capaz de dimensionar, além de não corresponder à realidade do comportamento dos ventos locais.

Para um aprofundamento em relação a sub ou superestimação do volume de ar, os MBD's resultantes para o volume de ar obtido a partir dos coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus e o volume de obtido a partir dos coeficientes de pressão nulos foram comparados (Tabela 1).

Tabela 1 – Comparação dos MBD's resultantes para os casos analisados, em porcentagem (%)

Condição de análise	MBD Sala 1º pavimento e fachada norte	MBD Sala 1º pavimento e fachada sul	MBD Sala 4º pavimento e fachada norte	MBD Sala 4º pavimento e fachada sul
Coefficiente de pressão calculado pelo E+	70,4%	-3479,1%	1698,3%	-2723,0%
Coefficiente de pressão nulo	267,1%	-5798,4%	-1442,8%	-7323,1%

A partir dos valores de MBD's obtidos é perceptível haver uma subestimação considerável destes volumes de ar em relação ao volume de ar de referência, obtido a partir dos coeficientes de pressão calculados por CFD. Exceção foi a sala do primeiro pavimento com fachada voltada para norte, em que há uma tendência a superestimar os valores. As fachadas voltadas para norte coincidem com a incidência dos ventos, enquanto as voltadas para sul estão a sotavento para a cidade de Palmas. Os valores de MBD's negativos indicam que os fluxos de ar obtidos utilizando os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus e os coeficientes de pressão nulo são consideravelmente subestimados, prejudicando assim a análise da ventilação natural no prédio. Em ambos os casos analisados observa-se haver uma perda na precisão nos resultados, sendo as duas condições inadequadas para a análise de ventilação natural na edificação.

3.2. Resultados da temperatura operativa

Os resultados obtidos para as temperaturas operativas (°C) dos ambientes analisados são apresentados na Tabela 2.

As temperaturas operativas resultantes apresentaram valores muito próximos. Para facilitar a compreensão dos dados serão expostas as diferenças médias e máximas entre as temperaturas operativas para o caso de referência (coeficiente de pressão pelo CFD) e os casos analisados, coeficiente de pressão obtidos pelo EnergyPlus e coeficientes de pressão nulos.

Tabela 2 – Diferença nas temperaturas operativas em relação ao caso de referência

Condição de análise	Diferença entre as temperaturas	Sala	Sala	Sala	Sala
		1º pavimento e fachada norte	1º pavimento e fachada sul	4º pavimento e fachada norte	4º pavimento e fachada sul
Coeficientes de pressão calculado pelo E+	Média	0,02°C	0,03°C	0,02°C	0,01°C
	Máxima	0,49°C	0,77°C	0,79°C	0,81°C
Coeficientes de pressão nulos	Média	0,08°C	0,11°C	0,07°C	0,14°C
	Máxima	1,58°C	1,19°C	0,92°C	1,18°C

Os resultados apontam que no caso em que os coeficientes de pressão utilizados foram os calculados pelo EnergyPlus, a diferença máxima entre as temperaturas operativas para o caso analisado e o caso de referência não superaram 1°C em nenhum dos ambientes, permanecendo em torno de 0,8°C. Já o valor médio da diferença foi entre 0,02°C a 0,03°C. Os valores obtidos nas diferenças são pouco significativos. Já para o caso dos coeficientes de pressão nulos, a diferença máxima entre as temperaturas operativas para o caso de referência é um pouco maior, chegando até a 1,58°C, impactando um pouco mais nas análises.

Considerando que estes resultados poderiam impactar de forma significativa as avaliações de conforto térmico, estas também foram analisadas. Os resultados são apresentados na Tabela 3. Para o cálculo do conforto térmico foi adotado o modelo de conforto adaptativo proposto pela ASHRAE 55 (2017). Em seguida, tal qual foi realizado com as temperaturas operativas, foram calculadas as diferenças entre o percentual de horas de conforto entre o caso de referência (coeficiente de pressão pelo CFD) e os casos analisados, coeficiente de pressão obtidos pelo EnergyPlus e coeficientes de pressão nulos.

Tabela 3 – Diferença no percentual de conforto térmico em relação ao caso de referência considerando o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2017)

Condição de análise	Sala	Sala	Sala	Sala
	1º pavimento e fachada norte	1º pavimento e fachada sul	4º pavimento e fachada norte	4º pavimento e fachada sul
Coeficientes de pressão calculado pelo E+	0,3%	0,7%	0,2%	0,3%
Coeficientes de pressão nulo	1,0%	1,6%	0,8%	1,6%

Os resultados mostram que nos dois casos há um impacto no conforto térmico de pequena proporção. O impacto no caso que utiliza os coeficiente de pressão calculado pelo EnergyPlus é insignificante (em torno de 0,3%). Para o caso que considera os coeficientes de pressão nulos, o impacto é da ordem de 1,0% a 1,6%, ainda baixo, mas podendo ser considerado.

Logo, assim como Gimenez *et al.* (2018), observa-se um impacto pequeno no desempenho térmico da edificação ao utilizar os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus, mesmo sendo mais imprecisos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ventilação natural é uma estratégia de grande relevância para a obtenção de conforto térmico em climas predominantemente quentes, como os climas comuns em grande parte do território brasileiro. Entretanto, sua correta estimativa, conforme as soluções adotadas em um projeto arquitetônico, enfrenta algumas dificuldades devido à complexidade de modelagem em *softwares* de simulação para sua estimativa e verificação das exigências de conforto térmico. Diante deste cenário, o objetivo do presente trabalho foi contribuir neste sentido, avaliando diferentes estimativas de coeficiente de pressão de ventos para uma edificação, comparando-as

com os coeficientes de pressão estimados pelo CFD, bem como os respectivos impactos na renovação do ar dos ambientes e na resposta de conforto térmico.

Para tal, uma mesma edificação foi simulada utilizando coeficientes de pressão calculados a partir do CFD, adotado como referência por sua reconhecida maior precisão, do EnergyPlus e utilizando coeficientes de pressão nulos (considerando apenas o movimento de ar por efeito chaminé).

Os resultados obtidos apontaram que, embora o comportamento das curvas de volume de ar resultante do cálculo com o coeficiente de pressão oriundo do CFD e resultante do EnergyPlus apresentem comportamentos similares, há uma tendência de subestimativa do volume de ar obtido utilizando o EnergyPlus para cálculo dos coeficientes de pressão. Tal comportamento pode ser entendido pelo fato do EnergyPlus se limitar a realizar o cálculo de coeficientes de pressão para edificações retangulares e com fachadas simples. Diferente da edificação analisada que possui forma não retangular e uma fachada complexa. Essa limitação do programa acaba por prejudicar os resultados de forma considerável, subestimando notadamente os volumes de ar resultantes. Estes resultados apontam a necessidade de uma avaliação correta da forma da edificação e de sua fachada, para quem sejam adequadas às condições de aplicação de cálculo de coeficiente de pressão.

A tendência a subestimar o volume de ar é ainda maior quando se aborda o volume de ar resultante de coeficientes de pressão nulos, uma vez que o *software* apresenta limitações quanto ao cálculo da ventilação por efeito chaminé. Adotar coeficientes de pressão nulo para privilegiar a ventilação estratificada incorre em uma significativa subestimação da ventilação na edificação, mostrando-se uma adaptação ineficaz, uma vez que o programa realmente não considera a movimentação de ar por estratificação de temperatura, apenas pela diferença de pressão. A adoção de coeficientes de pressão nulos acaba por prejudicar o cálculo da ventilação por diferença de pressão, resultando em fluxos de ar muito abaixo do esperado.

A partir dos resultados obtidos, não se recomenda o uso do EnergyPlus para o cálculo do coeficiente de pressão de edificações não retangulares e complexas, conforme o próprio manual do programa indica, e tampouco a simplificação de adotar os coeficientes de pressão nulos para as análises específicas de fluxo de ar. Caso o estudo envolva a análise de desempenho e de conforto térmico de uma edificação, o EnergyPlus pode ser aplicado, mesmo para a análise de edificações mais complexas, visto que as diferenças nos valores do índice de conforto adaptativo foram insignificantes em relação àqueles calculados com os coeficientes de pressão provenientes do CFD. Os coeficientes de pressão nulos desconsideram de forma significativa a ventilação cruzada e apresentam um erro um pouco maior. Contudo, conceitualmente é uma simplificação pouco proveitosa para o desenvolvimento de análises, que pode vir a apresentar um erro ainda maior em climas muito quentes e úmidos.

Para resultados válidos e de boa representatividade para edificações complexas, a recomendação é pelo cálculo dos coeficientes de pressão usando um CFD.

5. REFERÊNCIAS

AFLAKI *et al.* A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. **Energy and Buildings**, v. 101, p.153-162, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>

AMARAL, D. A. **Avaliação das metodologias de ventilação natural da normalização brasileira de desempenho térmico e eficiência energética de edificações habitacionais**. 2017. Dissertação (Mestrado). 152f. Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2017. 64p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-3**: Desempenho Térmico de Edificações Parte 3 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 36 p.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Normais climatológicas do Brasil: 1991 - 2020**. INMET. Brasília, 2021.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2 ed. Maceió: EDUFAL, 2006. 163p.

USA. Department of Energy (DOE). Input/Output Reference. In: **EnergyPlus Documentation Main Menu**. DOE. Washington, 2019, 2719 p.

FRANKE, J. Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. In: THE FOURTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL WIND ENGINEERING, 2006, Yokohama. **Proceedings...** Yokohama: IAWE (International Association of Wind Engineering), 2006, p. 529-532.

FRANKE *et al.* **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. Brussels: COST, 2007. 52p.

GIMENEZ, J. M.; BRE, F.; NIGRO, N. M.; FACHINOTTI, V. Computational modeling of natural ventilation in low-rise non-rectangular floor-plan buildings. **Building Simulation**, v. 11, p. 1255-1271, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0461-9>

KARAVA, P. **Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation**. 2008. 243 f. Tese (Doutorado). Department of Building, Civil, and Environmental Engineering. Concordia University, Montreal, Canada. 2008.

LEITE, R. C. V. **Cidade, Vento, Energia: Limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido**. 2015. Tese (Doutorado). 273 f. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2015.

LIN, M. *et al.* Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. **Building and Environment**, v. 79, p. 152-176, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.008>

MARTINS, N. R.; DA GRAÇA, G. C. Validation of numerical simulation tools for wind-driven natural ventilation design. **Building Simulation**, v. 09, p. 75-87, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12273-015-0251-6>

MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. **Building and Environment**, v. 60, p. 137-149, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.012>

MOREIRA, A. F. B. Multiculturalismo, Currículo e Formação de Professores. In: SEMINÁRIO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO BÁSICA, v. 2, 1998, Santa Cruz do Sul. **Anais ...** Santa Cruz do Sul: EDUNISC, 1998, p. 15-30.

MORISHITA, C.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; TRIANA, M. A.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. **Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes e Coberturas**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/AnexoVRAC_CatalogoPropriedadesTermicas%20v03SET2013.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2023.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1**. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Biblioteca_Materiais_VisualDOE.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2023.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, v. 53, p. 34-48, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.004>

SHIRZADI, M; MIRZAEI, P; NAGHASHZADEGAN, M. Development of an adaptative discharge coefficient to improve the accuracy of cross-ventilated airflow calculation in building energy simulation tools. **Building and Environment**, v. 127, p. 277-290, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.019>

SHIRZADI, M; NAGHASHZADEGAN, M; MIRZAEI, P. Improving the CFD modelling of cross-ventilation in highly-packed urban areas. **Sustainable Cities and Society**, v. 37, p. 451-465, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.020>

SREBRIC, J. Ventilation performance prediction. In: HENSEN, J.. L. M.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Londres: Spon Press, 2011.

TOMINAGA, Y. *et al.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 1749-176, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>

XIE, X.; LUO, Z.; GRIMMOND, S.; BLUNN, L. Use of wind pressure coefficients to simulate natural ventilation and building energy for isolated and surrounded buildings. **Building and Environment**, v. 230, 109951, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109951>

YI, Q. *et al.* Numerical investigation on the effects of building configuration on discharge coefficient for a cross-ventilated dairy building model. **Biosystems Engineering**, v. 182, p. 107-122, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.003>

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Arqsol – Arquitetura e Tecnologia por ceder o projeto em análise e permitir a divulgação desta pesquisa.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.