ANÁLISE DO IMPACTO DO COEFICIENTE DE PRESSÃO NA SIMULAÇÃO DE VENTILAÇÃO NATURAL EM AMBIENTES INTERNOS

Camila Carvalho Ferreira (1); Daniel de Oliveira Amaral (2); Eleonora Sad de Assis (3)
(1) doutora, arquiteta, camilaccferreira@yahoo.com.br, UFMG
(2) mestre, arquiteto, danielamaral.arquiteto@yahoo.com.br, UFMG
(3) doutora, Professora do Departamento de Tecnologia da Arquitetura e urbanismo, eleonorasad@yahoo.com.br, UFMG

RESUMO
Em climas quentes, como os predominantes ao longo do território brasileiro, a ventilação natural assume um papel de relevância no conforto térmico. A ventilação natural não só retira carga térmica dos ambientes, como auxilia no processo de evapotranspiração do usuário, contribuindo para a sensação de conforto. Contudo 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. Esse trabalho teve como objetivo comparar diferentes estimativas de coeficiente de pressão de ventos para uma edificação educacional: os coeficientes de pressão estimados pelo EnergyPlus e aqueles obtidos através de simulação em CFD, bem como os respectivos impactos na renovação do ar dos ambientes. Para isso foi estudada uma edificação educacional localizada em Palmas, TO, que possui uma geometria e soluções de ventilação natural complexas, com cobogós, venezianas, janelas basculantes e dutos de ventilação no interior. Foi aplicado às taxas de renovação de ar obtidas com os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus e os coeficientes nulos, 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 EnegyPlus, os resultados obtidos com o EnergyPlus tendem a subestimar as taxas de renovação de ar. A partir dos resultados não é recomendado para edificações com geometria não retangular e/ou complexa o uso do EnergyPlus para o cálculo dos coeficientes de pressão, e tampouco o uso de coeficientes nulos. Sendo recomendado, portanto, a obtenção dos coeficientes de pressão através de simulações em CFD.

Palavras-chave: ventilação natural, CFD, Energyplus, coeficiente de pressão, renovação de ar.

ABSTRACT
In hot climates, such as those prevalent throughout the Brazilian territory, 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. However, 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 educational building located in Palmas, TO, which has a complex geometry and natural ventilation solutions, with cobogós, shutters, tilting windows and ventilation ducts in the interior, 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 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, CFD, EnergyPlus, 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 no conforto térmico. A ventilação natural não só retira carga térmica dos ambientes, como auxilia no processo de evapotranspiração do usuário, contribuindo para a sensação de conforto.

Contudo 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.

A ventilação natural depende de fatores fixos como: a disposição dos edifícios e 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. E de fatores variáveis, como: direção, velocidade e frequência dos ventos; e diferenças de temperatura do ar interior e exterior. Seus processos podem ocorrer por duas formas distintas: pela ação do vento ou ventilação cruzada, que gera diferentes campos de pressão sobre o edifício, e por diferenças de temperatura entre o ar exterior e interior, que gera diferenças de densidade do ar, denominado efeito chaminé. Ou também pela conjugação dos dois processos (TOLEDO,2001).

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 (FROTA e SCHIFFER, 2003). O cálculo das pressões sobre o edifício é um ponto crucial e, ao mesmo tempo, um dos pontos 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 cálculo da ventilação natural em ambientes: o *AirFlow Network*. O manual do programa apresenta as capacidades e limitações do algoritmo de cálculo. Entre as capacidades do algoritmo está o cálculo de ventilação natural (isto é, fluxo de ar pelas aberturas ou por janelas e portas externas parcialmente abertas, a partir da pressão do vento conforme as 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 de equilíbrio térmico ocorrerem para o centro do ambiente. Não ocorrendo a estratificação da temperatura do ar, o processo de ventilação chaminé, em que o ar quente sobe e dá lugar ao ar frio, não é considerado pelo algoritmo. Ou seja, o software é capaz de realizar a estimativa da ventilação cruzada, mas não é capaz de estimar a ventilação por efeito chaminé (DOE, S.I.).

Outra limitação no módulo de cálculo *AirFlow Network* refere-se à geometria da edificação. Conforme o manual do EnergyPlus, no que se refere aos dados de entrada dos coeficientes de pressão, o programa só é capaz de calcular os coeficientes de pressão para a aplicação nos cálculos da ventilação natural de edificações retangulares com fachadas sem detalhes e com alguns cenários de entornos construído dependente 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 (DOE, S.I.).

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: a medição, experimento em túneis de vento e o cálculo pelo CFD, 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 (ALLARD, 1998; CHEN, 2009; SREBRIC, 2011).

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 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.

2. OBJETIVO

O objeto do trabalho é comparar o fluxo de ar resultante em uma edificação educacional a partir dos coeficientes de pressão de ventos estimados pelo EnergyPlus e pelo CFD.

3. MÉTODO

Para as análises do presente trabalho serão comparados os coeficientes de pressão obtidos para uma edificação educacional de quatro pavimentos e que adota estratégias de projeto que promovem a ventilação cruzada e por efeito chaminé. A obtenção do número de renovações por hora será feita pelo *software* EnergyPlus versão 9.1.0 para o período de um ano. Serão comparadas três situações: 1) coeficientes de pressão obtidos por CFD, de maior confiabilidade e precisão, e, por isso, considerado como referência neste trabalho; 2) coeficientes de pressão obtidos pelo EnergyPlus; 3) coeficientes de pressão nulos, considerando a predominância do efeito chaminé para a ventilação natural.

3.1. A edificação

A edificação escolhida como estudo de caso foi uma edificação educacional de quatro pavimentos com salas e laboratórios em cada lado e um corredor central, conforme a planta apresentada na Figura 1. O projeto adota uma série de soluções bioclimáticas para o aproveitamento da ventilação natural, tais como uma fachada muito permeável aos ventos com cobogós, venezianas e janelas basculantes (Figura 2), 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.

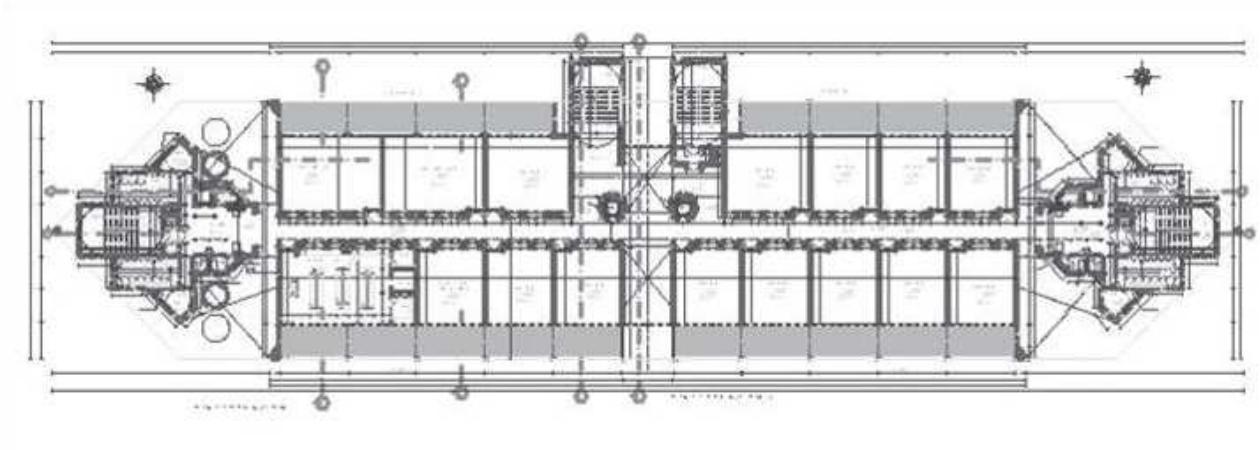


Figura 1 – Planta do pavimento tipo da edificação em análise.

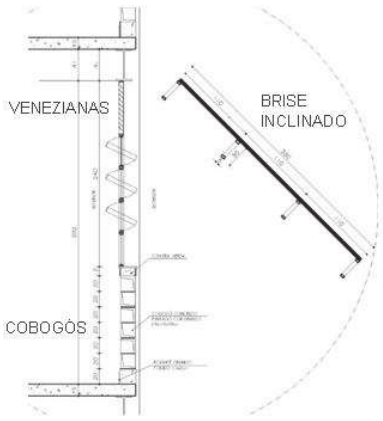


Figura 2 – Soluções de ventilação natural e sombreamento existentes na fachada da edificação estudada.

3.2. Clima

Com base na classificação climática de Köppen e nos dados das Normais Climatológicas (INMET, 2009), o clima da cidade de Palmas, TO, pode ser caracterizado como Aw, clima tropical com verões chuvosos. O mês mais quente e seco do ano é agosto e o mais quente e úmido é março, havendo uma amplitude térmica média anual de 19,8ºC. De acordo com o zoneamento bioclimático da NBR-15220/2005, Palmas está localizada na Zona Bioclimática 7.

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.

3.3. 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 (blocagem); (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, 1,88m/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).

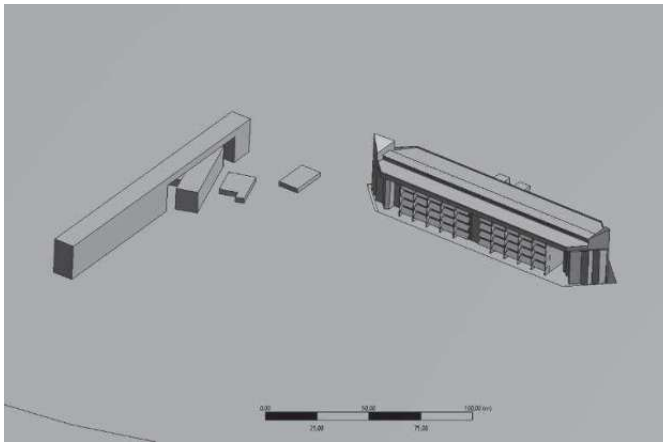


Figura 3 – Edificação estudada e edificação vizinha modeladas.

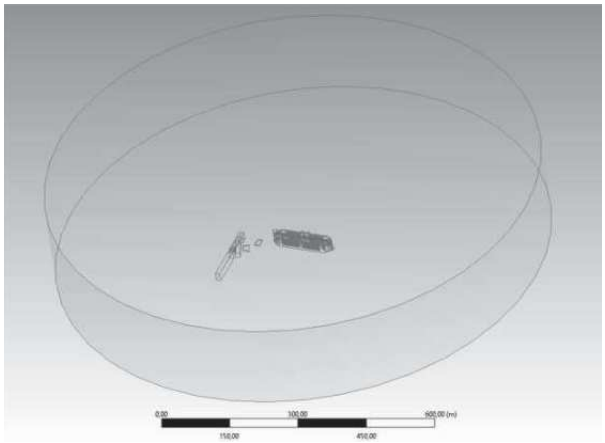


Figura 4 – Domínio circular simulado.

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 (Cp) 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 importante para o cálculo da ventilação natural no EnergyPlus que é necessário ser informado pelo usuário 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 Heiselberg *et al.* (1999); Karava *et al.* (2004) e Iqbal *et al.* (2012) e os valores obtidos foram: veneziana (0,411); cobogós (0,205); e janela basculante (0,607).

3.4. Simulação no EnergyPlus

Para a análise do comportamento termoenergético da edificação em estudo, foram realizadas simulações no programa EnergyPlus© versão 9.1.0. Devido ao seu motor de cálculo avançado, o programa se presta bem à simulação de edificações expostas a climas tropicais que adotam estratégias de condicionamento passivo, particularmente neste caso, em que os ganhos e perdas térmicas por radiação solar e pela ventilação têm papel fundamental no conforto térmico dos usuários.

A edificação foi modelada de acordo com as características e dimensões descritas no projeto arquitetônico. A orientação de implantação da edificação modelada foi equivalente a orientação do projeto arquitetônico, garantindo a mesma exposição à radiação solar e aos ventos.

Cada ambiente foi considerado uma zona térmica individual. Esta conformação permite que sejam solicitados os resultados das simulações (dados de saída) para todos os ambientes de permanência prolongada individualmente (auditório, salas de aula e laboratórios).

A composição dos fechamentos descrita no EnergyPlus© foram paredes externas (nas cores verde $\alpha = 0,6$ e branca $\alpha = 0,4$) e internas de alvenaria (15 cm), laje *steel frame* de concreto (15 cm) e cobertura em telha metálica trapezoidal termoacústica branca. As propriedades termofísicas destes componentes são apresentados na Tabela 1. As propriedades termofísicas dos materiais que compõem as envoltórias foram adotadas conforme a norma NBR 15.220 (ABNT, 2005), Ordenes et al. (2003) e Morishita et al. (2013).

A resistência térmica considerada para a câmara de ar da parede foi de 0,16 m²K/W, para superfícies de alta emissividade com espessura de 2,0 cm a 5,0 cm. O vidro utilizado nas aberturas foi o vidro comum de espessura 3 mm.

Tabela 1 - Características dos materiais utilizados na simulação computacional

Material	Espessura equivalente [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Argamassa externa	0,020	1,15	2000	1000
Cerâmica tijolo 12 furos	0,013	0,90	1600	920
Piso cerâmico	0,0075	1,05	2000	1000
Contrapiso laje	0,020	1,15	2000	1000
Argamassa interna	0,010	1,15	2000	1000
Concreto laje	0,150	1,75	2400	1000
Telha metálica	0,001	55	7800	460
EPS telha	0,050	0,04	16	1420
Porta metálica	0,020	55	7800	460

Já para a cobertura, a resistência térmica considerada da câmara de ar com espessura de 6,0 cm, com superfícies de alta emissividade e fluxo de calor descendente, foi de 0,21 m²K/W (ABNT, 2005).

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. Os valores calculados foram de 0,607 para as janelas, 0,411

para os cobogós e 0,205 para as venezianas. 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 horas em dia de semana e das 09:30 às 13:00 horas aos sábados), vespertino (14:00 às 17:30 horas) e noturno (18:50 às 22:25 horas).

Como o intervalo mínimo trabalhado pelo programa de simulação é de uma hora, os horários (os horários de funcionamento das salas de aula) considerados foram: matutino (09:00 às 13:00 horas em dias de semana e das 09:00 às 13:00 horas aos sábados), vespertino (14:00 às 18:00 horas) e noturno (19:00 às 23:00 horas), seguindo o período letivo.

Já para os ambientes administrativos, os horários considerados foram: matutino (08:00 às 13:00 horas em dias de semana e das 08:00 às 14:00 horas aos sábados), vespertino (14:00 às 18:00 horas) e noturno (19:00 às 23:00 horas). 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.

3.5. Tratamento estatístico

Com o intuito de avaliar o quanto os resultados de volume de ar obtidos a partir dos coeficientes de pressão obtidos pelo EnergyPlus e os coeficientes nulos eram sub ou superestimado em relação ao volume 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:

$$MBD = 100 * \frac{\frac{\sum(y_i - y)}{n}}{\frac{\sum(y)}{n}}$$

Equação 1

Onde:

y_i é o valor de referência;

y é o valor comparado;

n é o número de medidas consideradas.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos de número de renovações de ar a partir da simulação para os três casos (cp's calculados pelo CFD, pelo EnergyPlus e nulos) serão analisados para quatro ambientes: sala no primeiro pavimento e fachada norte (Figura 5); sala no primeiro pavimento e fachada sul (Figura 6); sala no último pavimento e fachada norte (Figura 7); sala no último pavimento e fachada sul (Figura 8). 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 obtidos a partir do 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 pelas linhas laranjas. Por fim, o número de renovações considerando os cp'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 5), 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.

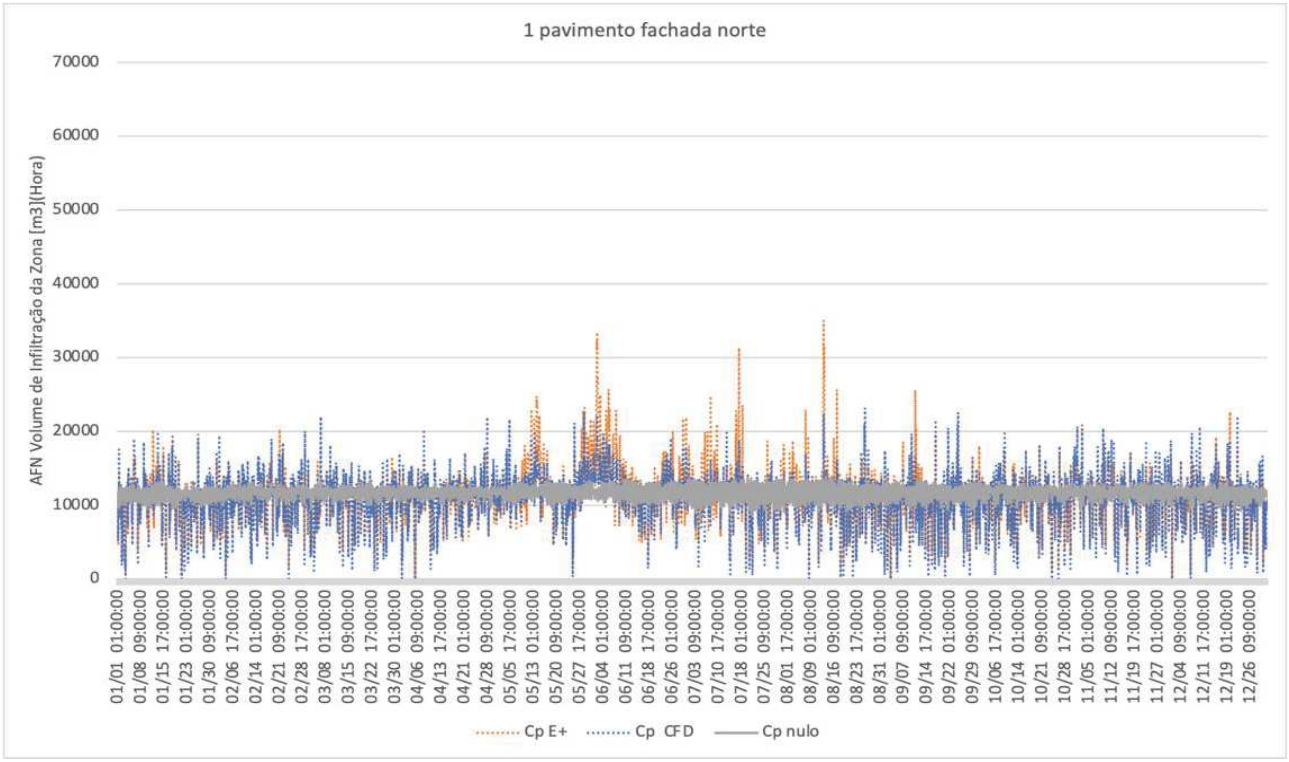


Figura 5 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no primeiro pavimento com fachada norte

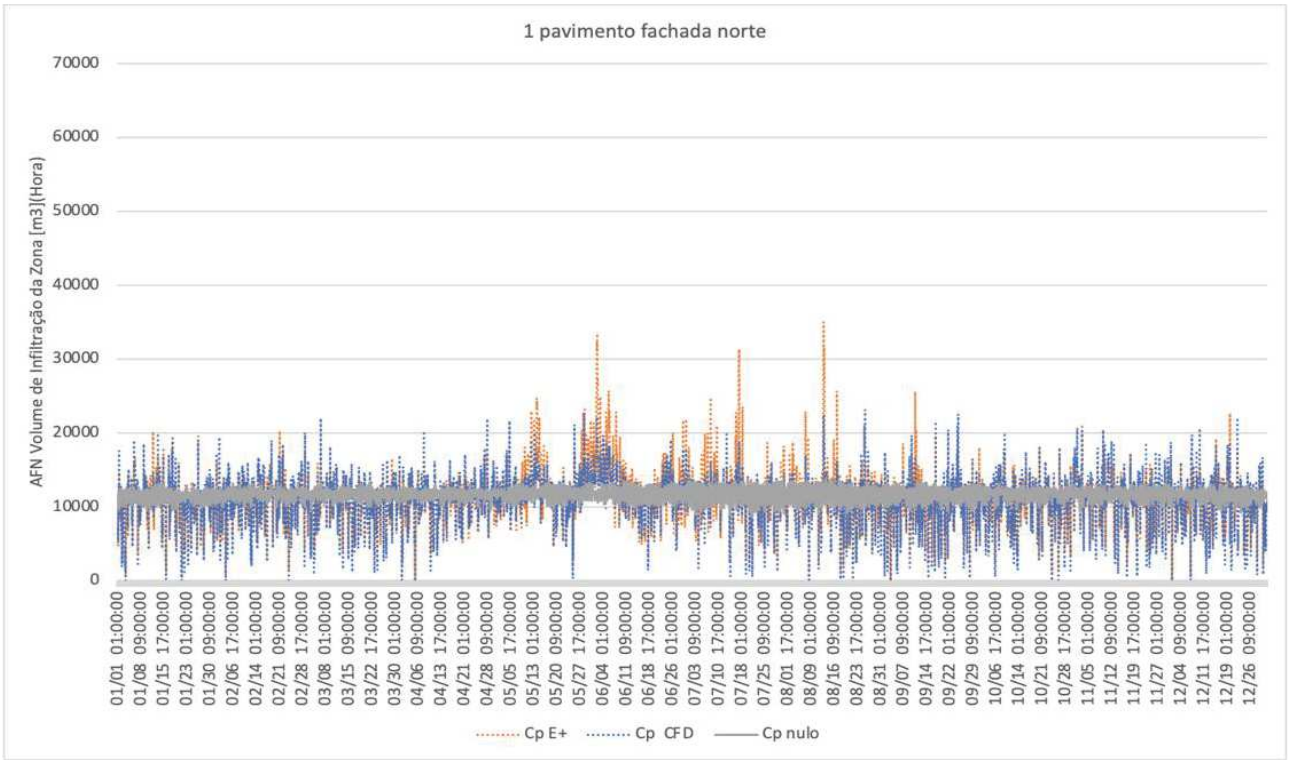


Figura 6 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no primeiro pavimento com fachada sul

Comportamento similar ao da sala no primeiro pavimento com fachada voltada para norte foi observado na sala no primeiro pavimento com fachada para sul (Figura 6). 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 momento e superestimando o volume de ar principalmente no período de inverno.

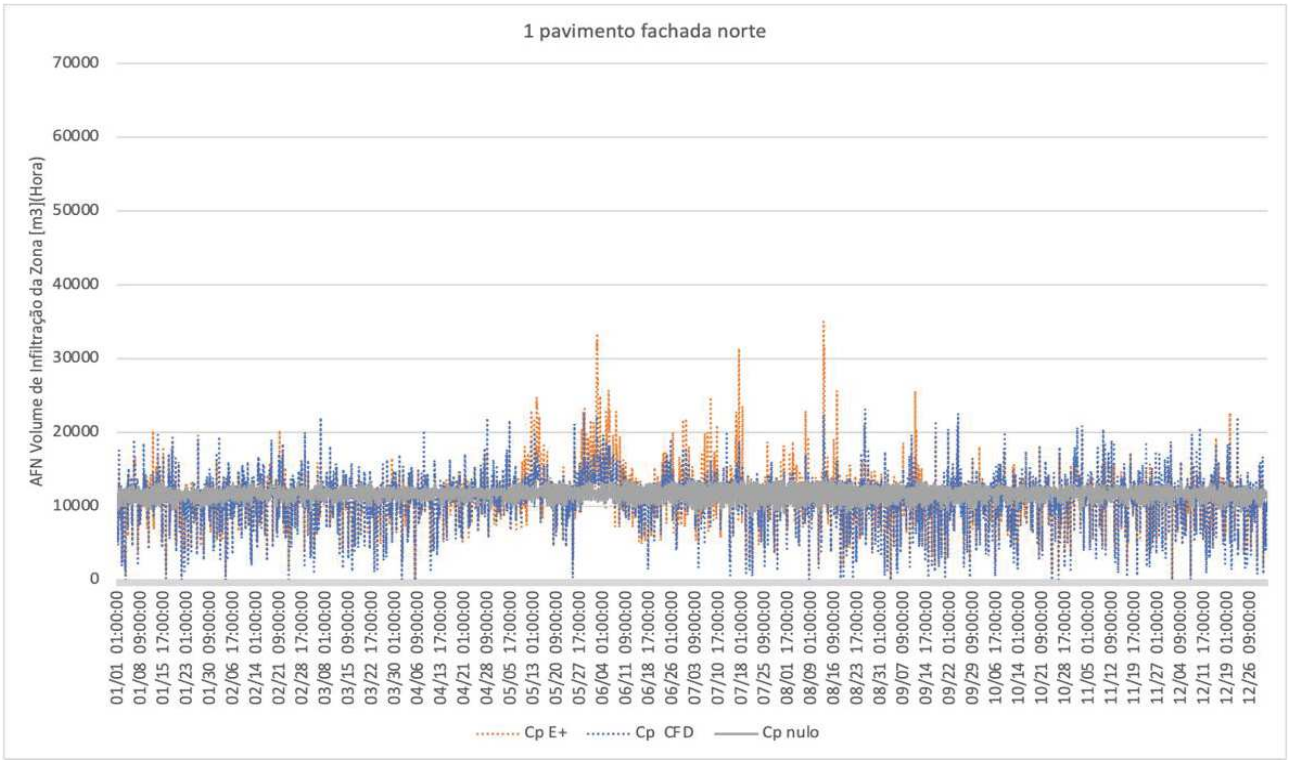


Figura 7 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no quarto pavimento com fachada norte

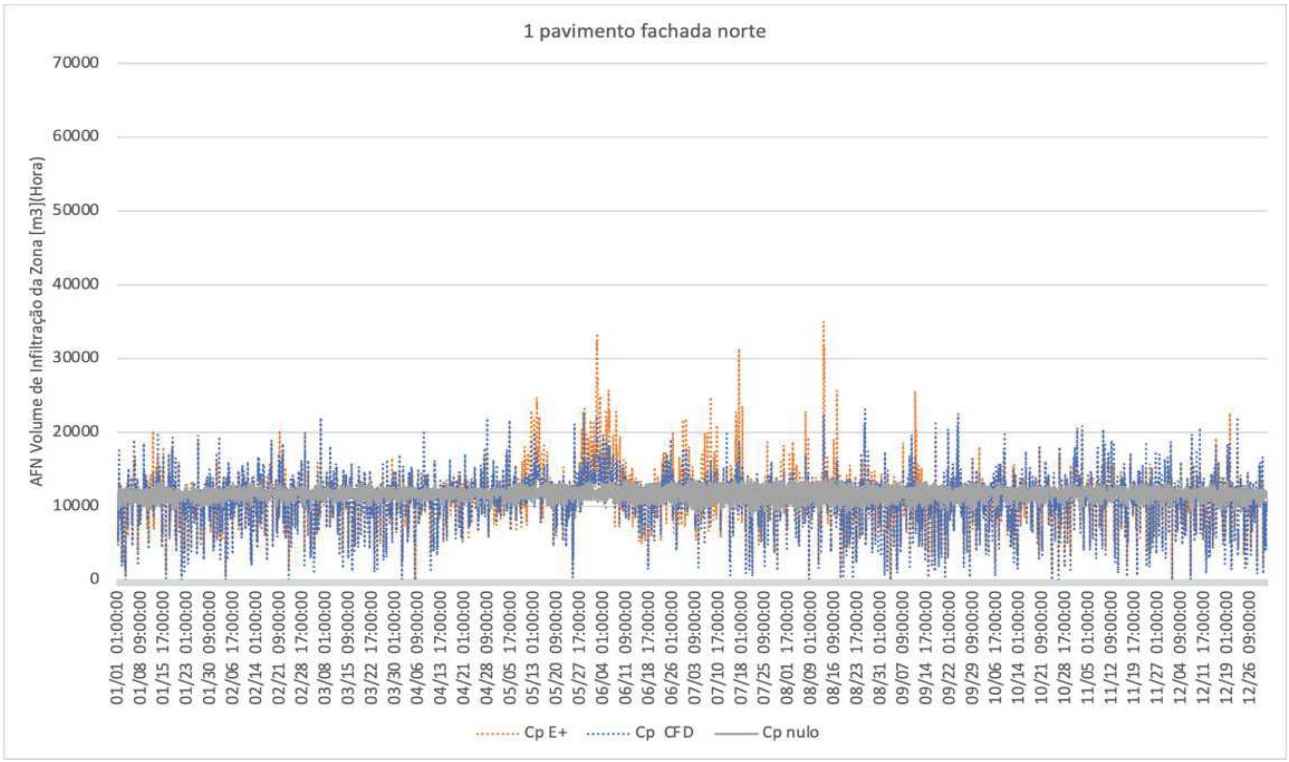


Figura 8 - Resultado comparativo do número de renovações por hora para sala no quarto pavimento com fachada sul

No caso da sala no quarto pavimento e com fachada voltada para norte (Figura 7), 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 nulo foi bastante inferior ao volume de referência.

Os mesmos comportamentos observados para a sala no quarto pavimento e com fachada norte foram observados para a sala no quarto pavimento e com fachada sul (Figura 8).

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 esta de grande relevância para climas quentes como o de Palmas. Quanto os coeficientes de pressão calculados pelo EnergyPlus, os volumes de ar para os ambientes apresentaram comportamento similar, mas ainda sim observa-se haver variações quantitativas consideráveis, ora o volume de ar sendo subestimado, ora superestimado.

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 2). é 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 em superestimar os valores. As fachadas voltadas para norte coincidem com a incidência dos ventos, enquanto as voltadas para sul estão na sombra de vento 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 quanto utilizando os coeficientes de pressão nulo são consideravelmente subestimados, prejudicando assim a análise da ventilação natural no prédio.

Tabela 2 – Comparação dos MBD's resultantes para os casos analisados, em porcentagem (%)

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

5. CONCLUSÕES

A ventilação natural é uma estratégia de grande relevância para a obtenção de conforto térmico em climas predominantemente quentes, como em grande parte do território brasileiro. Contudo, sua correta estimativa conforme as soluções adotadas em projeto enfrenta algumas dificuldades em razão da difícil 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.

Para tal, uma mesma edificação foi simulada utilizando coeficientes de pressão calculados a partir do CFD, 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 resultando do EnergyPlus apresentem comportamentos similares, há uma tendência de subestimativa do volume de ar obtido utilizando o EnergyPlus para cálculo dos coeficientes de pressão. Essa tendência a subestimar 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.

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 em se adotar os coeficientes de pressão nulos.

Para resultados válidos e de boa representatividade, a recomendação é pelo o cálculo dos coeficientes de pressão por CFD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD, F. (ed.). **Natural Ventilation in Buildings**. Londres: James & James, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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 : s.n., 2005.

BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil: 1961 - 1990**. Ed. rev. ampl. INMET. Brasília, p. 465. 2009.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, 2009; (44) 848-858.

DOE. **Input/Output Reference**, In EnergyPlus Documentation Main Menu. [S.l.].

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 of…** Yokohama, 2006.

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

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

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. 273 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquiteura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

LIN et al. Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. **Building and Environment,** 2014; (79) 152-167.

MARTINS, N. R.; DA GRAÇA, G. C. Validation of numerical simulation tools for wind-driven natural ventilation design. **Building Simulation,** 2016; (9) 75–87

MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of Wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. **Building and Environment, 2013;** (60) 137-149

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. 28 p.

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.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment,** 2012; (53) 34-48.

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

TOLEDO, A. Critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios. **VI Encontro Nacional e III Latinoamericano sobre Conforto no Ambiente Construído**. São Paulo: ANTAC. 2001.

TOMINAGA, Y. et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,** 2008; (96) 1749-1761.

AGRADECIMENTOS

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