

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

ANÁLISE DE PARÂMETROS INFLUENCIADORES DE CONVECÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES

RICARDO NUNES PEREIRA JUNIOR¹, PAULO CESAR MIORALLI², ELSON AVALLONE³

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Catanduva, junior.nunes@aluno.ifsp.edu.br.

² Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Campus Catanduva, mioralli@ifsp.edu.br.

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Campus Catanduva, elson.avallone@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 6.04.02.01-6 Planejamento e Projetos da Edificação

RESUMO: Este estudo visa comparar computacionalmente as vazões de ar em edificações utilizando diferentes recomendações da literatura para os valores dos coeficientes de pressão externa nas paredes, sendo as vazões impulsionadas pela ação dos ventos e pelo efeito chaminé. Simulações computacionais, baseadas em um modelo matemático teórico de vazão, foram conduzidas considerando a variação da área das aberturas e a variação da altura entre as aberturas de entrada e saída de ar. Os métodos normativos NBR 6123 (1988), British Standards (1991), Liddament (1986), Lamberts (2014) e Swami e Chandra (1987) foram utilizados para a obtenção dos coeficientes de pressão, podendo estes parâmetros serem diferentes dentre as recomendações de cada fonte e, conseqüentemente, implicar em valores díspares de vazão obtidos por um mesmo modelo. Os resultados mostraram, com o uso dos métodos normativos testados, que a variação da área das aberturas de entrada e saída de ar da edificação tem um impacto mais significativo na ventilação natural do que a variação da altura entre elas. Foi observado ainda que, com a variação destes parâmetros, o método de Swami e Chandra (1987) superestima os valores de vazão quando comparado com os demais, enquanto que o da British Standards (1991) subestima.

PALAVRAS-CHAVE: climatização; convecção; análise computacional.

ANALYSIS OF PARAMETERS THAT INFLUENCE NATURAL CONVECTION IN BUILDINGS

ABSTRACT: This study aims to computationally compare air flows in buildings using different literature recommendations for the values of external pressure coefficients on walls, with flows driven by wind action and the chimney effect. Computer simulations, based on a theoretical mathematical model of flow, were conducted considering the variation in the area of the openings and the variation in height between the air inlet and outlet openings. The normative methods NBR 6123 (1988), British Standards (1991), Liddament (1986), Lamberts (2014) and Swami and Chandra (1987) were used to obtain the pressure coefficients, and these parameters may be different among the recommendations of each source and, consequently, imply in disparate flow values obtained by the same model. The results showed, using the normative methods tested, that the variation in the area of the building's air inlet and outlet openings has a more significant impact on natural ventilation than the variation in the height between them. It was also observed that, with the variation of these parameters, the Swami and Chandra (1987) method overestimates the flow values when compared to the others, while the British Standards (1991) method underestimates them.

KEYWORDS: air conditioning; convection; computational analysis.

INTRODUÇÃO

A ventilação natural é um componente fundamental na promoção do conforto térmico e na qualidade do ar interno em edificações, podendo ocorrer conjuntamente pelos mecanismos de ação dos ventos e efeito chaminé. A ação dos ventos é um processo no qual a diferença de pressão entre as faces de uma edificação, causada pela incidência do vento, provoca o movimento do ar através de aberturas estratégicas. Já o efeito chaminé é um fenômeno que ocorre devido à diferença de densidade entre o ar quente e o ar frio, promovendo a movimentação ascendente do ar quente e a entrada de ar fresco na base da edificação.

Para a obtenção da vazão de ar em ventilação natural em edificações podem ser utilizados modelos teóricos que consideram coeficientes de pressão externa. Estes coeficientes, que dependem da orientação do vento e de dados geométricos da edificação, são recomendados por diferentes fontes da literatura, podendo resultar em variações significativas nos cálculos de vazão de ar quando obtida por um mesmo modelo teórico, a depender da fonte escolhida.

A análise comparativa dos diferentes coeficientes de pressão disponíveis na literatura é crucial para entender a disparidade dos resultados obtidos. Neste trabalho é utilizado um modelo teórico de ventilação natural por ação conjunta dos ventos e efeito chaminé disponível na literatura (Frota, 1989). A vazão de ar é obtida com o uso de diferentes recomendações para os valores dos coeficientes externos de pressão nas paredes à barlavento e à sotavento da edificação. Os resultados de vazão são comparados dentre os diferentes casos considerando a variação de dois parâmetros influenciadores no processo de convecção natural: a área das aberturas de entrada e saída de ar e a altura entre elas.

MATERIAL E MÉTODOS

A análise da convecção natural foi conduzida considerando um pavilhão industrial de pequeno porte com formato de paralelepípedo, conforme ilustrado na Figura 1. As aberturas de entrada e saída de ar estão posicionadas em paredes opostas (nas paredes que indicam o comprimento L do pavilhão), sendo duas aberturas por parede. As aberturas são consideradas de áreas iguais e posicionadas na mesma cota de altura. O pavilhão será considerado como estando isolado em campo aberto. Os parâmetros L , W e H são, respectivamente, o comprimento, a largura e a altura do pavilhão. O parâmetro h representa a diferença de cota entre os centros das aberturas e θ é o ângulo de incidência do vento considerado $\theta = 90^\circ$ neste estudo.

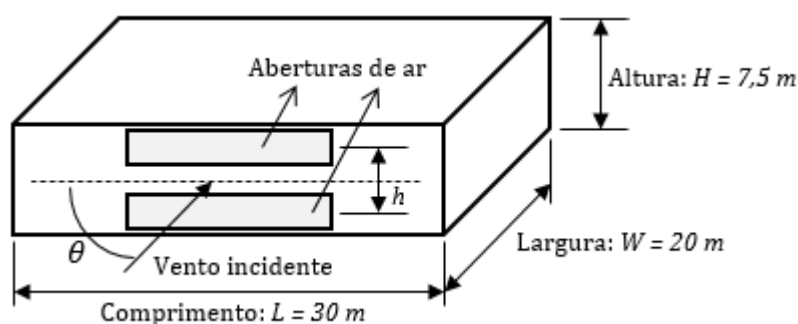


Figura 1. Ilustração do pavilhão adotado para análise.

No caso de ventilação natural por ação dos ventos e efeito chaminé simultaneamente, considerando escoamento em regime permanente e as aberturas de entrada e saída de ar idênticas, Frota (1989) propõe dois modelos independentes para a obtenção de vazão de ar, isto é, um modelo exclusivo para a obtenção de vazão por ação dos ventos e outro exclusivo para o cálculo da vazão por efeito chaminé. A Eq. (1) corresponde ao modelo de Frota (1989) para o cálculo da vazão de ar em ventilação natural por ação dos ventos, Q_V (m^3/s), em uma edificação. A Eq. (2) refere-se ao modelo para a obtenção da vazão de ar por efeito chaminé, Q_C (m^3/s). A Eq. (3) corresponde à vazão total de ar, Q_T (m^3/s), que computa a ação dos ventos e o efeito chaminé simultaneamente. Na Eq. (1), A é área de abertura de entrada ou de saída de ar (m^2), consideradas iguais, V é a velocidade média do vento (m/s) à barlavento e os parâmetros c_{pe} e c_{ps} são os coeficientes de pressão externos (adimensionais) à barlavento (na entrada de ar) e à sotavento (na saída de ar), respectivamente. Quanto ao parâmetro K ,

Frota e Schiffer (2001) recomendam $K = 0,6$. Na Eq. (2), A é a área de abertura de entrada ou de saída de ar (m^2), tomada a menor no caso de diferentes, h é a distância vertical entre os centros das aberturas de entrada e de saída do ar (m) e ΔT a diferença entre as temperaturas do ar que sai e que entra na edificação (K). O coeficiente K_0 é dado por $K_0 = 0,139$ para áreas iguais de entrada e saída de ar.

$$Q_V = \frac{KAV}{\sqrt{2}} \sqrt{(c_{pe} - c_{ps})} \quad (1)$$

$$Q_C = K_0 A \sqrt{h \Delta T} \quad (2)$$

$$Q_T = \sqrt{Q_V^2 + Q_C^2} \quad (3)$$

Os coeficientes externos de pressão, c_{pe} e c_{ps} , são estabelecidos primordialmente em função das dimensões geométricas da edificação e do ângulo de incidência do vento, podendo ainda estarem sujeitos às alterações provenientes da presença de anteparos. Seus valores foram obtidos a partir de cinco recomendações da literatura, sendo: norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988); norma inglesa British Standards Institution (1991); Liddament (1986); Lamberts, Dutra e Pereira (2014) e; Swami e Chandra (1987). A Tabela 1 apresenta a forma de obtenção dos coeficientes de pressão para cada recomendação e os seus respectivos valores obtidos para o pavilhão analisado neste trabalho.

Tabela 1. Coeficientes externos de pressão.

Método	Forma de obtenção	Valores
NBR 6123 (1988)	Tabelado	$c_{pe} = 0,7$; $c_{ps} = -0,5$
British Standards (1991)	Tabelado	$c_{pe} = 0,7$; $c_{ps} = -0,25$
Liddament (1986)	Tabelado	$c_{pe} = 0,5$; $c_{ps} = -0,7$
Lamberts, Dutra e Pereira (2014)	Calculado por equação	$(c_{pe} - c_{ps}) = 1,2$
Swami e Chandra (1987)*	Calculado por equação	$c_{pe} = 1,2$; $c_{ps} = -0,7$

*Com a equação de Swami e Chandra (1987) foi possível o cálculo apenas de c_{pe} . Para este caso, o valor de c_{ps} foi considerado como sendo o mesmo de Liddament (1986).

Um código computacional em linguagem *Python* de programação foi escrito para o cômputo das Eqs. (1), (2) e (3) necessárias para análise da ventilação natural por ação dos ventos e por efeito chaminé conjuntamente, considerando as diferentes recomendações da literatura adotadas para os coeficientes de pressão. Para cada recomendação, a vazão total de ar foi calculada considerando dois casos distintos, mostrados na Tabela 2, nos quais a prescrição dos valores da área das aberturas de entrada e saída de ar, e também de medidas de diferença de cota entre elas, foi baseada nas dimensões geométricas do pavilhão. Vale ressaltar que cada um dos casos da Tabela 2 foi simulado para cada um dos métodos apresentados na Tabela 1, implicando em diferentes valores dos coeficientes de pressão dentre as simulações.

Tabela 2. Casos simulados no programa computacional.

CASOS	ΔT (°C)	V (m/s)	θ (°)
Varição da área das aberturas: $10 \leq A \leq 150 \text{ m}^2$ Cota de altura entre as aberturas fixada: $h = 3 \text{ m}$	4	1,994	90
Varição da cota de altura entre as aberturas: $0,5 \leq h \leq 5 \text{ m}$ Área das aberturas fixada: $A = 70 \text{ m}^2$			

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do programa computacional, com o conjunto de dados obtidos e devidamente tabulados para os dois casos da Tabela 2 simulados para as cinco recomendações da literatura para os coeficientes de pressão, uma análise comparativa de resultados foi realizada. As Figuras 2(a) e 2(b) mostram, respectivamente, a vazão total de ar em função da área A das aberturas e da cota de altura h entre elas, para os cinco métodos de obtenção dos coeficientes de pressão. Em ambos os gráficos, todos os métodos exibem uma tendência linear, onde a vazão de ar aumenta com A e h . No entanto, há variações na

inclinação das linhas, indicando diferentes taxas de aumento da vazão de ar. A linha tracejada representa o valor médio de vazão obtido dentre os cinco métodos para cada valor de A e h fixado. Nota-se que, em ambas as figuras, o método de Swami e Chandra (1987) é o que apresenta a maior vazão de ar, sendo o único com valores de vazão superiores aos valores médios. Também é o método cujos valores de vazão mais se distanciam dos valores obtidos pelos outros métodos. Os métodos NBR 6123 (1988), Liddament (1986) e Lamberts, Dutra e Pereira (2014) apresentam resultados iguais de vazão conforme varia A e h , o que é explicado pelo fato desses métodos possuírem o mesmo valor da diferença $(c_{pe} - c_{ps}) = 1,2$. A recomendação de British Standards (1991) é a mais conservadora, apresentando os menores valores de vazão. Essas diferenças destacam como a escolha do método pode influenciar os resultados no cálculo da ventilação natural.

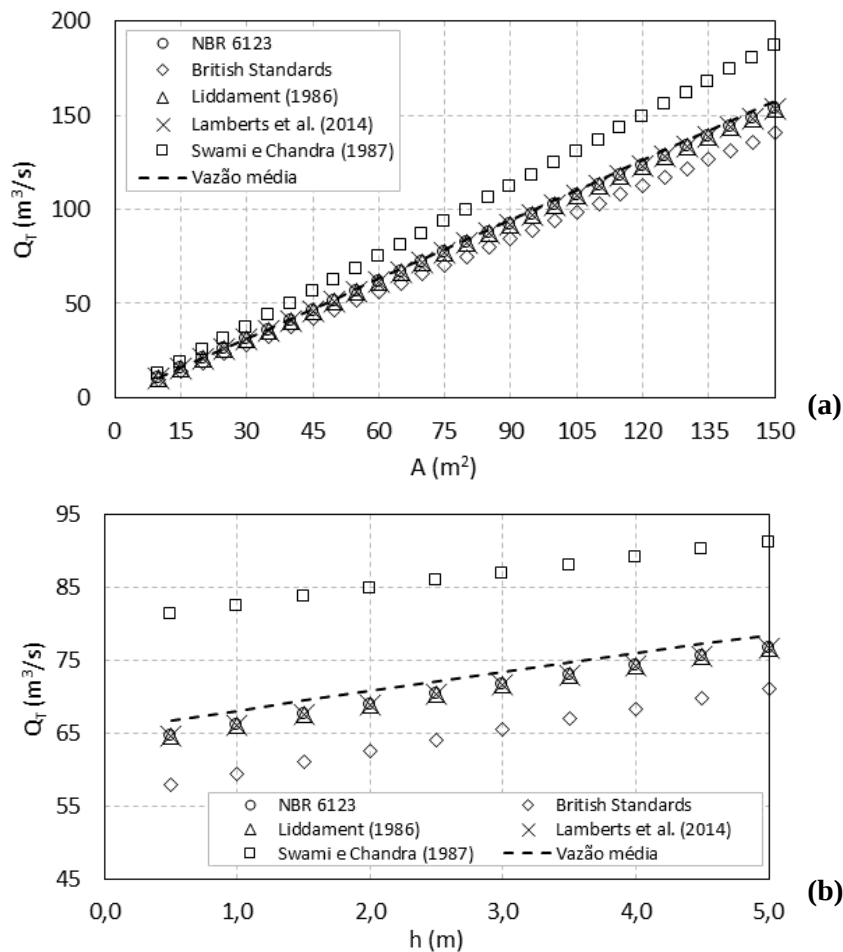


Figura 2. (a) Vazão Q_T versus área A das aberturas; **(b)** Vazão Q_T versus cota de altura h entre as aberturas.

As Figuras 3(a) e 3(b) apresentam, respectivamente, a diferença percentual entre os valores de vazão obtidos por cada recomendação da literatura e o valor médio de vazão para cada valor de A e h fixado, tomando como referência a vazão média para o cálculo. Ambos os gráficos mostram que os métodos que mais destoam da média de valores são Swami e Chandra (1987) e British Standards (1991), com diferenças próximas a 20 e 12% respectivamente. Outra característica é que as diferenças entre a vazão média e a vazão obtida para todos os métodos não se altera com a variação da área na Fig. 3(a). Isso porque a área A está presente nas Eqs. (1) e (2), para Q_V e Q_C , que compõem o cálculo da vazão total Q_T , atuando como um parâmetro que mantém constante a diferença entre Q_T e a vazão média. Diferentemente ocorre na Fig. 3(b) onde há variação nos valores de diferença percentual à medida que h varia, posto que este parâmetro aparece somente no cálculo do efeito chaminé. Neste caso, as maiores diferenças correspondentes aos menores valores de h .

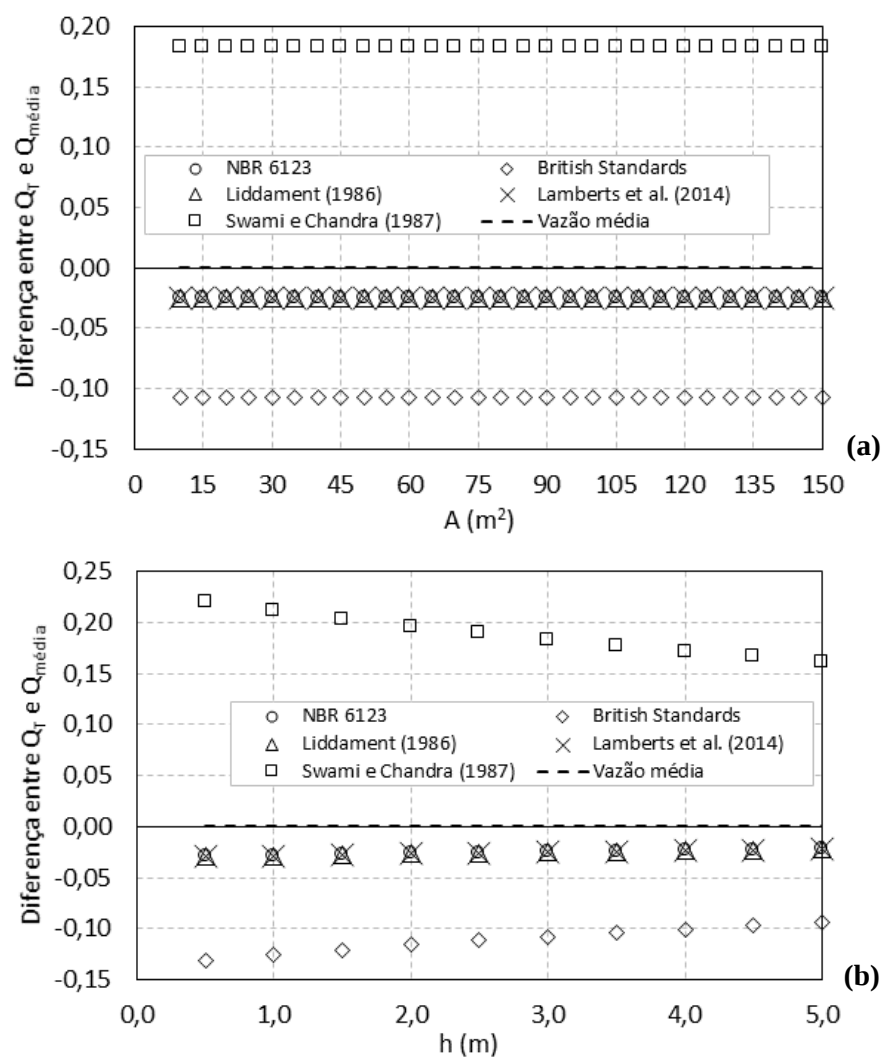


Figura 3. Diferença entre vazão Q_T e vazão média considerando: **(a)** variação da área A das aberturas; **(b)** variação da cota de altura h entre as aberturas.

Os métodos de Swami e Chandra (1987) e British Standards (1991) são os que apresentam maior diferença de resultados entre si. A Figura 4 mostra um comparativo entre os valores de vazão obtidos por esses métodos em função da variação de h .

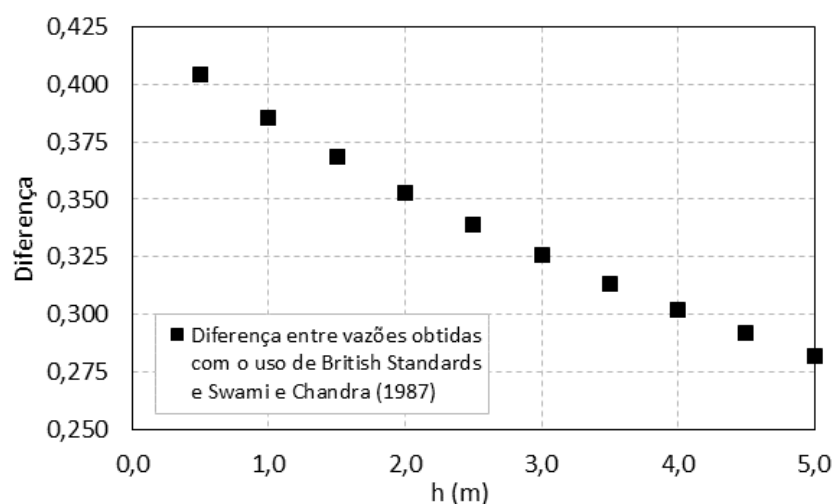


Figura 4. Diferença de vazão entre os métodos Swami e Chandra (1987) e British Standards (1991).

Observa-se na Figura 4 que a diferença entre os valores de vazão chega a 40% para baixos valores de h e cerca de 27% para os maiores valores de h simulados, mostrando ser significativa. Em um comparativo entre esses dois métodos considerando a variação da área A das aberturas, a diferença entre seus valores de vazão é constante para qualquer valor de área, sendo em torno de 32%.

CONCLUSÕES

Para todas as recomendações de coeficientes de pressão testadas, a variação da área das aberturas de entrada e saída de ar do pavilhão tem um impacto mais significativo na ventilação natural do que a variação da altura entre elas. Isso se deve ao fato de que o aumento da área oferece mais espaço para o fluxo de ar, favorecendo tanto a ventilação por vento quanto o efeito chaminé.

Observando o comportamento dos parâmetros A e h como influenciadores da convecção natural, verifica-se que para maximizar a eficiência desse mecanismo, a área das aberturas deve ser priorizada. Todavia, a cota de altura entre as aberturas não é insignificante, influenciando o processo de forma moderada.

A escolha do método de cálculo também desempenha um papel importante, com Swami e Chandra (1987) fornecendo previsões mais otimistas e British Standards (1991) apresentando uma abordagem mais conservadora. Foi constatado que o método de Swami e Chandra (1987) superestimou os valores de vazão média quando comparado com os demais, enquanto que o da British Standards (1991) subestimou, além de haver diferenças significativas dentre os valores de vazão obtidos por esses dois métodos.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

R.N.P.JR. escreveu o código computacional e procedeu com a realização dos testes e obtenção de resultados. P.C.M. possibilitou a metodologia, contribuiu com aplicações e com a apresentação dos resultados. E.A. atuou com contribuições intelectuais significativas. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Ao programa PIBIFSP/IFSP pelo suporte.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Code of practice for design of buildings**: ventilation principles and designing for natural ventilation. BS 5925. London: 1991.

FROTA, A. B. **Ventilação de edifícios industriais**: modelo paramétrico para dimensionamento de sistemas de ventilação natural por efeito chaminé. 1989. Tese (Doutorado em Ciências da Arquitetura) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.

LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques**: an applications guide. The Air Infiltration and Ventilation Centre. Bracknell, England: Oscar Faber Partnership, 1986.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. **Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings**. ASHRAE Research Project 448-RP. Final report FSEC-CR-163-86, 1987.