

CARACTERIZAÇÃO DE JANELAS NO CÁLCULO DE VAZÃO POR MEIO DO COEFICIENTE DE DESCARGA

Daniel Cóstola (1); Márcia P. Alucci (2); David Etheridge (3)

(1) Eindhoven University of Technology (d.costola@tue.nl)

(1) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo FAU – USP (daniel_costola@uol.com.br)

(2) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo FAU – USP (marcialu@usp.br) LABAUT / FAU-USP

(3) School of Build Environment (SBE) – The University of Nottingham,

(David.Etheridge@nottingham.ac.uk)

RESUMO

As aberturas de um edifício são elementos determinantes no desempenho da ventilação natural por ação dos ventos, mas sua caracterização ainda representa um desafio nos estudos de ventilação. Este artigo apresenta o estado da arte na caracterização das aberturas da edificação quanto à ventilação natural por ação dos ventos, por meio do coeficiente de descarga (C_z), o qual é dado de entrada de diversos programas computacionais, tais como: EDSL-TAS, Energy Plus, ESP-r, Aiolos, Contam e etc. A fundamentação teórica trata da definição de C_z , dos fatores que influenciam o valor de C_z , e valores de referência encontrados na literatura para alguns tipos de aberturas. As limitações da definição de C_z na descrição de grandes aberturas são discutidas. O aparato experimental para a determinação de C_z é brevemente descrito, e aplicado em um estudo de caso em escala reduzida, para uma abertura circular e uma chaminé curta. Conclui-se que a utilização do coeficiente de descarga para a caracterização de aberturas para a ventilação natural é técnica e economicamente viável. Contudo, a sua utilização ainda é restrita devido à falta de flexibilidade dos programas de cálculo da ventilação natural, os quais apenas consideram um valor fixo para C_z .

Palavras-chave: coeficiente de descarga, ventilação natural.

ABSTRACT

Buildings openings are important elements in the wind-driven natural ventilation performance, but the characterization of the openings remains as a challenge in ventilation studies. This paper presents the state of the art on the characterization of openings for wind-driven ventilation, focusing on the discharge coefficient (C_z) of the opening, which is input in several software, such as: EDSL-TAS, Energy Plus, ESP-r, Aiolos, Contam e etc. The factors that affect C_z are presented, followed by a summary of reference values found in the literature. Limitations implicit in the definition of C_z are discussed. The experimental set-up to determine C_z is present and applied to a case study in reduced-scale, consisting of a circular orifice and a short stack. This research conclusion is that the use of C_z to describe the opening behaviour is technically and economically viable. However, the ventilation calculation software need to be improved in order to consider different C_z values as a function of wind direction.

Keywords: discharge coefficient, natural ventilation.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural constitui uma importante estratégia na obtenção de conforto térmico e de níveis adequados de qualidade do ar no ambiente construído, em especial em climas quentes como os presentes em grande parte do território brasileiro.

A caracterização das aberturas é uma etapa fundamental no estudo da ventilação natural, e este é o objeto do presente artigo. Nesta seção são apresentadas as definições de algumas variáveis usadas para

caracterizar o desempenho das aberturas, alguns valores de referência encontrados na bibliografia, e as limitações inerentes a estas definições.

1.1 Definição

A geometria da abertura e sua interação com o escoamento são determinantes para o cálculo da vazão da ventilação natural por ação dos ventos. Na Figura 1 são apresentados alguns tipos de aberturas comumente encontradas em edifícios, onde se pode notar a variedade de geometrias disponíveis, assim como a modificação na geometria da abertura em relação ao fluxo quando este muda de direção.

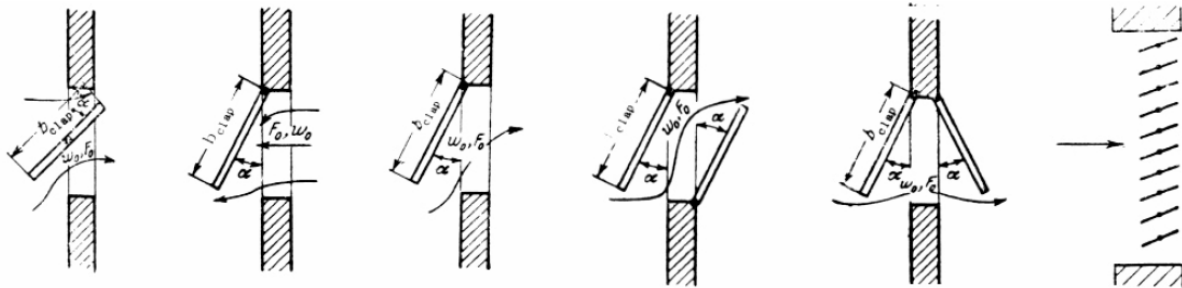


Figura 1 - Tipos de Aberturas.
Fonte: Idel'cik (1960)

Em uma janela “ideal”, toda a pressão exercida pelo vento se converte em fluxo de ar na abertura, porém em janelas reais uma parte da energia deste escoamento é dissipada. Essa perda varia em função da forma da janela, e de sua posição no escoamento. Um exemplo deste fenômeno é a “vena contracta”, que é caracterizada pela constrição que o escoamento sofre ao passar pela abertura, de forma que a área ocupada pelo escoamento não corresponde à área total da abertura.

Da energia que atinge a abertura, uma parte é dissipada e uma parte é utilizada para promover a ventilação. Assim, a parcela útil varia entre 100% da energia (ou seja, não há perdas) e quase 0% da energia (por exemplo, no caso de uma abertura dotada de diversas telas mosquiteiro).

Chama-se coeficiente de descarga (C_z) da abertura o valor entre 1 e 0 que fornece a parcela útil da energia para a ventilação (ETHERIDGE; SANDBERG, 1996). O valor comumente utilizado para C_z é 0,6. Uma parte da bibliografia adota o símbolo C_d para o coeficiente de descarga, contudo este símbolo também é adotado para o coeficiente de arrasto. Assim, dá-se preferência neste trabalho ao uso do símbolo C_z (ETHERIDGE; SANDBERG, 1996). Define-se C_z por:

$$C_z = \frac{q}{A} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde Δp é a diferença de pressão (em Pa) entre a face externa e interna da abertura; ρ é a massa específica do ar (kg/m^3); A é a área nominal da abertura (m^2) e q é a vazão na abertura (m^3/s).

Uma outra forma de caracterização da abertura é o coeficiente de perda de carga (ζ). De posse deste valor podemos determinar C_z por:

$$C_z = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad [\text{Eq. 02}]$$

A conveniência no uso de C_z ou ζ depende da forma adotada para o cálculo da vazão por ventilação natural. Para o usuário de programas computacionais, trata-se de uma questão meramente formal, uma vez que de posse de um dos valores, o outro é facilmente obtido. Assim, em função do programa a ser utilizado o valor de C_z ou ζ será usado como dado de entrada.

C_z afeta linearmente a quantidade de energia disponível na abertura, a importância de seu valor é a mesma que o da área da abertura. Se o C_z é estimado erroneamente em 0,6 quando seu valor real é 0,3, o efeito é o mesmo de utilizar nos cálculos uma janela de área aproximada de 2 m^2 quando sua área real é de 1 m^2 , levando obviamente a erros bastante significativos.

1.2 Valores de Referência

Existe uma vasta bibliografia de dados de C_z para dispositivos em tubulações e terminais de sistemas de ventilação mecânica, mas poucos estudos dedicados a aberturas para ventilação natural foram encontrados.

Uma exceção é o trabalho de Idel'cik (1960), no qual se pode encontrar dispositivos comumente empregados como aberturas de ventilação natural. Estes dados devem ser utilizados apenas quando a determinação de C_z , experimental ou por simulação de CFD, não for possível. Em particular, para dispositivos que se projetam para fora da fachada do edifício é necessário realizar um estudo mais detalhado, pois estes apresentam forte interação com o edifício.

A Tabela 1 apresenta valores bastante arbitrários para C_z em função do tipo de janela. A incerteza nestes valores é bastante elevada e eles devem ser utilizados com cautela. Cóstola (2006) apresenta um resumo mais detalhado dos valores de referência.

Tabela 1 – Valores de referência de C_z .

Tipo de abertura	C_z
Janela de correr, ou similar com forma retangular ou circular totalmente desobstruída	0,6 a 0,75
Janela de correr com tela	0,2
Maxi-ar	0,15 a 0,3
Pivotante	0,2 a 0,45

Fonte: Adaptado de IDEL'CIK (1960).

1.3 Relação com outras variáveis

Historicamente, o estudo de C_z tem-se dado em condições de “ar parado” na qual uma das faces da abertura é submetida a uma sobrepessão, mas não é submetida aos fluxos tangentes à parede encontrados em aberturas de edifícios reais.

Em estudo em condição de “ar parado”, Idel'cik (1960) demonstra que C_z varia com o número de Reynolds (Re) da abertura e com sentido do escoamento na mesma.

Além destes dois parâmetros, diversos estudos como Chiu (2005) e Kurabuchi et al (2004) demonstram que C_z é afetado pelo escoamento externo junto à abertura.

A Figura 2 apresenta as linhas de corrente que penetram uma abertura, o chamado “stream tube”, quando o ângulo entre a face e o vento varia entre 0° e 45° .

A interação entre o escoamento, o edifício e a abertura se reflete no C_z , a despeito do Re da abertura e do sentido do escoamento serem os mesmos nos três casos.

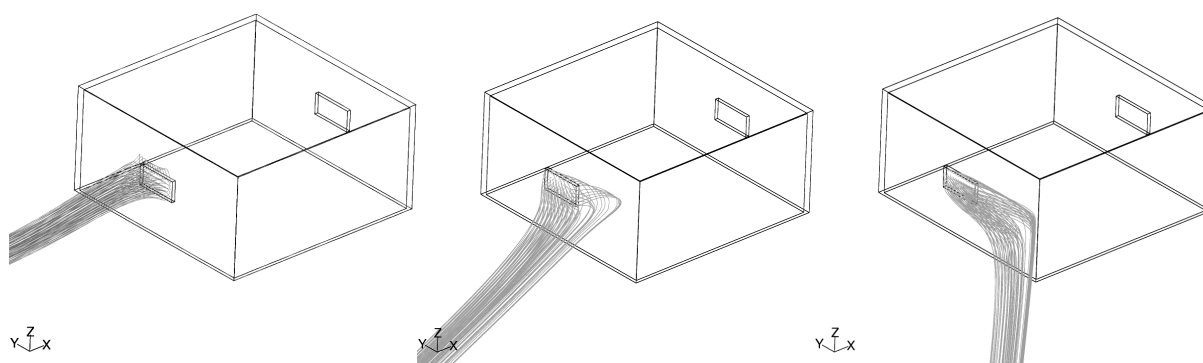


Figura 2 – Simulação com CFD de “Stream tubes” para vento a 0° , $22,5^\circ$ e 45° .

Fonte: http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/ventilation/CFD_Result.html#Stream_tube acessado em 01.05.2007

1.4 Limitações da Caracterização da Abertura usando C_z

A definição de C_z utilizada para o cálculo da vazão nos programas de computador consultados para esta pesquisa (TAS, Energy Plus, Aiolos, Contam, ESP-r) assume que C_z é função apenas da geometria da abertura, e portanto não varia com o escoamento. De fato, o conceito de C_z não faz menção ao Re da abertura, sentido do escoamento na abertura, e escoamento externo junto à abertura. Todavia, esta simplificação adotada pelos programas de computador impede que valores mais precisos de C_z sejam utilizados de forma efetiva no cálculo de ventilação natural.

Isto ocorre devido à ausência de dados experimentais e modelos que permitam estabelecer C_z nestes termos, sendo este um campo de pesquisa fértil e ativo cujos desdobramentos devem promover mudanças na definição dos valores de C_z . De forma geral, pode-se esperar que futuras ferramentas para o cálculo da vazão no interior do edifício utilizem:

- Solução iterativa do cálculo de vazão e de Re da abertura de forma a determinar C_z em função de Re
- C_z independentes para cada sentido do escoamento na abertura, por meio de solução iterativa do cálculo de vazão.
- Métodos preditivos de C_z em função da geometria do edifício e da configuração do escoamento, como o proposto por Kurabushi et al (2004).

2. OBJETIVO

Diante das limitações apresentadas pelos valores de referência normalmente utilizados para C_z , e do potencial apresentado por técnicas experimentais no estudo desta variável, este trabalho tem por objetivo sumarizar as informações necessárias à caracterização da abertura por meio do coeficiente de descarga, com foco no arranjo experimental necessário para a sua determinação.

3. MÉTODO

3.1 Determinação experimental de C_z

A determinação experimental de C_z envolve a produção de uma vazão no caixilho em estudo e a medição das variáveis usadas na definição de C_z :

- vazão “ q ” (m^3/s)
- área da abertura “ A ” (m^2)
- massa específica do ar “ ρ ” (kg/m^3)
- diferença de pressão entre as faces “ Δp ” (Pa)

O esquema para a montagem do experimento para a determinação de C_z é apresentado por Chiu (2004) e é reproduzido na Figura 3. A Figura é apresentada em inglês, conforme o original (CHIU, 2004). Todos os equipamentos descritos neste esquema são de baixo custo e simples operação.

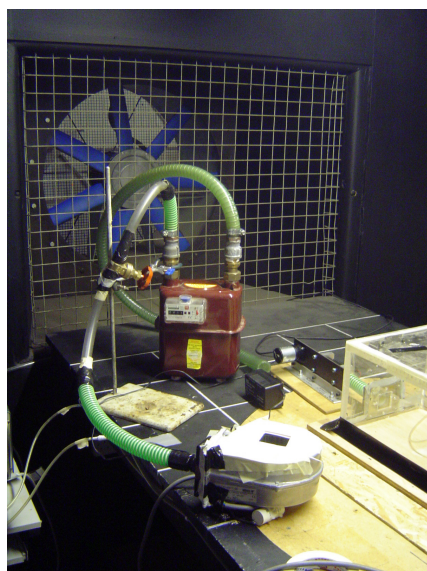
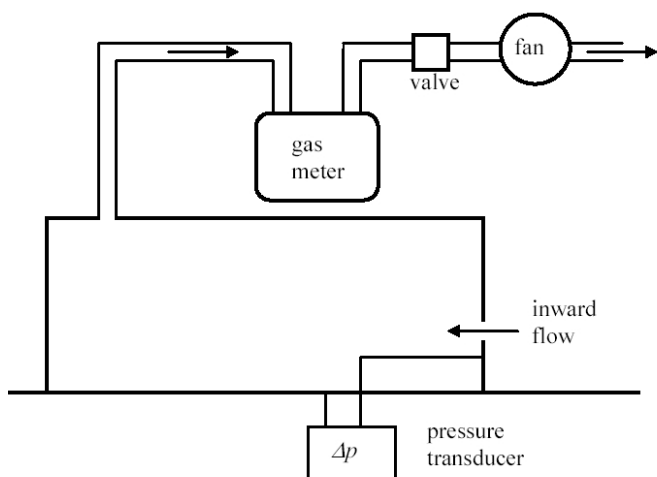


Figura 3 - Esquema do experimento para a determinação de C_z (CHIU, 2004) e foto do mesmo.

Constrói-se uma caixa cuja dimensão seja suficiente para eliminar interferências entre o escoamento na entrada e na saída da mesma, na qual é instalado o caixilho em uma das faces. A norma inglesa BS 13141-1 (BSI, 2004) aconselha que a face da caixa que recebe o caixilho proporcione um espaçamento mínimo de 30 cm da mesma em relação às bordas caixa, e tenha profundidade mínima de 50 cm.

A face da caixa na qual a janela é instalada deve apresentar a mesma espessura da parede real, na qual o caixilho será instalado.

A caixa deve ser estanque e resistir a pressões de até 100 Pa, além de ser rígida de forma a evitar pulsações na vazão de ar, não devendo nenhuma das faces apresentar deflexão maior que 2 mm em condições de teste.

Um transdutor de pressão diferencial é utilizado para determinar Δp , tomando as pressões interna e externa da caixa.

O fluxo de ar pelo caixilho é obtido pelo uso de um ventilador ligado a caixa de teste por um duto. O duto deve ser dotado de um registro, de forma a permitir diversas configurações de pressão interna/vazão na caixa.

A determinação da vazão de ar (q) é feita pelo uso de um medidor de vazão colocado na tubulação de saída. Existem diversos tipos de medidores que podem ser utilizados (placa de orifício, ultra-sônico, turbina), sendo o medidor de gás natural para instalações domésticas a melhor alternativa de custo-benefício.

A incerteza do experimento deve ser inferior a 5%, segundo a norma BS 13141-1 (BSI, 2004).

Não foi encontrada na bibliografia menção da forma de cálculo da área do caixilho a ser considerada, pois se trata de uma questão meramente formal. Qualquer valor de área pode ser utilizado para a determinação de C_z , desde que a maneira de calcular esta área seja informada junto com o valor de C_z .

Com relação ao ensaio propriamente dito, deve-se primeiramente registrar as condições ambientais: pressão atmosférica e temperatura.

O teste deve então ser feito para seis “ Δp ” diferentes, iniciando o teste o menor valor a ser testado: $\Delta p=1$ Pa (BSI, 2004).

Os resultados de “ q ” versus “ Δp ” devem ser anotados quando o sistema tiver atingido regime permanente.

Para o cálculo de C_z , a vazão “ q_{medida} ” (m^3/s) deve ser corrigida para condições padrão de temperatura “ T ” ($^{\circ}C$) e pressão atmosférica “ p ” (Pa) (BSI, 2004), pela fórmula:

$$q_{corrigida} = q_{medida} \times \frac{293}{273 + T} \times \frac{p}{101325} \quad [\text{Eq. 03}]$$

Desta forma, utiliza-se a vazão corrigida e a massa específica correspondente a condições padrão (20 $^{\circ}C$ e 101325 Pa) $\rho=1,204$ kg/ m^3 .

O resultado do ensaio consiste em uma curva característica da abertura, relacionando C_z a Re da abertura.

Os ensaios devem ser então repetidos para a direção contrária do fluxo, produzindo assim uma segunda curva para a abertura.

3.2 Experimentos em escala ou com efeito dos ventos

O método para determinar C_z descrito na Seção 3.1 deve ser utilizado preferencialmente com aberturas em escala real, mas pode ser aplicado a aberturas em escala reduzida. Neste caso, um estudo de similaridade deve ser feito, conforme descrito em Cóstola; Alucci e Etheridge (2007).

O procedimento descrito na Seção 3.1 se destina a determinar o valor de C_z para condições de ar parado, sem a ação do vento tangenciando a abertura. Conforme descrito na seção 2.2, o fluxo do vento que tangencia externamente a abertura afeta o valor de C_z , ou seja, o ensaio sem o efeito dos ventos não indica o valor real de C_z que a abertura irá assumir quando é submetida à ação dos mesmos. A adoção generalizada do C_z obtido nestas condições é apenas de uma aproximação possível do fenômeno real. Uma forma de contornar esta limitação é a realização de ensaios para determinar diferentes valores de C_z para cada orientação dos ventos. O aparato experimental é o mesmo, utilizando-se modelo em escala reduzida em um túnel de vento, a ser submetido a um escoamento externo. Estes valores estão intimamente ligados à geometria do edifício, sendo de difícil extrapolação pra outros casos.

Toda a discussão aqui apresentada parte da premissa de um fluxo unidirecional na abertura. Casos de escoamento bi-direcional, como em recintos com apenas uma abertura, estão além do escopo deste artigo, pois a determinação da vazão se torna muito mais complexa.

3.3 Exemplo de aplicação

De forma a demonstrar o método descrito nas Seções 3.1 e 3.2, um exemplo de aplicação é apresentado a seguir. Neste exemplo de aplicação o coeficiente de descarga de uma abertura circular e de uma chaminé são estudados, considerando alguns dos aspectos que influenciam C_z abordados neste artigo.

Os experimentos foram realizados com aberturas em escala reduzida, primeiramente em condições de ar parado e então sob efeito da ação do vento. Os resultados foram separados em função do sentido do fluxo na abertura.

As condições de similaridade para este caso são descritas em profundidade em Costola; Alucci e Etheridge (2007), que utiliza os mesmo experimentos apresentados no presente artigo.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A Figura 4 apresenta os resultados de C_z em função do Re da abertura circular, obtidos quando o sentido do fluxo é do exterior para o interior do modelo. Os quadrados cinza apresentam os valores de C_z quando a abertura está a barlavento, com o vento incidindo perpendicularmente à ela ($\text{wind dir}=0^\circ$). Os pontos vazados apresentam C_z quando a abertura está a sotavento ($\text{wind dir}=180^\circ$). Os círculos pretos mostram os valores de C_z para condição de ar parado (still air). Nota-se que a abertura tem desempenho melhor quando posicionada a sotavento, com valores próximos aos encontrados para a condição de ar parado.

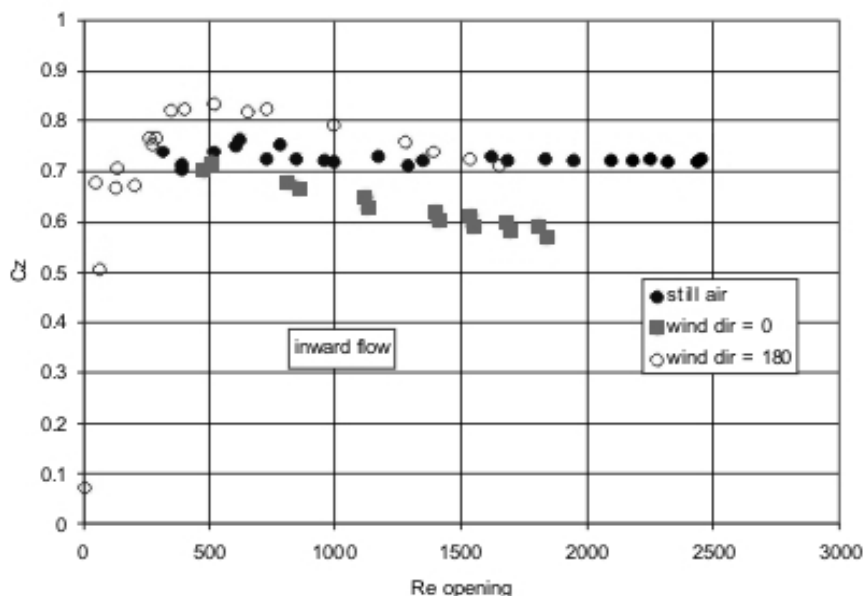


Figura 4 - C_z ext-int de um orifício circular com cantos vivos.

A Figura 5 apresenta os resultados de C_z quando o fluxo se dá no sentido interior-exterior, não tendo sido testada a configuração com a abertura a barlavento.

A despeito dos cantos vivos da abertura, esta exibe uma forte dependência para valores baixos de Re , os quais não ocorrem em aberturas de edifícios reais que têm dimensão característica muito maior que a abertura usada no modelo.

Os valores de C_z encontrados são bastante semelhantes aos do fluxo externo-interno, mostrando que o C_z da abertura a sotavento pode ser tomado como igual a 0,72 em boa parte dos casos.

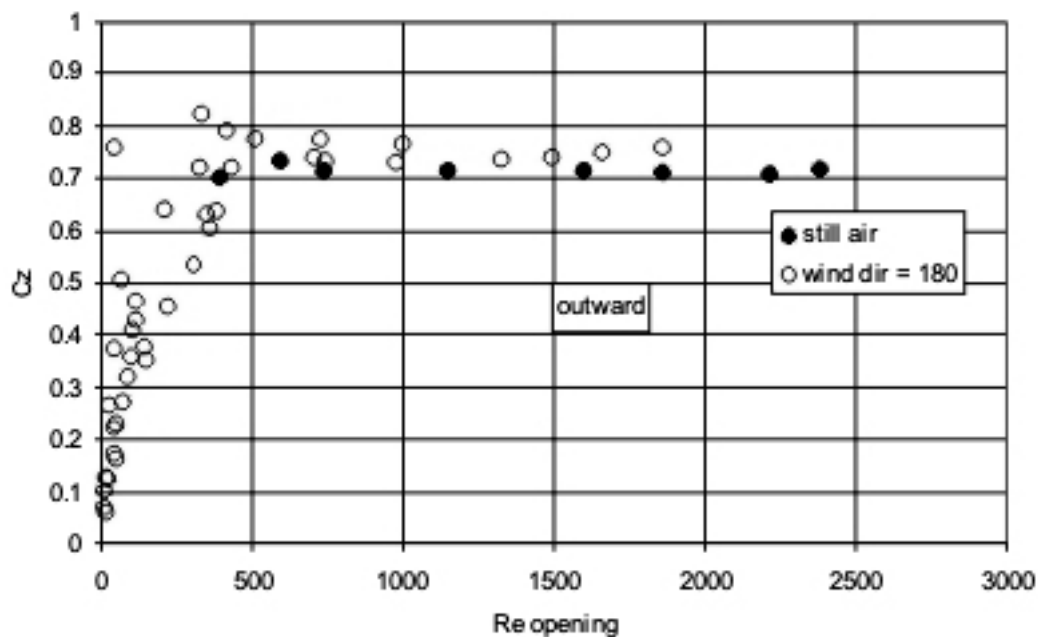


Figura 5 - C_z int-ext de um orifício circular com cantos vivos.

Sendo o valor de C_z afetado pela conformação do fluxo junto da abertura, pode-se esperar que a presença de obstáculos próximos ao edifício modifique o valor de C_z , pela modificação do fluxo ao redor do edifício.

A Figura 6 mostra os valores obtidos para uma chaminé curta, sob diversas condições de escoamento. Nota-se a forte relação entre C_z e Re da abertura, tornando difícil a obtenção de um valor fixo de C_z a adotar em todas as situações.

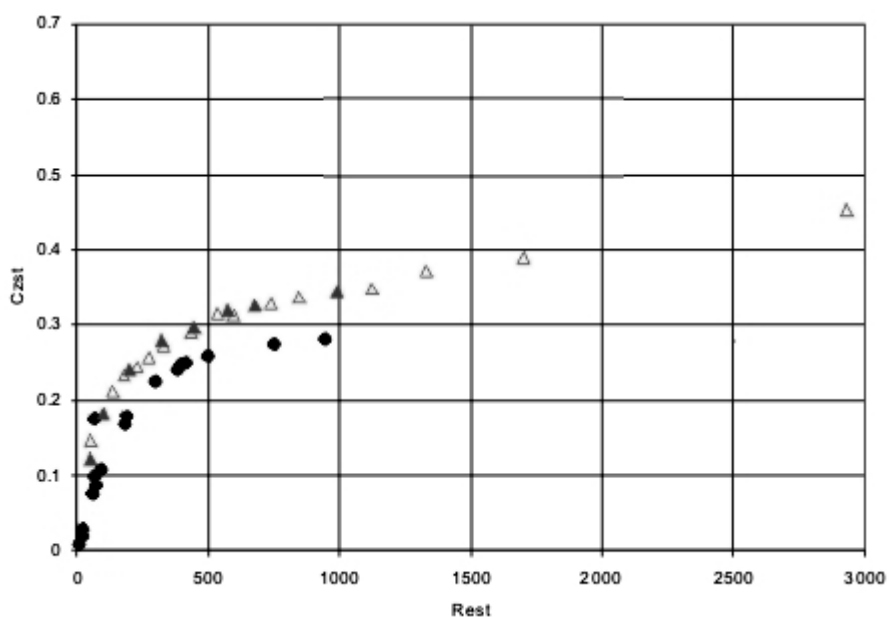


Figura 6 - C_z de uma chaminé curta.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho expôs a problemática da caracterização das aberturas nos modelos teóricos para cálculo da vazão obtida com o uso de ventilação natural. Apesar da existência de diversas fontes de dados e da relativa simplicidade nos experimentos para a determinação de C_z , as ferramentas de cálculo e os modelos para a previsão de C_z não permitem que a abertura seja corretamente caracterizada, com consequências indesejadas para a quantificação da ventilação natural.

Contudo, pela adoção de ensaios é possível reduzir a incerteza do cálculo ou ao menos estimar esta incerteza com maior segurança.

A principal conclusão deste trabalho é a viabilidade técnica e econômica da utilização do coeficiente de descarga para a caracterização de aberturas para a ventilação natural. O experimento com ar parado é simples, e os equipamentos envolvidos são de baixo custo e simples operação.

O estudo aponta para a necessidade de flexibilização na definição dos valores de C_z nas ferramentas computacionais de avaliação do desempenho térmico, de forma a considerar valores variáveis com o tempo. Isto porque fica claro diante do resultado dos experimentos que o valor de C_z varia com a orientação do vento, assim como com o sentido do fluxo na abertura. Uma vez que estes valores variam ao longo do tempo, também o valor de C_z deve variar no cálculo.

Por fim, faz-se claro que experimentos em edifícios reais para a determinação de C_z em grandes aberturas são fundamentais para o desenvolvimento e validação de modelos para a predição deste em função da geometria do edifício, da abertura e da configuração do escoamento.

6. REFERÊNCIAS

- BSI. BS EN 13141-1 **Ventilation for buildings - Performance testing of componentes/products for residential ventilation - Part 1: Externally and internally mounted air transfer devices**. s.l.: BSI, 2004.
- CHIU, Y. **Development of Unsteady Design Procedures for Natural Ventilation Stacks**. Tese de Doutorado. Nottingham: School of the Built Environment, The University of Nottingham, 2004.
- COSTOLA, D.; ALUCCI, M.P.; ETHERIDGE, D. **Similaridade E Escala Em Ensaios de Ventilação Em Túnel De Vento**. Anais do IX Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto, 2007.
- COSTOLA, D. **Ventilação por Ação do Vento no Edifício: Procedimentos para Quantificação**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: FAU-USP, 2006.
- ETHERIDGE, D.W.; SANDBERG, M. **Building Ventilation: theory & measurement**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.
- IDEL'CIK, I. **Memento des pertes de charge**. s.l.: Editeur Paris, 1960.
- KURABUCHI, Takashi; Ohba, M.; Endo, T.; Akamine, Y.; Nakayama, F. Local Dynamic Similarity Model of Cross-Ventilation Part 1 - Theoretical Framework. **The International Journal of Ventilation**, v. 2, n. 4, 2004.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido durante a de pesquisa de mestrado de Daniel Cóstola, financiada pelo CNPQ. A visita à School of Build Environment (SBE) – The University of Nottingham, Reino Unido, foi possível graças ao financiamento da CAPES, e ao apoio da SBE.