

SIMILARIDADE E ESCALA EM ENSAIOS DE VENTILAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO

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

(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 – Rua do Lago, 876 05508-900, São Paulo, SP Fone: 3818.4539

(3) School of Build Environment (SBE) – The University of Nottingham,
(David.Etheridge@nottingham.ac.uk)

RESUMO

O presente artigo apresenta uma revisão da teoria utilizada na execução de ensaios com modelos em escala em túnel de vento, no que diz respeito à extrapolação, para o edifício em tamanho natural, dos resultados obtidos nos experimentos. Três casos são apresentados separadamente: escoamentos externos, escoamentos no envelope do modelo sem fontes de calor internas, e por fim modelos com fontes internas de calor submetidos a ação do vento. As técnicas de medição disponíveis são descritas brevemente. Os resultados obtidos em um exemplo de aplicação são apresentados, para um modelo com escoamentos externo e no envelope do modelo, sem fontes de calor interna. O trabalho conclui que os estudos com modelos de cantos vivos são viáveis, enquanto formas orgânicas apresentam maiores dificuldades para a obtenção da similaridade. Nos casos de modelos com cantos vivos, a independência dos resultados em relação ao valor do número de Re deve ser obtida.

ABSTRACT

This work presents the basic theory about similarity in wind tunnels experiments for natural ventilation study. The paper is divided in three classes of experiments: external flows, in the building envelope without internal heat sources, and in the building envelope with internal heat sources. Measurements techniques are briefly presented. The theory is applied in a study case, for the external flow and envelope flow without internal heat sources. The main conclusion is that sharp edged models are easily studied when compared to smooth shape models. For sharp edged models, the Reynolds independency must be obtained for reliable results.

1. INTRODUÇÃO

“Tem sido sugerido que o CFD irá gradualmente substituir os modelos físicos como ferramenta de projeto, mas o CFD tem seus próprios problemas e assim, haverá sempre a demanda por experimentos com modelos físicos” (ETHERIDGE & SANDBERG, 1996) (tradução do autor, assim como as demais neste artigo). A afirmação anterior é a questão central de uma discussão comum em escolas de arquitetura e reflete o recente desenvolvimento e popularização dos programas de CFD. Hoje é possível produzir em poucas horas resultados bastante sofisticados e visualmente impactantes utilizando computadores pessoais e softwares de CFD com interfaces simples.

Nos últimos cinquenta anos, a tecnologia utilizada na construção e operação de túneis de vento permaneceu praticamente a mesma. Contudo, os custos e a complexidade na utilização dos túneis impediram a sua popularização. Diante deste cenário, este trabalho se propõe a sumarizar o procedimento básico para utilização do túnel de vento para estudos de ventilação interna, de forma a diminuir a distância entre o arquiteto e a teoria necessária para extrapolação dos resultados obtidos em túnel de vento. Isto se faz necessário, pois as simulações de CFD e os experimentos em túnel de vento são ferramentas complementares no estudo de ventilação.

É importante salientar que outros aspectos relevantes para a realização de ensaios em túnel de vento não são abordados neste trabalho, tais como a obstrução causada pelo modelo, a extensão do entorno a modelar, o tratamento dado aos elementos do relevo, os perfis de camada limite do vento médio e das propriedades estatísticas da turbulência.

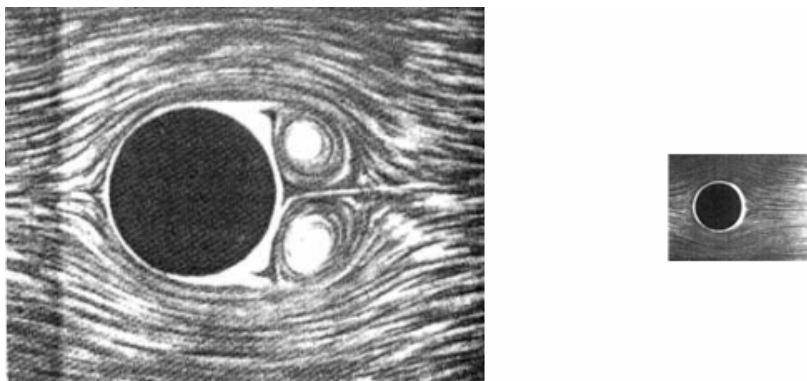
2. TEORIA DA SIMILARIDADE

A função da análise dimensional é verificar a existência de similaridade, ou seja determinar se é possível estender os resultados obtidos em um experimento ou modelo teórico, para um outro caso no qual as variáveis sejam as mesmas, mas os valores por elas assumidos sejam diferentes. Por exemplo, estender os resultados obtidos em um experimento com um modelo em escala para o protótipo (o edifício real), ou estender os resultados de um modelo teórico para uma gama de outros casos que compartilham as mesmas variáveis e propriedades.

“A idéia básica por trás das técnicas (de similaridade) são, todavia, filosóficas em sua natureza” (ETHERIDGE & SANDBERG,1996). A questão da análise dimensional não é uma mera relação entre valores, mas determinar quando duas situações são regidas pelas mesmas regras, para então podermos extrapolar os resultados de uma para a outra. Infelizmente, não existem muitos estudos com modelos em escala real (AYNSLEY, 1977). A cautela no uso de dados obtidos em condições diferentes das reais se deve ao fato de que o comportamento de alguns escoamentos é bastante diferente do que suporia o “senso comum”.

Na figura 1, vemos à esquerda um cilindro de diâmetro D exposto a um vento de 5m/s, e à direita seu modelo em escala 1:10 ($K=10$) exposto a um vento de 0,5m/s. Pode-se ver que o escoamento ao redor do cilindro não é o mesmo. Apesar das dimensões e da velocidade seguirem a mesma “proporção”, os dois casos não tem similaridade, e as conclusões de um experimento não podem ser estendidas para o outro.

Dois fenômenos são similares se podemos reconhecer um deles com base no outro, e se as relações internas entre as partes, forças, propriedades dos materiais se mantiver em ambos os casos. Além da similaridade geométrica, existem outros tipos de similaridade que um experimento de ventilação em túnel de vento deve considerar: a similaridade dinâmica e a similaridade térmica, que não são lineares, o que explica os diferentes escoamentos na figura anterior.



Fonte: BATCHELOR (2000)

Figura 1 . Escoamento ao redor de cilindros. Modificação do original

A análise dimensional é o nome dado a um conjunto de teorias e procedimentos que se propõe a demonstrar a forma como diferentes variáveis atuam em conjunto no mesmo fenômeno, sendo assim fundamental para a análise de experimentos em escala.

O teorema mais usado na análise dimensional é o de Buckingham Pi (MUNSON et al, 1997). Este teorema nos diz que, se um conjunto de variáveis é dimensionalmente homogêneo, a relação funcional entre estas variáveis pode ser reduzida a números adimensionais. Um número adimensional é um arranjo de variáveis onde todas as dimensões se cancelam, logo o número não tem dimensão nem unidade.

Para que os resultados do modelo possam ser estendidos ao protótipo é necessário que as relações entre as partes se mantenham as mesmas. Uma vez que os números adimensionais que retratam as relações entre as partes são definidos para um caso em análise, deve-se garantir que o valor assumido por estes números seja igual, tanto no modelo quanto no protótipo. A vantagem no uso de números adimensionais é a sua capacidade de exprimir relações complexas entre diferentes variáveis em um ou alguns termos.

Definir corretamente os termos adimensionais é fundamental para o sucesso da análise dimensional. O teorema de Buckingham Pi define os passos que devem ser seguidos para definir os termos adimensionais de um problema. MUNSON et al (1997) e ETHERIDGE (s.d.) trazem diversos exemplos de utilização do teorema de Buckingham Pi.

2.1 Escoamentos externos

Tradicionalmente, estudos em túnel de vento são realizados para avaliar o escoamento externo ao redor de modelos selados – sem janelas ou outras aberturas. Nestes testes é estudada a ventilação urbana e a distribuição de pressão nas fachadas dos edifícios. Utilizando estas distribuições de pressão, alguns modelos teóricos predizem as taxas de renovação de ar no interior do edifício, para o vento e aberturas de projeto.

O primeiro passo para utilizar o teorema de Buckingham Pi na análise de escoamentos externos é listar as variáveis que interferem no escoamento ao redor de um edifício: forma do corpo, tamanho (digamos uma altura – L, em metros), velocidade do fluido antes de chegar ao edifício, medida na altura do mesmo (U, em m/s), massa específica do fluido (ρ , em kg/m³), e a viscosidade dinâmica do fluido (μ , em N.s/m). A forma do protótipo e do modelo devem obviamente ser as mesmas. Assim, pode-se dizer que a similaridade é função de L, U, ρ , μ .

Das variáveis listadas acima, a viscosidade é, sem dúvida, a mais exótica aos arquitetos. A viscosidade é a propriedade dos fluidos que nos permite a aderência entre o fluido e os sólidos, assim como entre as moléculas do fluido, sendo determinante na forma como o ar interage com o edifício e as aberturas.

Pela aplicação do teorema de Buckingham Pi, é possível determinar que um único adimensional é capaz de retratar a relação entre as variáveis L,U, ρ , μ . Uma forma possível deste adimensional é o chamado número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{LU\rho}{\mu} \quad [\text{Eq. 01}]$$

O número de Re expressa a relação entre as forças de inércia no fluido (L.u. ρ) e as forças viscosas (μ). Quando se faz um experimento em escala, a relação entre estas forças deve ser mantida para que tenhamos similaridade dinâmica, assim $Re_p=Re_m$, onde p representa o protótipo e m, o modelo.

$$Re_p = Re_m \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$\frac{L_p U_p \rho_p}{\mu_p} = \frac{L_m U_m \rho_m}{\mu_m} \quad [\text{Eq. 03}]$$

No caso do uso de um túnel de vento normal (não pressurizado e sem controle de temperatura) pode-se considerar a viscosidade dinâmica e a massa específica iguais no protótipo e no modelo. Ambas as variáveis dependem da temperatura e pressão, portanto as condições de teste devem ser anotadas para posterior correção, caso necessário. Assim, a relação pode ser reduzida a:

$$L_p U_p = L_m U_m \quad [\text{Eq. 04}]$$

Se um fator de escala geométrica K (1:K) for adotado, a relação entre L_p e L_m pode ser expressa por:

$$L_p = K L_m \quad [\text{Eq. 05}]$$

Substituindo na equação anterior:

$$K L_m U_p = L_m U_m \quad [\text{Eq. 06}]$$

$$K U_p = U_m \quad [\text{Eq. 07}]$$

Como se pode ver, o fator de escala geométrica multiplica a velocidade do protótipo (ao vento que incide no edifício real) para que se tenha a velocidade necessária no experimento com o modelo em escala reduzida. Assim, quanto menor o modelo, maior a velocidade necessária no túnel de vento para que tenhamos similaridade dinâmica.

Para exemplificar o uso desta relação será analisado a seguir o caso de um protótipo de altura 35m, exposto a um vento de 5m/s, a ser simulado nos túneis de vento do SBE – University of Nottingham e do Túnel de Vento de Camada Limite do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo).

A altura máxima do modelo no túnel da SBE deve ser 0,35 m, devido às dimensões da seção transversal da seção de ensaio e um obstrução máxima de 5%. Então a escala máxima para o modelo é 1:100 (K=100), conforme descrito abaixo:

$$\begin{aligned} L_p &= K L_m \\ 35 &= K 0,35 \\ K &= 100 \end{aligned}$$

Para que se obtenha similaridade dinâmica entre o modelo e o protótipo, se K=100, então a velocidade no modelo deve ser:

$$\begin{aligned} K U_p &= U_m \\ 100 \cdot 5 &= 500 \text{ m/s} \end{aligned}$$

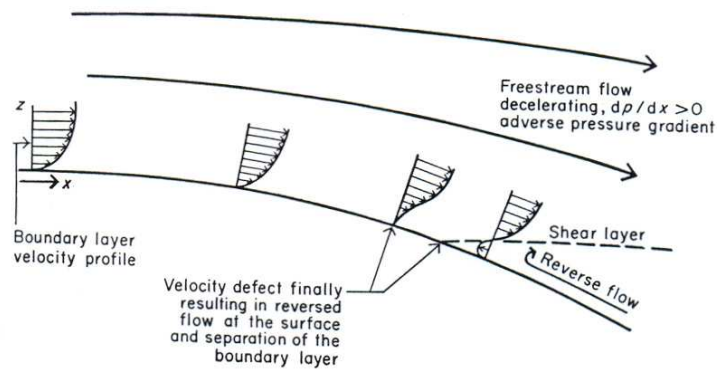
O mesmo protótipo no túnel do IPT poderia ser modelado com altura de 1,25m, K=28 e $U_m=140\text{m/s}$.

Como se pode ver, as velocidades são bastante elevadas. A razão para este aumento é a necessidade de manter o equilíbrio de forças, tanto no protótipo quanto no modelo. As forças viscosas, representadas por μ em Re, são as mesmas em ambos os casos pois não dispomos de “ar” com propriedades em escala reduzida. Diante disto, as forças de inércia devem ser mantidas com a mesma magnitude em ambos os casos. A força de inércia é a tendência do fluxo de manter o mesmo movimento a despeito da presença do corpo. No caso do protótipo temos uma dada massa de ar que incide sobre o corpo a uma dada velocidade, exercendo assim uma força. Quando se reduz as dimensões do corpo, no caso do modelo em escala, a quantidade de ar incidindo no corpo passa a ser muito menor, e assim a força de

inércia passa a ser muito menor também. Como a força viscosa se manteve constante, ela passa a ser muito mais forte que a força de inércia. Isto explica porque na Figura 1 o fluxo consegue contornar o cilindro menor – a viscosidade obriga o fluxo a contornar o cilindro pequeno já que a inércia é pequena. No caso do cilindro grande, a inércia é mais forte que a viscosidade, criando assim a zona de recirculação na parte posterior do cilindro. Assim, para manter o equilíbrio entre forças de inércia e forças viscosas, é necessário aumentar a velocidade do fluido que incide no modelo em escala. Infelizmente, as velocidades necessárias não podem ser atingidas no caso dos túneis do IPT e da SBE.

A despeito da importância das discussões sobre similaridade e Re , em alguns casos esta discussão não se aplica, e a similaridade acontece naturalmente. Isto ocorre porque determinadas geometrias reduzem o papel das forças viscosas tornando o escoamento independente do número de Reynolds, conforme descrito a seguir.

A Figura 1 mostra um escoamento ao redor de um cilindro, com diferentes números de Re . No primeiro caso, o fluido está totalmente aderido ao cilindro, empurrando a parte da frente, e puxando a parte de trás. No segundo caso, o gradiente de pressão na região do escoamento próxima à superfície do cilindro é muito grande, as forças de inércia dominam o escoamento e a partícula fluida é descolada da parede do cilindro antes de terminar de contorná-lo, conforme apresentado em detalhe na Figura 2. Se houvesse uma abertura na parte de trás deste edifício cilíndrico, a mesma terá desempenhos totalmente diferentes para cada valor de Re .



Fonte: AYNLEY (1977)

Figura 2 – Separação da camada limite

O ponto de separação (ou descolamento) do escoamento é uma questão central na análise de fluxos em corpos imersos, como é o caso dos edifícios, e este é em geral função de Re . Porém, em edifícios ou aberturas de cantos vivos a separação é definida apenas pela geometria, e tende a ocorrer sempre nos mesmos pontos, independente de Re . “A aresta saliente neste caso, fixa a posição de separação da camada limite para todos os números de Reynolds, e a variação do número de Reynolds afeta pouco...” BATCHELOR (2000). “Isto quer dizer que elementos fluidos que estiverem inicialmente no mesmo ponto nos dois sistemas (protótipo e em escala) irão seguir as mesmas trajetórias” ETHERIDGE D.W., SANDBERG M. (1996).

Nestes casos é necessário atingir um Re mínimo, chamado crítico, e a partir deste valor a similaridade está garantida. A existência de Re crítico se deve, mesmo nas formas com cantos vivos, de uma certa dependência caso Re seja muito baixo.

Assim, em modelos com arestas e cantos vivos deve-se proceder a uma série de ensaios com diferentes Re (modificando a velocidade do escoamento no túnel por exemplo) de forma a checar se o resultado (coeficiente de pressão, ensaio de erosão ou outro valor que se deseje estudar) permanece constante. Desta forma a similaridade do escoamento está garantida. É importante determinar as propriedades do ar durante o ensaio por meio da temperatura do ar, e da pressão atmosférica, (MUNSON et al, 1997) de forma a reduzir a incerteza no cálculo de Re (INMETRO, 1998).

Quando o edifício tem forma orgânica (sem cantos vivos), a similaridade dinâmica deve ser atingida. Caso não seja possível atingir as grandes velocidades necessárias, existem técnicas para forçar a separação em dado ponto posicionando pequenas fitas ou pequenos obstáculos ao fluxo na superfície do modelo. Estas técnicas estão associadas a grandes incertezas, e devem necessariamente ser validadas com experimentos em escala real (RAE et al, 1984).

2.2 Escoamentos no envelope do modelo submetidos a ação do vento e sem fontes de calor internas

Em túnel de vento, os experimentos de ventilação no envelope do edifício tratam da obtenção experimental das taxas de renovação de ar no interior do mesmo. O modelo em escala deve ter as mesmas aberturas do protótipo, mas o interior do edifício é modelado de maneira simplificada, sem móveis, biombos e outros elementos. Isto porque se entende que estes elementos afetem apenas a distribuição de ar no inteiro do recinto, sem modificar a taxa de renovação de ar no recinto.

Neste caso a similaridade do escoamento externo deve ser obtida, conforme descrito no item 2.1. Além da similaridade do escoamento externo, a similaridade das aberturas (janelas, portas e afins) deve ser obtida. (CAREY, 2005)

Definir um número de Reynolds da abertura:

$$Re_A = \frac{D_h \cdot U_A \cdot \rho}{\mu} \quad [\text{Eq. 08}]$$

Onde a dimensão característica D_h (m) é definida por $D_h = 4 \cdot A / P_0$, sendo A (m^2) a área da abertura e P_0 (m) o perímetro da abertura; a velocidade de referência U_A (m/s) é dada por $U_A = q / A$, onde q é a vazão pela abertura em m^3/s .

Assim como nos escoamentos externos, as aberturas de cantos vivos apresentam independência de Re_A . O comportamento da abertura pode ser avaliado pelo seu coeficiente de descarga C_z :

$$C_z = \frac{q}{A} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}} \quad [\text{Eq. 09}]$$

Onde Δp é a diferença de pressão (em Pa) entre a face externa e interna da abertura.

Pela comparação de C_z para diferentes Re_A é possível determinar se a abertura é independente de Re_A , e por consequência a similaridade foi obtida.

Aberturas com muitos detalhes, como venezianas e telas, assim como aberturas longas, como chaminés, em geral não apresentam independência de Re_A , sendo de difícil utilização em ensaios em túnel de vento.

2.3 Escoamentos no envelope do modelo submetidos a ação do vento e com fontes de calor internas

Assim como descrito no item 2.2, os ensaios para determinação das taxa de ventilação no envelope do edifício desconsideram as particularidades internas do edifício. Assim sendo, também são negligenciadas as temperaturas das superfícies internas, sendo estas substituídas por uma única fonte de calor interna quando se deseja estudar ventilação por efeito chaminé. Nestes casos, é comum utilizar um ventilador no interior do modelo para garantir condições uniformes em todo seu interior, uma vez que a estratificação térmica é desconsiderada.

Além da similaridade no escoamento externo e nas aberturas, é necessário garantir que as forças do vento e do efeito chaminé reproduzam as relações encontradas no edifício real (CAREY, 2005). Da mesma forma que Re é o parâmetro de similaridade para escoamentos por ação dos ventos, o número de Arquimedes (Ar) é o parâmetro para escoamentos por ação combinada dos ventos e do efeito chaminé:

$$Ar = \frac{g \cdot L \cdot \Delta\rho}{\rho U^2} \quad [\text{Eq.10}]$$

Onde g é a aceleração da gravidade, L é a dimensão característica (a altura do edifício por exemplo), $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre o ar no interior e no exterior do modelo devido a diferença de temperatura. Em Ar , o termo $g \cdot L \cdot \Delta\rho$ apresenta a força do efeito chaminé, e ρU^2 a força do vento.

Se comparamos os números de Arquimedes do protótipo (edifício real) e do modelo temos:

$$\frac{g_p \cdot L_p \cdot \Delta\rho_p}{\rho_p U_p^2} = \frac{g_m \cdot L_m \cdot \Delta\rho_m}{\rho_m U_m^2} \quad [\text{Eq.11}]$$

Se K é a escala do modelo, considerando a aceleração da gravidade constante, e o fluido como um gás perfeito, tem-se:

$$L_p = K \cdot L_m, \quad g_m = g_p \quad \text{e} \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T_0}{T}$$

Então:

$$\frac{K L_m \cdot \Delta T_p}{T_p U_p^2} = \frac{L_m \cdot \Delta T_m}{T_m U_m^2} \quad \Rightarrow \quad \Delta T_p = \frac{\Delta T_m T_p}{K T_m} \left(\frac{U_p}{U_m} \right)^2$$

Se a velocidade do vento e a temperatura do ar externo são as mesmas no protótipo e no modelo, $U_p = U_m$, e $T_p = T_m$:

$$\Delta T_p = \frac{\Delta T_m}{K} \quad [\text{Eq.12}]$$

Esta relação evidencia um cenário complexo de ser atingido, pois ΔT_m deveria ser muito elevada e, isto se considerando que a velocidade do vento é baixa, o que só é válido no caso de modelos de cantos vivos. Caso a velocidade do vento no modelo seja alta, o cenário apresenta-se ainda mais complexo.

3. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE AR NO INTERIOR DO MODELO

A vazão de ar no interior do modelo é o objetivo final de qualquer estudo de ventilação. Outras variáveis importantes como a pressão e temperatura não são abordadas neste item.

Basicamente existem duas técnicas para determinar esta vazão: a utilização de gases traçadores, ou posicionamento de anemômetros nas aberturas.

O primeiro método é baseado na injeção de um gás no modelo e da medição de sua concentração ao longo do tempo (AWBI, 1998). As vantagens deste método são: 1. a simplicidade e rapidez, pois apenas um sensor é colocado no interior do modelo, independente do número, tipo e posição das aberturas. Caso seja importante medir o fluxo entre duas partes do modelo, gases distintos devem ser injetados em cada zona, e sua concentração deve ser medida em ambas as zonas simultaneamente, o que torna complexo o experimento. 2. O sensor não é posicionado na abertura, portanto ele não afeta o fluxo, 3. As medidas têm incerteza baixa, 4. A calibragem do sensor é simples. As principais desvantagens são: 1. Os sensores são frágeis e possuem curta vida útil, 2. Não é possível determinar o papel de cada abertura no fluxo total, 3. É necessário que o ar no interior do modelo seja perfeitamente misturado durante o ensaio, para que a concentração do gás seja a mesma em todo o modelo. Ao utilizar ventiladores para este fim no interior da maquete, pode-se alterar o fluxo que se deseja medir, 4. Em pequenos modelos a injeção do gás pode afetar o escoamento.

O segundo método para medir a vazão é a utilização de anemômetros na abertura para determinar a velocidade do ar, e com base nesta calcular a vazão. O sensor mais utilizado é o anemômetro de fio quente. As vantagens deste método são: 1. A vazão de cada janela é conhecida, 2. Não é necessário

utilizar ventiladores no interior do modelo. As principais desvantagens são: 1. Método trabalhoso, pois o sensor deve ser colocado sucessivamente em diversos pontos da abertura. 2. A presença do sensor afeta o escoamento, 3. Sensores tridimensionais, que seriam os aconselháveis, têm incerteza mais alta, 4. O sensor deve ser pequeno em relação ao tamanho da abertura. O uso de anemômetros a laser contorna alguns destes problemas, mas este equipamento ainda é caro e de operação mais delicada que as sondas de fio quente.

A técnica descrita em CHIU (2004) é uma alternativa viável em modelos dotados de duas aberturas, sendo uma delas uma chaminé. A parte interna da chaminé é substituída por um venturi, e o anemômetro de fio quente é posicionado no centro do venturi. Por meio de uma calibração específica para o modelo, a vazão pode ser determinada com base na leitura do anemômetro. No exemplo de aplicação está técnica foi utilizada.

Um aspecto importante de qualquer tipo de medição é a checagem de eventuais erros. Os experimentos devem ser planejados e é conveniente repetir alguns deles em dias diferentes, para checar a repetibilidade dos resultados encontrados. Por fim, a determinação da incerteza do resultado é uma etapa trabalhosa, mas de fundamental importância. Muitos resultados aparentemente conflitantes podem ser explicados quando se conhece a incerteza. INMETRO (1998) trata em detalhes do cálculo e expressão da incerteza.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

No exemplo de aplicação aqui apresentado foi utilizado o túnel de vento da SBE - School of the Built Environment - um túnel de circuito aberto, capaz de atingir velocidades entre 0,5 a 5 m/s (CAREY,2005). A seção de testes tem aproximadamente 1,0 x 0,7m, e suas paredes laterais estão afastadas da mesa giratória de forma a reduzir sua influência sobre modelos de maior dimensão, permitindo assim experimentos com obstrução acima de 5%.

Os pesquisadores e o equipamento para controle do túnel e medição das variáveis do experimento ficam dentro do túnel, entre a área da seção de testes e o fechamento lateral. Assim, o túnel tem duas portas de entrada, uma em cada lado da seção de ensaio. Esta configuração torna fácil o manuseio dos equipamentos e do modelo em escala, pois não é necessário “abrir” ou “entrar” na seção de testes para ajustar o modelo ou os equipamentos.

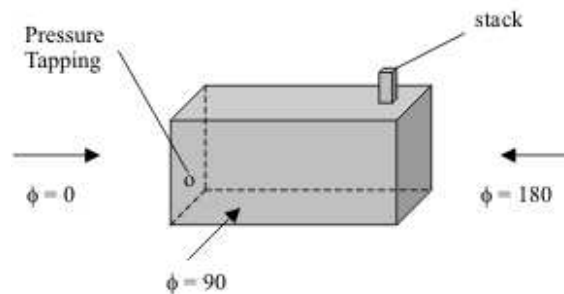
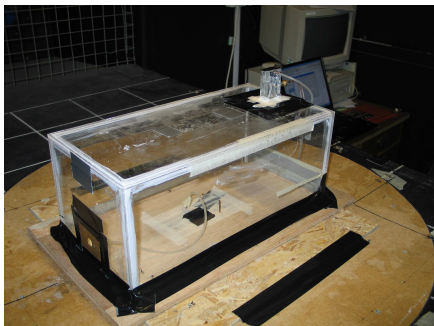


Figura 3 – Modelo em escala utilizado no exemplo de aplicação

A camada limite é produzida de forma aproximada pela colocação, com diferentes espaçamentos, de lâminas horizontais após o trecho de contração. Este túnel foi construído segundo um projeto padrão do BRE (Building Research Establishment, Reino Unido), e não se propõe a simular edifícios reais sob condições de rugosidade específicas, tendo caráter didático. A repetibilidade dos experimentos no túnel da SBE é baixa, pois o posicionamento do modelo e dos sensores é feito manualmente.

O modelo em escala utilizado possui duas aberturas, um orifício circular e uma chaminé curta, conforme figura 3. Uma descrição mais detalhada do modelo é apresentada em COSTOLA (2006).

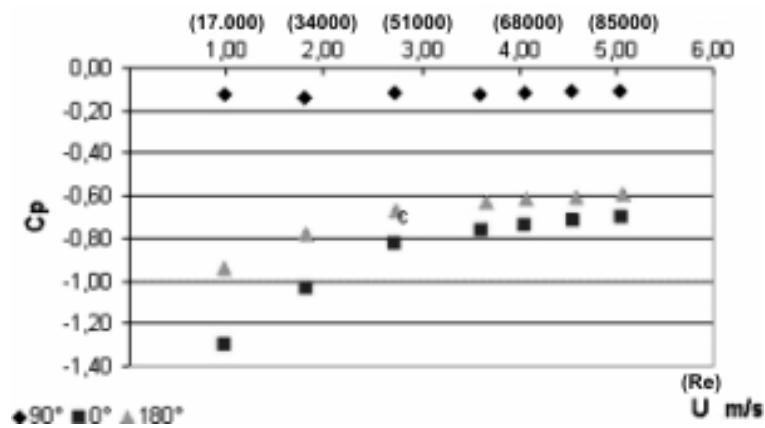


Figura 4 – Variação do Coeficiente de Pressão em um ponto do edifício versus Re

No caso do escoamento externo, o experimento se propôs a determinar o coeficiente de pressão junto às aberturas, uma vez que este parâmetro é essencial à utilização de diversos modelos teóricos para quantificação da ventilação. Foram utilizados dois transdutores de pressão diferencial (Furness FC044, +/-20 Pa) para monitorar a pressão junto da abertura circular e da chaminé. A figura 4 apresenta os valores de Cp para diferentes valores de Re. Nota-se que o modelo não é independente de Re, sendo os valores obtidos para U=5m/s (Re=85000) a melhor aproximação obtida neste experimento para os reais valores de Cp.

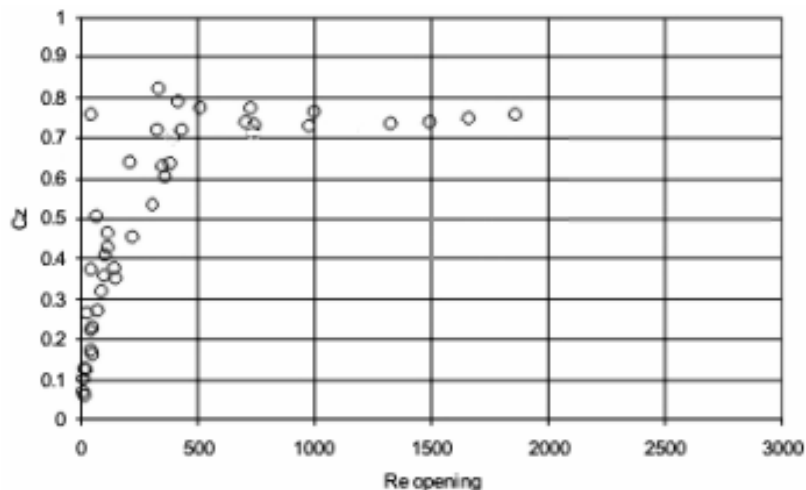


Figura 5 – Coeficiente de Descarga da abertura circular

No caso do escoamento no envelope do modelo, a vazão foi medida segundo a técnica descrita no item 3, e a diferença de pressão entre as duas faces da abertura foi medida utilizando os mesmos transdutores Furness FC044. De posse destes parâmetros, o valores de ReA e de Cz foram calculados para cada abertura, em cada um dos ensaios. Os resultados são mostrados na figura 5. Nota-se que o valor crítico de ReA, é 500, e que a maioria dos pontos (entre Re 0 e 500) sofre grande influência da viscosidade do fluido. De forma a preservar a similaridade, todos os resultados com ReA<500 devem ser desprezados.

5. CONCLUSÕES

A similaridade em experimentos em escala é fundamental para a obtenção de resultados aplicáveis ao edifício real. No caso dos ensaios em túnel de vento, a similaridade completa é bastante rara, e grande parte dos experimentos é possível graças à independência do escoamento em relação a Re.

Nestes casos, a conclusão deste trabalho é que o estudo da ventilação natural por meio de ensaios em túnel de vento é tecnicamente viável e não apresenta maiores complicações em modelos sem fontes de calor internas. Contudo, experimentos que não atentem para a determinação de Re crítico (do edifício e das aberturas) podem levar a erros significativos.

Modelos com forma orgânica devem ser estudados com cautela, já que muitas vezes não apresentam independência de Re . Uma solução mais dispendiosa é o uso de túneis de vento de grande seção e velocidades elevadas.

Modelos com fontes de calor internas representam um desafio na obtenção da similaridade, sendo este tipo de experimento muito mais complexo que os demais, e seu estudo é restrito a casos particulares.

Um aspecto não abordado neste trabalho, porém de grande importância no estudo de ventilação natural são os túneis d'água, nos quais algumas das relações de similaridade aqui descritas podem ser obtidas mais facilmente devido às diferenças entre a massa específica e viscosidade dinâmica da água e do ar. Este tema infelizmente está além do escopo e do espaço disponível.

6. 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) foi financiada pela CAPES, e teve o apoio da SBE. A participação neste evento foi possível graças ao auxílio do Roger Perry Memorial Fund. Os autores agradecem imensamente o suporte recebido destas instituições.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWBI, H.B. (1998) "Ventilation of buildings" London: E & FN Spon.
- AYNSLEY, R. M., MELBOURNE, W. e VICKERY, B. J. (1977) "Architectural aerodynamics" Applied Science Publishers, London.
- BATCHELOR (2000) "An introduction to fluid dynamics" Cambridge University Press, Cambridge.
- BATURIN, V. V. (1976) "Fundamentos de Ventilación Industrial" Editorial Labor, Barcelona.
- CAREY, P. (2005) "Direct wind tunnel modelling of natural ventilation for design purposes" PhD Theses, School of the Building Environment, University of Nottingham.
- CHIU, Yin-Hao (2004) "Development of Unsteady Design Procedures for Natural Ventilation Stacks" Nottingham, Tese (Doutorado) - School of the Built Environment, The University of Nottingham.
- COSTOLA, Daniel (2006) Ventilação por Ação do Vento no Edifício: Procedimentos para Quantificação" Dissertação de Mestrado. FAU-USP: São Paulo.
- ETHERIDGE D.W. (s.d.) "Lecture Notes" S/L.
- ETHERIDGE D.W., SANDBERG M. (1996) "Building Ventilation: theory & measurement" Chichester, John Wiles & Sons.
- INMETRO (1988) "Guia para Expressão da Incerteza de Medição". Inmetro, s/l.
- MUNSON, B., YOUNG, D., OKIISHI, T. (1997) – Fundamentos da Mecânica dos Fluidos - Versão SI. Editora Edgard Blucher, São Paulo.
- RAE JR, W. H. & POPE, A. (1984) "Low speed wind tunnel testing" John Wiley & Sons, USA, 2º ed.