

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS NO INTERIOR DE CAVIDADES ABERTAS

Iara de Souza Barbosa

UNESP – FEIS – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Brasil Centro, nº56, Ilha Solteira - SP
iarabar@dem.feis.unesp.br

Sérgio Said Mansur

mansur@dem.feis.unesp.br

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo experimental do escoamento no interior de cavidades abertas a baixos números de Reynolds. Os ensaios foram realizados em uma célula de Hele-Shaw especialmente construída para a visualização de escoamentos. Cavidades com razões de aspecto 1, 2 e 3 foram testadas. De maneira geral, observou-se que quanto maior a razão de aspecto da cavidade, mais instável torna-se o escoamento.

Palavras-chave: Escoamento em cavidade aberta, célula de Hele-Shaw, baixo Reynolds.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento no interior de cavidades abertas constitui um problema clássico da mecânica dos fluidos, de grande interesse científico e tecnológico. Nas ciências atmosféricas, este tipo de escoamento ocorre em muitas situações, como, por exemplo, em *canyons* urbanos, em vales e crateras, etc. Nas aplicações da engenharia, o escoamento em cavidades aparece em frestas sobre a carroceria de automóveis, asas e fuselagem de aeronaves, casco de embarcações, paredes de estruturas aéreas e oceânicas expostas à ação do vento e/ou ao movimento das águas. Como mostra a Figura 1, tais escoamentos são caracterizados pela presença de múltiplas estruturas turbilhonares, que interagem continuamente entre si e com as paredes da cavidade, podendo produzir erosão e desgaste prematuro de materiais, ao mesmo tempo em que aumentam o arrasto aerodinâmico e o nível de ruído de máquinas, equipamentos e veículos.

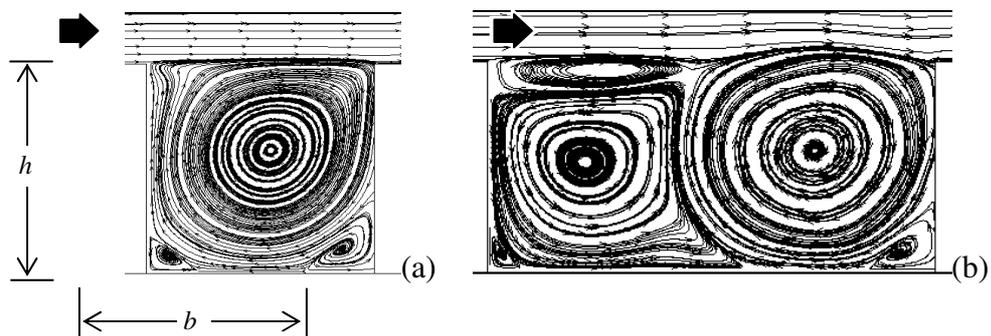


Figura 1: Topologia do escoamento no interior de cavidades abertas com diferentes razões de aspecto (b/h), para (a) $b/h = 1$, (b) $b/h = 2$ e $Re_h = 2648$. Resultados numéricos obtidos por Frigo *et al.* (2005).

O escoamento em cavidades abertas tem sido investigado por vários pesquisadores há mais de meio século. A maioria dos trabalhos sobre o assunto está direcionada ao estudo de escoamentos compressíveis, visando o controle de instabilidades ressonantes e a supressão de ruídos induzidos

por oscilações de pressão – Colonius *et al.* (1999a,b), Henderson *et al.* (2001), Ludovic *et al.* (2002), Gloerfelt *et al.* (2002), Gloerfelt *et al.* (2003a,b), Hamed *et al.* (2003) e Samimy *et al.* (2003), entre outros. Por outro lado, a literatura voltada para o estudo de escoamentos incompressíveis dentro desta geometria é nitidamente menos abundante, sobretudo para baixos números de Reynolds. Dentre os principais trabalhos que abordam este tópico estão: Shen e Floryan (1985) que estudaram numericamente o fluxo incompressível em cavidades bidimensionais com relação de aspecto de 0.5 a 4 e com número de Reynolds muito baixo, aproximadamente 0.01. Os resultados obtidos por esses autores foram confrontados com os dados experimentais disponíveis da literatura, e apresentou um bom resultado. Sinhá *et al.* (1982) investigaram experimentalmente o fluxo dentro das cavidades retangulares com a relação de aspecto que varia 0.035 a 2.5, em três valores diferentes do número de Reynolds - $Re = 662, 1342, e 2648$. O trabalho forneceu uma base de dados útil para validar códigos numéricos da simulação e, por essa razão, tem tornado uma das principais referências sobre o assunto. Usando o laser velocimétrico, Doppler, Esteve *et al.* (2000) e Reulet *et al.* (2002) estudaram o fluxo após uma cavidade com relação de aspecto de 10, para números de Reynolds 3.8×10^4 e 6.4×10^4 . O campo do fluxo foi descrito nos termos de vetores da velocidade e de intensidade de turbulência, fornecendo o comportamento fluido em grandes cavidades e número de Reynolds moderado. A fim de melhorar o processo de transferência de calor em coletores solares, Zdansky *et al.* (2000, 2001, 2003) simularam numericamente fluxos incompressíveis bidimensionais em cavidades abertas. Uma larga escala do número de Reynolds foi considerada pelos pesquisadores. Cálculos similares foram realizados por Kim *et al.* (2001) em uma investigação dirigiu-se à dispersão de poluente em gargantas urbanas. Em um trabalho relativamente recente, Arruda (2004) usou o problema da cavidade aberta como uma marca de nível testando uma nova formulação do limite proposto previamente por Lima e Silva *et al.* (2003). Para validar a aproximação numérica, os resultados calculados foram comparados com os dados experimentais de Sinha *et al.* (1982). Além desses, outros trabalhos vem sendo desenvolvidos com o mesmo objetivo desta observação aqui mesmo na faculdade de Ilha Solteira. No mais recente, Mega *et al.* (2007) comparou visualizações de fluxo em cavidades em números diferentes de Reynolds usando duas técnicas distintas - a injeção líquida da tinta e micro-partículas sólidas suspensas misturadas na água.

No âmbito do presente artigo, uma campanha experimental foi conduzida, utilizando-se uma Célula de Hele Shaw para a visualização do escoamento a baixos números de Reynolds no interior de cavidades abertas com razão de aspecto $h/b = 1, 2 e 3$.

2. METODOLOGIA

Todos os testes apresentados neste trabalho foram realizados utilizando a Célula de Hele-Shaw construída especialmente para a realização deste tipo de escoamento. Esta célula consiste em um reservatório, na área de testes e no dispositivo de escape, todos estes apresentados na Figura 2, que mostra realmente a célula de Hele-Shaw utilizada neste trabalho. As imagens do fluxo foram capturadas durante o processo da lavagem da tinta, sendo esta uma mistura de pigmentos pretos, e água, tendo a viscosidade e a densidade quase à água da torneira. Foi necessária uma iluminação direta com um sistema luz-folha foi necessário a fim produzir imagens afiadas com contraste elevado. Essa luz-folha é produzida por um feixe de luz provinda de um aparato localizado sob a célula. As imagens foram obtidas através de uma câmera fotográfica digital Sony com 7.0 Megapixels de resolução, esta estando apoiada em um aparato imóvel.



Figura 2: Célula de Hele Shaw utilizada nos testes

2.1 Seção de Testes

A célula utilizada nos experimentos é composta por três áreas primordiais: área de testes, mostrada na Figura 3, é onde foram fixadas as duas placas retangulares, indicadas em preto na figura, entre as quais foi criada a cavidade. As dimensões são: 435 mm x 200 mm x 5 mm. E o fluxo de água está na direção do reservatório para o dispositivo de escape, como indicado na figura. A pigmentação foi colocada com o fluxo de água parado para que quando a válvula do dispositivo de escape fosse aberta, o experimento pudesse ser visualizado com clareza.

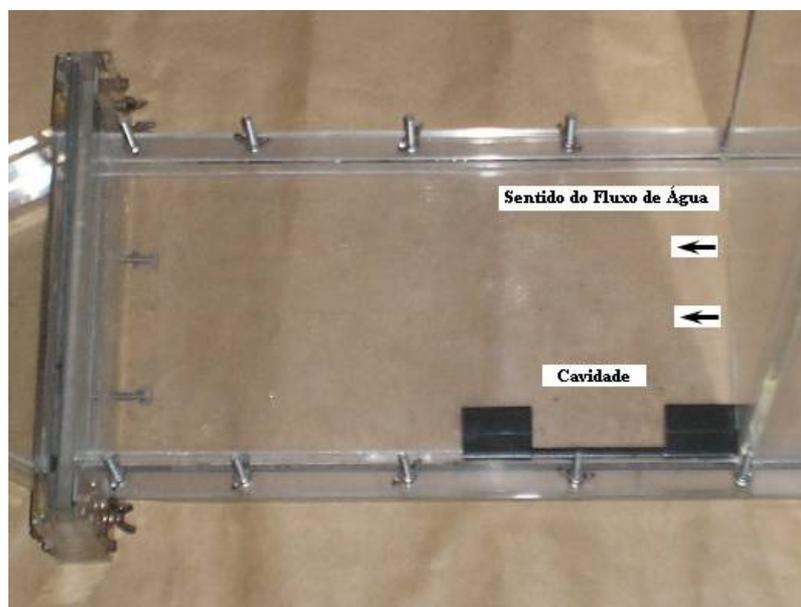


Figura 3: Área de testes

2.2 Reservatório

A célula também é composta de um reservatório, sendo este dispositivo de grande importância, pois é neste local onde ocorre o abastecimento de água, e através dele pode-se manter o escoamento num regime estacionário através de um ladrão que fixa o nível de água à 520 mm da base da célula. O reservatório é mostrado na Figura 4 e suas dimensões são: 220 mm x 220 mm x 620 mm.



Figura 4: Reservatório

2.3 Dispositivo de controle de vazão

Além dessas duas seções importantes, a célula também possui o dispositivo de escape, Figura 5. Esta sendo também muito importante para o bom desempenho dos experimentos, já que é através da válvula contida neste dispositivo que conseguimos controlar e medir a vazão do escoamento.

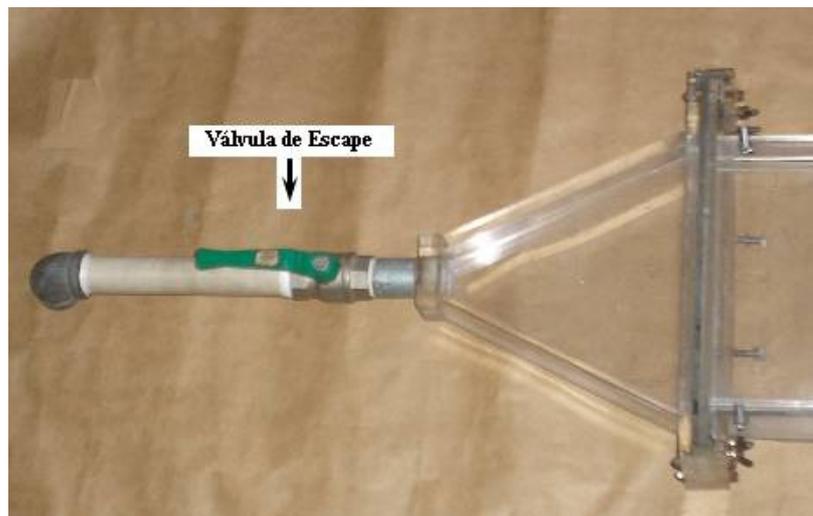


Figura 5: Dispositivo de escape

2.4 As placas de acrílico

Essas placas são retangulares com dimensões de 50 mm x 30 mm x 5 mm. Foi necessário primeiramente cortar a placa de acrílico de 5 mm de espessura de forma que ficasse retangular, somente depois as placas foram usinadas em torno CNC para que ficassem com as formas e as dimensões necessárias.

2.5 A análise experimental

Para a análise do experimento, colocamos as duas placas de acrílico entre as placas paralelas da Célula de Hele Shaw que continha uma distância de 5 mm entre si, logo as placas de acrílico apresentava 5 mm de espessura. A distância entre as placas de acrílico foi modificada três vezes

para que pudéssemos analisar a mudança que o escoamento apresentaria de acordo com esse distanciamento entre elas. Também foi modificada a vazão da célula para a mesma análise. Para obtermos a análise desejada, primeiramente encheu-se o reservatório até o nível do ladrão, e com um regime estacionário inserimos corante entre as placas, assim, quando fosse aberta a válvula de controle de vazão do dispositivo de escape o escoamento seria revelado.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizadas três baterias de testes. Para o cálculo das vazões foi utilizada a Equação 1, onde v é o volume para um intervalo de tempo Δt . Esta vazão é então em m^3/s .

$$Q = \frac{v}{\Delta t} \quad (1)$$

Os resultados dos cálculos das vazões são apresentados na Tabela 1, onde relaciona a distância entre as placas de acrílico e as vazões obtidas.

Tabela 1: Valores de vazões para cada teste

	Distancia 30 mm	Distancia 60 mm	Distancia 90 mm
Teste 1	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$1,98 \cdot 10^{-5}$
Teste 2	$3,35 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	$3,93 \cdot 10^{-5}$
Teste 3	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$

Com o cálculo da vazão, pudemos então calcular a velocidade V do escoamento através da Equação 2, onde A é a área onde o escoamento está agindo e Q como calculamos anteriormente é a vazão.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Só então é que se pode encontrar o Número de Reynolds, que segundo *Shiliching*, (2003), para a Célula de Hele-Shaw deve haver um fator de correção em relação ao número de Reynolds habitual. Esta modificação se dá pelo fato da pequena distância entre as placas da área de testes que interfere no número de Reynolds do escoamento, sendo então calculado pela Equação 3, onde ρ é a densidade do fluido utilizado no escoamento, neste caso a água; μ é a viscosidade cinemática da água; h é a largura da placa de acrílico, V a velocidade do escoamento e e a distância entre as placas.

$$Re = \frac{\rho V h}{\mu} \times \left(\frac{e}{h} \right)^2 \quad (3)$$

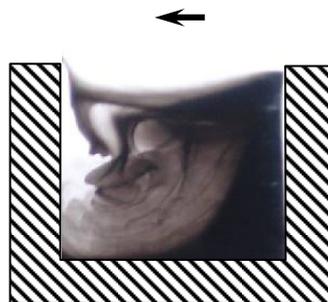
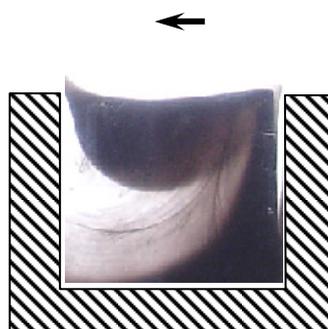
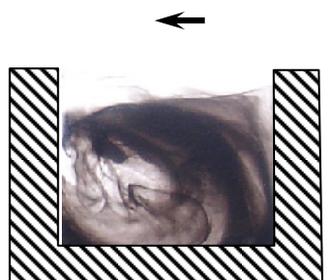
Logo, pela Equação 3 obtivemos o resultado mostrado na Tabela 2, que mostra o Número de Reynolds de cada escoamento. Através dos resultados apresentados abaixo, percebe-se que os valores obtidos realmente menores do que os alcançados em escoamentos onde a distancia entre as paredes da área de testes não são muito próximas uma da outra.

Tabela 2: Número de Reynolds dos experimentos

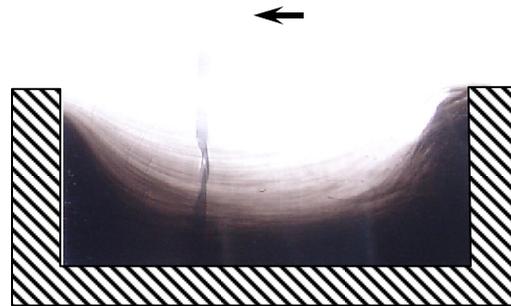
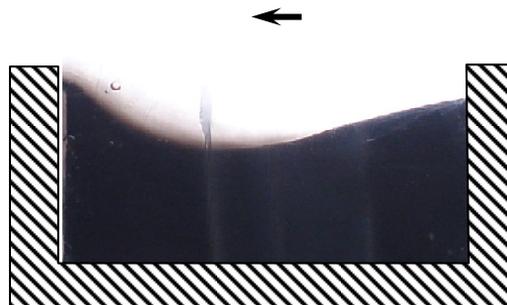
	Distancia 30 mm	Distancia 60 mm	Distancia 90 mm
Teste 1	6,15	6,68	5,77
Teste 2	9,76	7,72	11,45
Teste 3	34,11	32,66	34,7

Obtido o Número de Reynolds de cada rodada de experimento, pudemos então relacionar e analisar as imagens obtidas de cada experimento. Essas imagens são apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8, onde relacionamos o mesmo distanciamento entre as placas de acrílico com o Número de Reynolds correspondente.

De acordo com o aumento do número de Reynolds para um mesmo tamanho de cavidade, pode-se perceber ao analisar a Figura 6, que o escoamento mais perturbado, como já era de esperar, é o que acontece com o maior número de Reynolds ($Re = 34,11$), neste caso o escoamento da Figura 6.c. Os outros dois experimentos não apresentam uma larga diferença entre seus números de Reynolds: Figura 6.a, $Re = 6,15$ e Figura 6.b, $Re = 9,76$; logo, o comportamento dos escoamentos se tornam mais homogêneos.

(a) $Re = 6,15$ (b) $Re = 9,76$ (c) $Re = 34,11$ Figura 6: Imagens obtidas para razão de aspecto $h/b = 1$

A partir do momento em que o comprimento da cavidade é alterado, o comportamento do escoamento também será modificado. Este fato pode ser analisado ao comparar-se o escoamento com razão de aspecto $h/b = 1$, Figura 6, com o escoamento com razão de aspecto $h/b = 2$, Figura 7. No caso desta razão de aspecto, também pode-se perceber que a maior perturbação acontece naquele apresentado na Figura 7.c, onde o número de Reynolds ($Re = 32,66$). Os escoamentos com número de Reynolds inferiores: Figura 7.a, $Re = 6,68$ e Figura 7.b, $Re = 7,72$ apresentam maior estabilidade.que há uma região da cavidade onde ocorre maior instabilidade. Este fato acontece por haver nesta região uma camada cisalhante, que cria perturbações onde ela atua.

(a) $Re = 6,68$ (b) $Re = 7,72$ (c) $Re = 32,66$ Figura 7: Razão de aspecto $h/b = 2$

Com uma cavidade ainda maior, apresentando razão de aspecto $h/b = 3$, observa-se que ele é menos estável que os apresentados anteriormente, nas Figuras 6 e 7, onde a razão de aspecto são $h/b = 1$ e $h/b = 2$ respectivamente. Nota-se também que o escoamento é dividido em duas regiões, uma delas sendo mais estável que a outra. Esta instabilidade ocorre devido ao fato de haver uma camada cisalhante na região da parede esquerda da cavidade. Esta força cisalhante cria perturbações no escoamento até onde ela atua e as perturbações tornam-se mais efetivas com o aumento do

número de Reynolds, pois como pode-se analisar, o escoamento da Figura 8.a que apresenta $Re = 34,7$ é mais instável que o da Figura 8.b de $Re = 11,45$, sendo este menos estável que o da Figura 8.c de $Re = 5,77$.

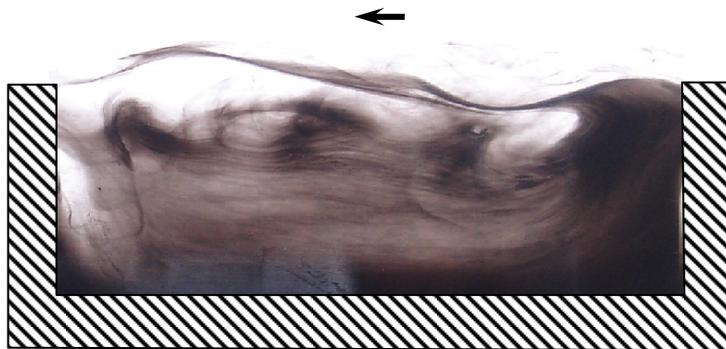
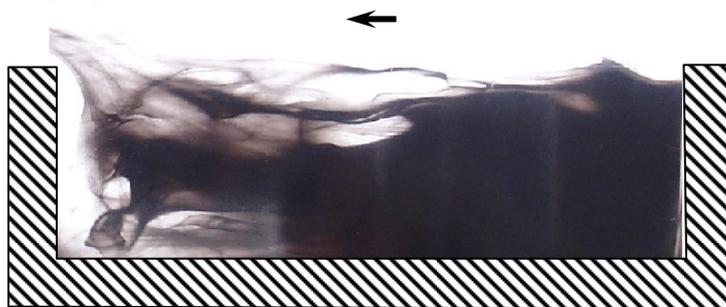
(a) $Re = 5,77$ (b) $Re = 11,45$ (c) $Re = 34,7$

Figura 8: Imagens do escoamento com razão de aspecto $h/b = 3$.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho, ensaios iniciais do escoamento a baixos Reynolds em cavidades abertas foram conduzidos, evidenciando o potencial da utilização de uma célula de Hele-Shaw para a visualização deste tipo de escoamento.

A utilização deste tipo de corante, entretanto, não produziu imagens de boa qualidade. Para aprimorar a visualização e a comparação entre os escoamentos com diferentes razões de aspecto, estudos posteriores serão realizados, utilizando-se outros tipos de efeitos de visualização, como por exemplo, a utilização de traçadores sólidos.

5. REFERÊNCIAS

- Schlichting, Hermann, 1979, Boundary – Layer Theory, Mc Graw – Hill Book Company, pp 122-123.
- Lindquist, Cláudio, 2000, Estudo Experimental do Escoamento ao Redor de Cilindros de Base Quadrada e Retangular, Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira-SP, 2000.
- Mansur, S.S., Vieira, E.D.R., 2004, Visualização experimental de escoamentos, Turbulência, Coleção Cadernos de Turbulência, vol.4.
- Möller, S.V., Silvestrini, J.H. (eds.), Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, Porto Alegre, pp.33-71.
- Nakamura, Y., Ohya, Y., Ozono, S., Nakayama, R., 1996, Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers 200–103. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.65, p.301-08.
- Ohya, Y., Nakamura, Y., Ozono, S., Tsuruta, H., Nakayama, R., 1992, A Numerical study of vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges, Journal of Fluid Mechanics, v.236, p.445-60.

VISUALIZATION OF THE FLOW INSIDE OPEN CAVITIES

Iara de Souza Barbosa

UNESP – FEIS – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Brasil Centro, nº56, Ilha Solteira - SP
iarabar@dem.feis.unesp.br

Sérgio Said Mansur

mansur@dem.feis.unesp.br

Abstract: *This work presents an experimental study of the flow in the interior of open cavities the low Reynolds numbers. The assays had been carried through in a cell of Hele-Shaw especially constructed for the visualization of flows. Cavities with reasons of aspect 1, 2 and 3 had been tested. In a general manner, it was observed that how much bigger the reason of aspect of the cavity, more unstable becomes the draining.*

Keywords: *Hele-Shaw, Reynolds, Flow inside cavities.*