

## ESTUDO DO ESCOAMENTO AO REDOR DE ESFERAS EM MODERADOS REYNOLDS.

Luiz Fernando Cremonez, Edson Del Rio Vieira – Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Campus de Ilha Solteira.

Nos dias atuais, o estudo do escoamento de um fluido viscoso ao redor de um corpo não-aerodinâmico é objeto de estudo de vários autores [1,2]. A estrutura topológica da esteira de corpos rombudos apresenta elementos tridimensionais complexos, com forte interação entre os vórtices em regimes transientes dificultando, sobremaneira, o equacionamento matemático. Mesmo para uma esfera, que apresenta uma geometria relativamente simples, encontramos uma estrutura altamente complexa tridimensional não permanente com instabilidades e interações entre vórtices.

Trabalhos experimentais do escoamento ao redor de uma esfera são encontrados utilizando diferentes técnicas de medição. Técnicas não-intrusivas utilizando a análise e processamento de imagens encontra, recentemente, muitas aplicações no estudo da mecânica dos fluidos. De fato, o desenvolvimento dos novos computadores digitais com uma surpreendente capacidade de processamento e as novas tecnologias de captura de imagens digitais, facilitou o emprego do processamento de imagens em diversas áreas do conhecimento humano.

No presente trabalho, utilizou-se técnicas de captura de imagens digitais do escoamento visualizado em meio hidrodinâmico para obtenção de dados qualitativos e quantitativos do escoamento ao redor de uma esfera movimentando-se em um meio viscoso infinito em moderados números de Reynolds.

Utiliza-se o número de Reynolds ( $Re$ ) como um primeiro parâmetro para avaliação do escoamento ao redor de uma esfera,

$$Re = \frac{v D}{\nu} \quad (1)$$

onde ( $v$ ) é a velocidade da esfera, ( $D$ ) o seu diâmetro e ( $\nu$ ) a viscosidade cinemática do meio fluido.

Segundo [2], os regimes de escoamento ao redor de uma esfera podem ser classificados como:

- $Re < 5$  – Observa-se o fenômeno denominado “creeping flow”, o fluido escoando ao redor da esfera sem descolamento apreciável.
- $5 < Re < 130$  – O escoamento, forma dois anéis de recirculação permanentes, que guardam entre sim simetria em relação a um plano passando pelo centro da esfera. Observa-se a perda de simetria da bolha de recirculação para Reynolds em torno de 130.
- $130 < Re < 300$  – a esteira à jusante da esfera, movimenta-se em forma de onda com longos períodos. A bolha de recirculação perde sua simetria axial.
- $300-350 < Re < 420$  os autores pesquisados na literatura identificam, por métodos numéricos ou experimentais, que vórtices do tipo “hair pin”, tornam-se evidente em número de Reynolds por volta de 300 a 350 e até 420 a emissão destes permanece de forma periódica.
- $420 < Re < 500$  a emissão dos vórtices do tipo “hair pin” e a flutuação da velocidade baseada na emissão de vórtices passam a se comportar de maneira totalmente irregular.

Os ensaios experimentais foram realizados em um canal vertical construído em acrílico, como apresentado da Figura 1, o que possibilita a visualização do escoamento e facilita a captura de imagens. O fluido de trabalho utilizado foi água bi-distilada e empregou-

se a técnica de visualização através de corantes líquidos a base de PVA, que permitiram a visualização da esteira e dos vórtices e a captura de imagens.

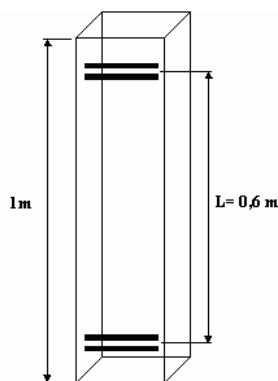


Figura. 1

O coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) é

$$C_d = \frac{2F}{A\rho v^2} \quad (2)$$

onde ( $F$ ) é a força resultante, ( $A$ ) é a área de secção projetada da esfera, ( $\rho$ ) é a densidade do fluido e ( $v$ ) a velocidade da esfera.

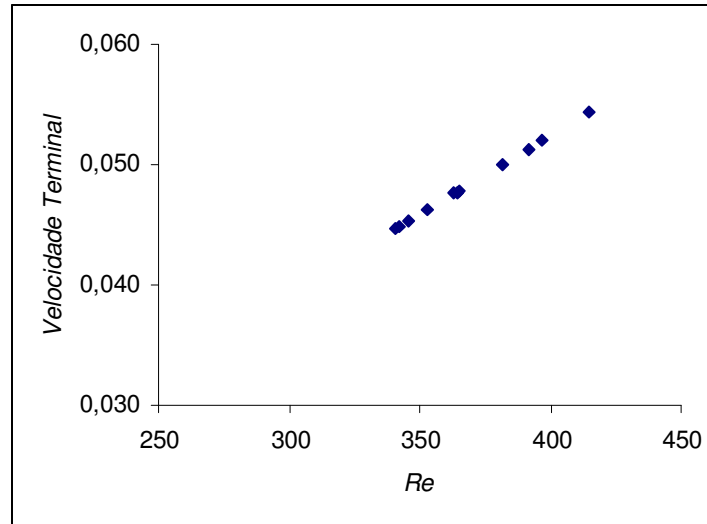
Os ensaios foram realizados a uma temperatura ambiente de 31° C com esferas de cerca de 6 mm de diâmetro e massas da ordem de 0,114 g, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Número de Reynolds ( $Re$ ) e do coeficiente de arraste ( $C_d$ ) dos ensaios realizados.

Ensaio	Tempo (s)	Velocidade (m/s)	$Re$	$C_d$
1	11,03	0,0544	415	0,34
2	11,54	0,0520	397	0,37
3	11,69	0,0513	391	0,38
4	11,99	0,0500	382	0,40
5	12,54	0,0478	365	0,43
6	12,57	0,0477	364	0,44
7	12,61	0,0476	363	0,44
8	12,98	0,0462	353	0,46
9	13,25	0,0453	345	0,48
10	13,38	0,0448	342	0,49
11	13,44	0,0446	341	0,50

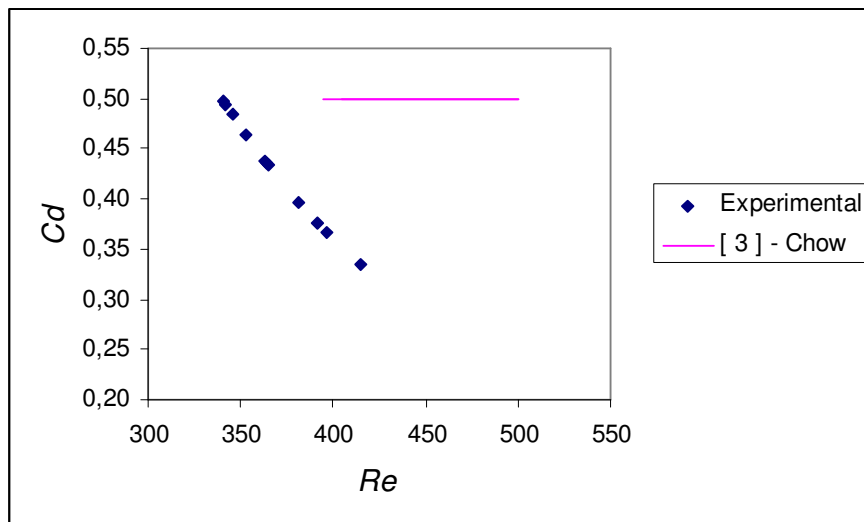
Com os dados da Tabela 1, geramos um gráfico da Velocidade terminal por  $Re$ , (Gráfico.1) e também um gráfico de  $C_d$  por  $Re$ , (Gráfico.2), e comparamos com [3].

Gráfico 1. Perfis de velocidade por número de Reynolds ( $Re$ )



Do gráfico.1, temos que para velocidades crescentes, temos Reynolds crescentes, o que era previsto da equação (1), que nos mostra que mantidos o diâmetro da esfera e a viscosidade cinemática do meio fluido, Reynolds é diretamente proporcional a velocidade.

Gráfico 2. Coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) por número de Reynolds ( $Re$ )



Segundo [3],  $C_d$  relaciona-se com Reynolds da seguinte forma:

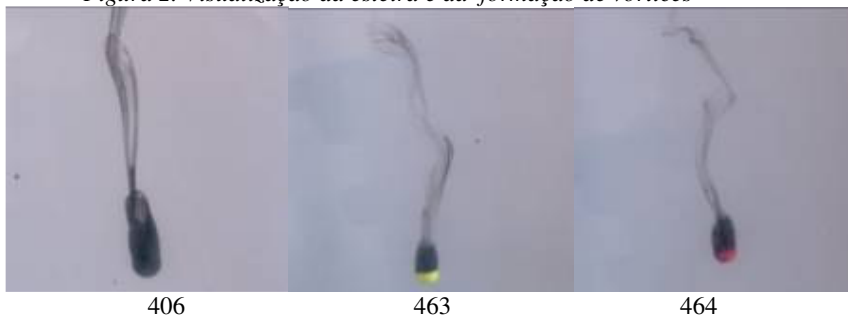
- $Re \leq 1 - C_d = 24/Re$
- $1 \leq Re \leq 400 - C_d = 24/Re^{0,646}$
- $400 < Re \leq 3 \times 10^5 - C_d = 0,5$

Pelos dados obtidos vemos que para valores crescentes de Reynolds temos valores decrescentes de  $C_d$ , o que é coerente com a literatura consultada, porém, enquanto [3] obteve um  $C_d$  de 0,5 para Reynolds próximos à 400, nosso  $C_d$  se aproxima de 0,5 para uma faixa de Reynolds próximo à 350 e continua diminuindo para  $Re$  maiores. Devemos considerar que muitos fatores podem interferir nos resultados, como, por exemplo, a técnica experimental utilizada, fazendo com que a razão sinal ruído (SNR) ainda seja considerável e prejudique na coleta dos dados.

De algumas das imagens obtidas no experimento, (Figura 2), percebe-se que para  $Re$  de 406 o comportamento da esteira é mais simétrico do que no  $Re$  de 464, neste último a esteira se mostra bem mais irregular que no primeiro.

Para o método experimental adotado a emissão de vórtices do tipo “hair pin” ficou evidente para  $Re$  próximos à 400, Figura 3, e não na faixa de 300 à 350 segundo [2].

*Figura 2. Visualização da esteira e da formação de vórtices*



*Figura 3. Visualização da formação de vórtices do tipo “hair pin”*



Assim os primeiros resultados mostram que o estudo do escoamento ao redor de uma esfera é possível de ser realizado em um canal vertical utilizando-se a análise e processamento de imagens como ferramenta de trabalho, a relação entre Reynolds e velocidade foram coerentes com os dados encontrados na literatura, já dados como a formação de vórtices “hair pin” e o coeficiente de arraste encontraram uma pequena divergência devido aos parâmetros experimentais adotados, que podem ser corrigidos diminuindo-se razão sinal ruído (SNR), trabalhando-se com  $Re$  mais elevados, ou com esferas com massa um pouco mais elevadas.

#### *Referências bibliográficas:*

- [1] Lee, S., 2000, “A Numerical Study of the Unsteady Wake Behind a Sphere in a Uniform Flow at Moderate Reynolds”, *Computers & Fluids*, vol.29, pp. 639-667.
- [2] Lauchle, G. C. & Jones, A. R., 1998, “Unsteady Lift Force on a Towed Sphere”, *Journal of Fluids and Structures*, vol.12, nº.8, pp.949-958
- [3] Chow, C. -Y., “An Introduction to Computational Fluid Mechanics”, New York, Wiley, 1980.