

## INJEÇÃO DE MASSA NA ESTEIRA DE UM CILINDRO FIXO E DE UM CILINDRO ROTATIVO.

**José Antonio G. Croce, MSc**

**Fernando Martini Catalano, Ph.D. MRAeS, MAIAA**

Escola de Engenharia de São Carlos, Dpto. de Engenharia Mecânica, Lab. de Aeronaves  
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 - CEP 13560-250 – São Carlos – SP – Brasil

**Resumo.** *Um trabalho experimental foi realizado para medir o efeito da injeção de massa na esteira formada por um cilindro bidimensional fixo e rodando. Um jato fez a injeção de massa através de um pequeno cilindro localizado atrás do cilindro principal. A posição de jato podia ser mudada para que a injeção de massa fosse feita diretamente na esteira. Um túnel de vento de baixa turbulência foi usado para visualização do escoamento ao redor do cilindro fixo e rotativo. A distribuição de velocidade atrás do cilindro foram medidas por um anemômetro de fio quente a temperatura constante em uma malha de 100 pontos. Um túnel de vento de circuito aberto foi usado para a medição da força arrasto gerada pelo cilindro fixo medidos através de uma balança aerodinâmica. Resultados mostraram que pequenos jatos podiam reduzir a esteira do cilindro fixo e rodando significativamente levando a redução arrasto. O jato e a esteira misturados medidos em detalhes a jusante do modelo mostraram que a camada de mistura do jato suavizava rapidamente o gradiente de velocidade entre o jato e a esteira. Como o jato está soprando para fora do cilindro principal este sistema poderia ser usado para controlar a formação do 'vortex shedding' de estruturas como pontes, chaminé e torres.*

**Palavras-chave:** *Corpos rombudos; efeito Magnus; redução de arrasto; injeção de massa.*

### 1. INTRODUÇÃO

Qualquer método que possibilite uma redução significativa na força de arrasto de um corpo sujeito à ação de ventos além do caráter científico, produz avanços nas mais diversas áreas da engenharia. Estruturas altas como edifícios, chaminés, ou pontes estão a todo tempo sujeitas a ação de escoamentos atmosféricos os quais produzem o aparecimento de forças de arrasto devido tanto ao atrito do ar com as paredes destas estruturas quanto, e na maioria dos casos principalmente, ao surgimento de esteiras de baixa pressão na parte traseira destes corpos, tomando-se como referência o sentido do escoamento.

Além das forças de arrasto podem surgirem outras, como por exemplo forças de sustentação devido à diferença de pressão entre duas superfícies. Um exemplo clássico de indução de sustentação é o cilindro de efeito Magnus. Um cilindro rodando e imerso em um escoamento produzindo altos valores de força de sustentação e que, no entanto, possui o

inconveniente pertinente a todos corpos rombudos de apresentar uma alta força de arrasto. O efeito Magnus foi bastante estudado e utilizado como no caso do uso de cilindros com rotação na embarcação conhecida como “Backau”, um navio construído nos anos trinta por FLETTNER (1925), o qual usava no lugar de velas dois cilindros girando. Outra aplicação apresenta uma aeronave com cilindros rotativos no lugar de asas desenvolvida também na década de trinta. Várias outras aplicações foram testadas; como uso de cilindros rotativos para a confecção de bombas hidráulicas e turbinas eólicas, estudados por CAMARGO VIERA (1965); em dirigíveis em forma de uma grande esfera, a qual girava lentamente enquanto em voo para gerar sustentação pelo efeito Magnus, desenvolvidos pelos INSTITUTOS CANADENSE DE PESQUISA AERONÁUTICA (1988).

Métodos para a redução de arrasto de perfil em corpos rombudos abrangem um grande número de possibilidades. Dentre eles pode-se citar a sucção da camada limite com a intenção de atrasar a separação e conseqüentemente reduzir o tamanho da esteira, PRANDTL (1927). Outros processos visam aumentar a intensidade da turbulência do escoamento através do posicionamento de pequenos cilindros à frente do corpo para provocar a diminuição do arrasto. Recentemente, IGARASHI (1997) obteve bons resultados de redução de arrasto em prismas quadrados através do posicionamento a frente do modelo de um pequeno cilindro. Ainda pode-se citar o uso de rugosidade na superfície de corpos imersos em escoamento, para induzirem a transição da camada limite mais cedo, atrasando o ponto de separação com conseqüente redução da força de arrasto.

Com o método aqui proposto pretende-se determinar as características aerodinâmicas de um processo de redução do arrasto em cilindros parados e rotativos. Este método consiste em se colocar na esteira dos modelos um pequeno cilindro contendo uma série de furos no sentido do escoamento. Isto é feito com a intenção de se injetar massa na esteira e desta forma reduzir seu tamanho e alterar também seu comportamento. Sendo o equipamento de injeção de massa montado externamente a estes corpos, o processo em quase nada altera a forma destes. Isto é vantajoso pois permite adaptações ao contrário de modificações estruturais. Para determinar as características do escoamento foram realizados uma seqüência de ensaios de visualização, anemometria a fio quente dos perfis de velocidade da esteira, e de medidas das forças de arrasto geradas.

## **2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO**

### **2.1. Experimento de Visualização**

O experimento de visualização com fumaça foi montado em um túnel de vento de circuito aberto, de baixa velocidade, e com características de baixo índice de turbulência. O modelo utilizado consistia de um cilindro de diâmetro igual a 5,9 centímetros montado, através de um eixo interno, em um mancal de rolamento fixado na parede da câmara de ensaio. Ao redor do mancal foi montado um anel onde foi fixada uma placa circular que continha o pequeno cilindro para o jato. O cilindro de jato é composto de pequenos furos, com diâmetro igual a 0,16 centímetros, em todo seu comprimento para a injeção de massa. Para o caso do cilindro rotativo, um sistema composto de motor elétrico de corrente contínua e todo o cinematismo necessário foi montado na parte traseira da câmara de ensaio.

### **2.2. Anemometria a fio quente.**

O levantamento dos perfis de velocidade da esteira do cilindro rodando e parado foi montado em outro túnel de vento de circuito aberto, com maiores velocidades de escoamento. O modelo tinha mesmo diâmetro, igual a 5,9 centímetros, mas com a diferença de ter dois

eixos em suas extremidades para a fixação nos mancais de rolamentos. As características do cilindro de injeção de massa e a placa foram mantidas iguais ao do modelo usado na visualização. Para as medidas dos perfis de velocidades usou-se um anemômetro de fio quente de temperatura constante. Foram levantadas curvas dos perfis de velocidades, tanto para o cilindro fixo quanto para o rotativo, a distância constante à montante em um 'grid' de 100 estações.

### 2.3. Medidas de Forças Aerodinâmicas.

Para as medidas das forças aerodinâmicas foi utilizada uma balança aerodinâmica de dois graus de liberdade para a medição da força arrasto. Esta balança foi projetada e construída exclusivamente para este fim. O modelo foi o mesmo utilizado nos ensaios de anemometria montado em um suporte em forma de "U" conectado à balança aerodinâmica. Devido a utilização de um amplificador instrumental de precisão em conjunto com um sistema de aquisição digital, obteve-se uma precisão de leitura das forças da ordem de 0,001 N.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Visualização do Escoamento

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de visualização são apresentados a seguir. A velocidade do escoamento foi mantida constante no valor de 1,4 metros por segundo, resultando em um número de Reynolds de 5506,7 baseado no diâmetro do cilindro. São apresentadas duas situações de injeção de massa com o jato 1 e jato 2 com valores de variação da quantidade de movimento iguais a 0,0129 N e 0,0395 N respectivamente.

O escoamento ao redor do cilindro parado e rodando pode ser visto na Figura 1. Os dois modelos encontram-se nas mesmas condições de escoamento, e o cilindro rotativo está girando a uma rotação constante de 950 rpm. Pode-se notar, como esperado, a esteira do cilindro parado maior do que a do cilindro rotativo.

Como pode ser visto na Figura 2, o efeito do jato na esteira do cilindro parado é bastante significativo quanto à redução de seu tamanho. Pode-se também constatar que a esteira não apresenta de forma evidente a formação de grandes vórtices descolados e periódicos. Na Figura 3 observa-se também a diminuição do tamanho da esteira do cilindro parado. No entanto agora é possível observar também uma redução da esteira do cilindro com rotação.

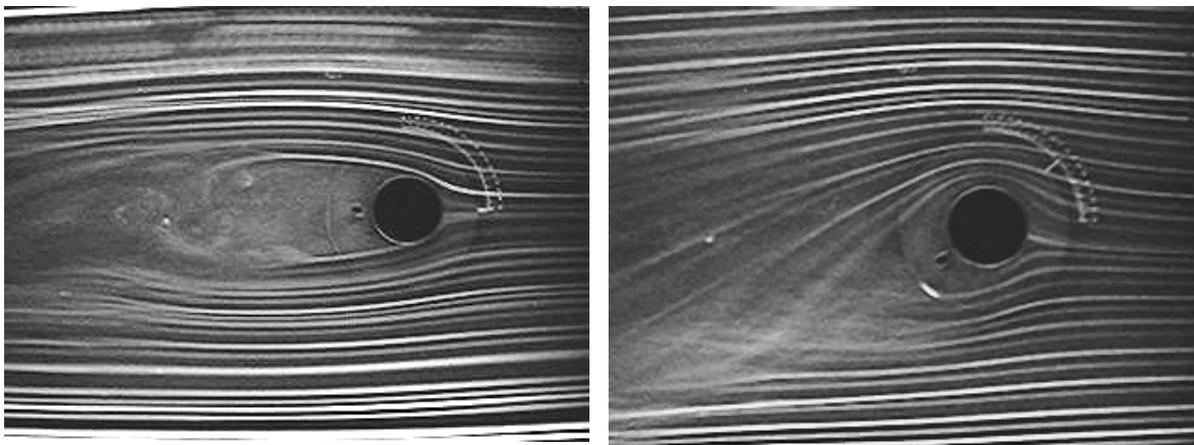


Figura 1 – Cilindro parado e rodando sem a injeção de massa.

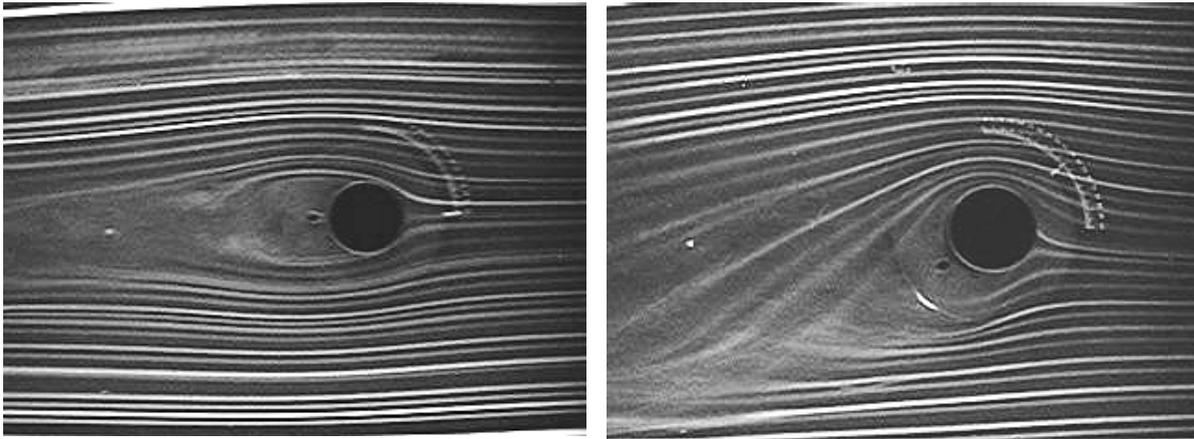


Figura 2 – Cilindro parado e rodando com jato 1

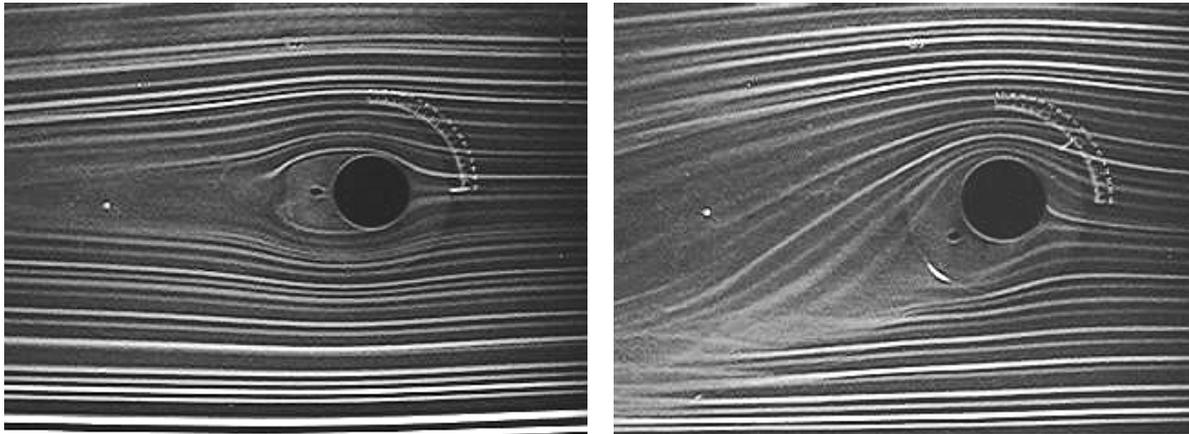


Figura 3 – Cilindro parado e rodando com jato 3

### 3.2. Levantamento dos perfis de velocidade.

A seguir é apresentado os resultados dos levantamentos dos perfis de velocidades da esteira do cilindro parado e rodando. Estes levantamentos foram feitos à uma velocidade média na câmara de ensaio de 2,3 metros por segundo. Manteve-se a velocidade relativamente baixa devido ao fato de que nestas condições o efeito dos jatos na redução da esteira foi mais pronunciado. Isto não impede de extrapolar os resultados para outras condições de escoamento, devido principalmente a similaridade de perfis garantir o comportamento básico igual em um vasta faixa de condições de escoamento. O percurso transversal do anemômetro foi de 31,6 centímetros e a uma distância de 45 centímetros a jusante do modelo.

Nas figuras 5 e 6 pode ser visto que a redução da esteira é significativa com o aumento do valor da injeção de massa. A figura 4 apresenta os jatos que foram utilizados nesta parte do experimento. A Figura 5 apresenta os resultados para a esteira de um cilindro parado sem jato e com uma série de jatos. A Figura 6 apresenta os mesmos resultados mas para o cilindro rotativo. A seguir é mostrado a relação dos jatos usados com seu valor de variação da quantidade de movimento.

Tabela 1 - Valores dos jatos usados

Jato 40 -	0,02041 N
Jato 60 -	0,0547 N
Jato 80 -	0,08715 N
Jato 100 -	0,15475 N
Jato 120 -	0,19794 N

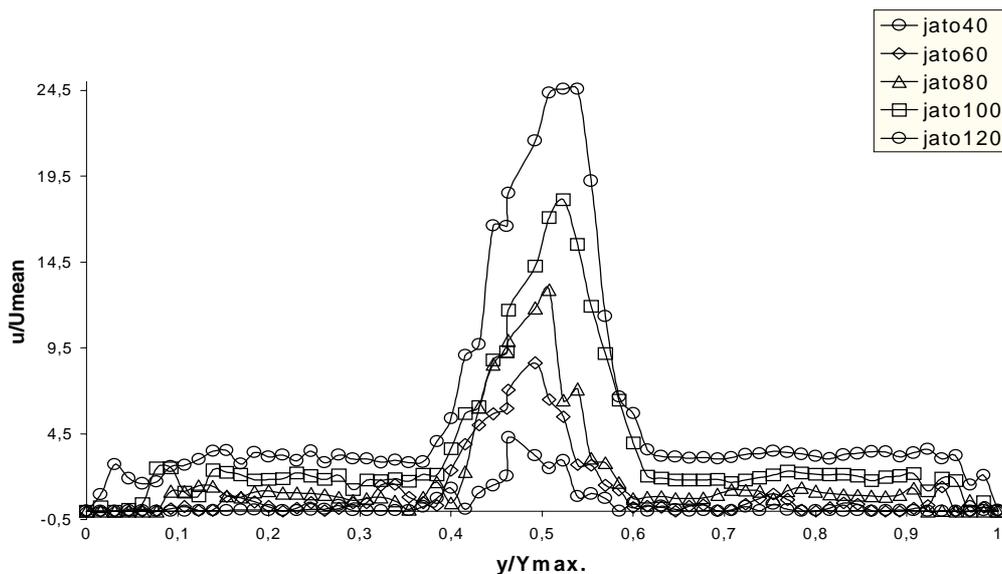


Figura 4 – Perfis de velocidade dos jatos usados.

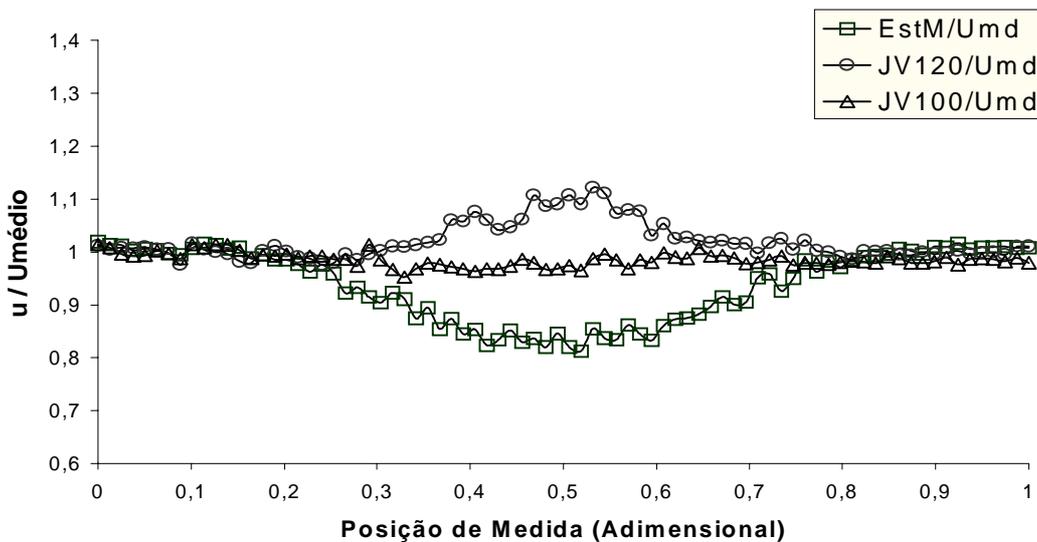


Figura 5 – Perfis de velocidade das esteiras sem e com jatos (Cilindro Parado).

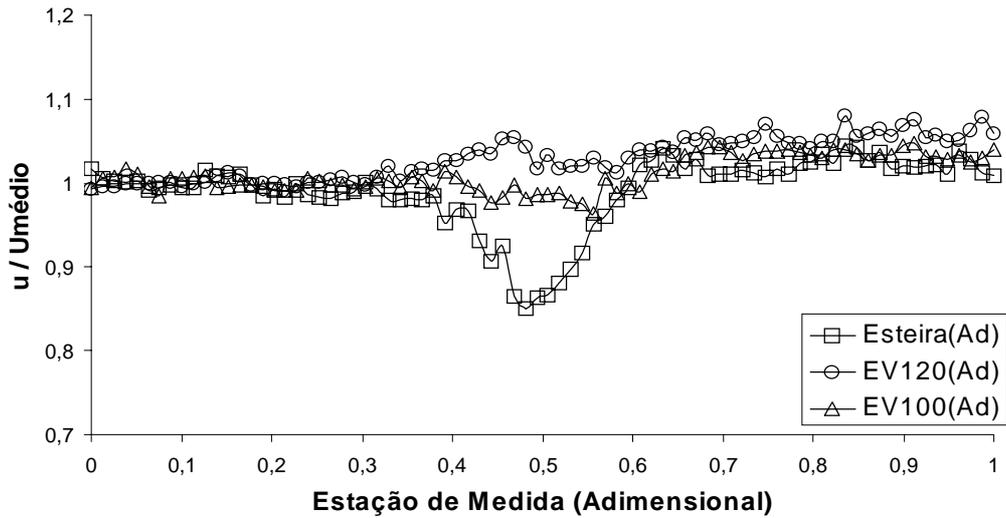


Figura 6 - Perfis de velocidade das esteiras sem e com jatos (Cilindro Rodando).

### 3.3. Medidas de Força

A seguir são apresentados os resultados das medidas de força utilizando a balança aerodinâmica. Foram, até o momento, realizados apenas as medidas com o cilindro parado, isto devido a complicações técnicas nas medições com o cilindro rodando. As velocidades usadas variaram entre 5 e 20 metros por segundo. Foi usada esta faixa de velocidades pois foi a melhor que se adequou as condições de medição da balança e limitada pela velocidade máxima controlável do túnel de vento.

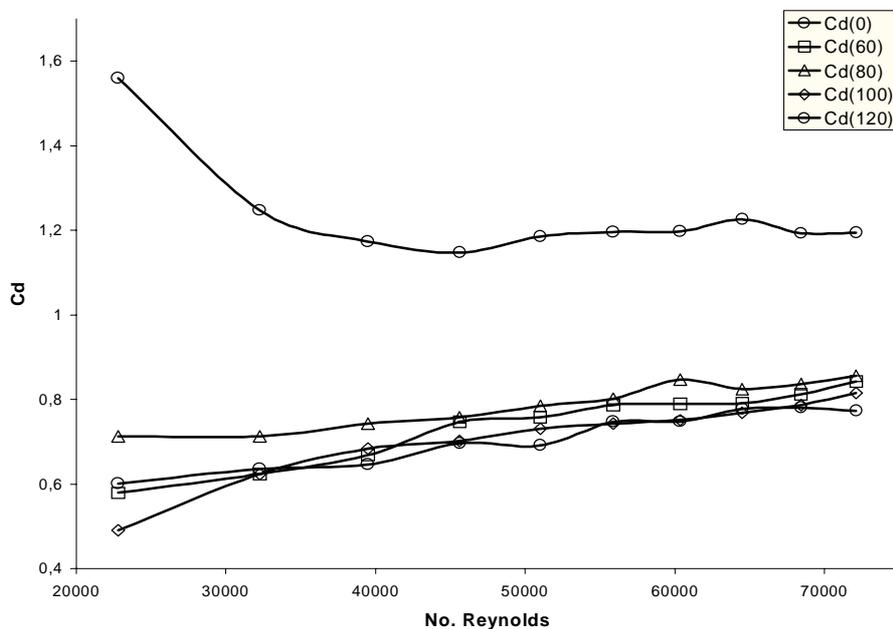


Figura 7 – Curvas de  $C_d$  pelo número de Reynolds para vários tipos jatos.

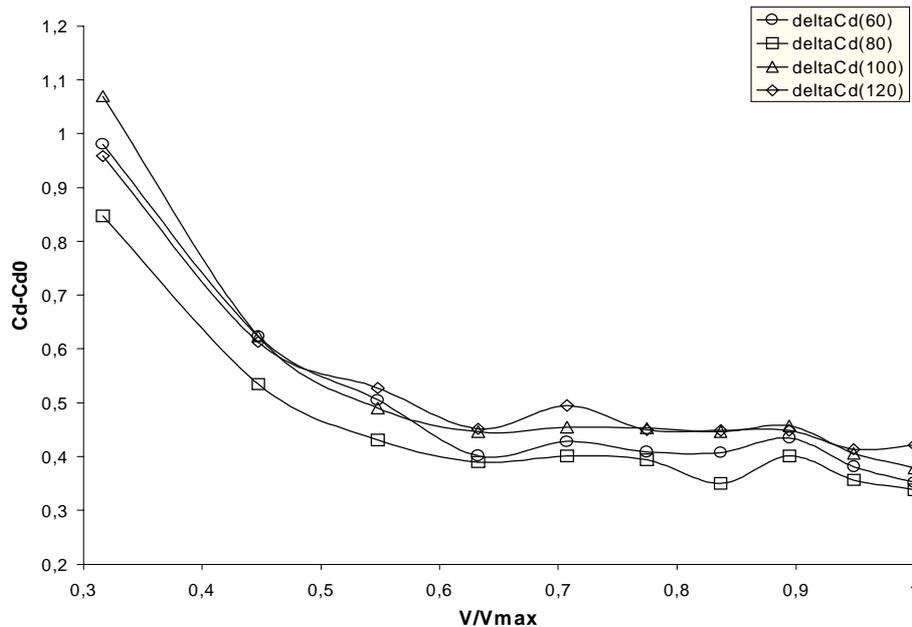


Figura 8 – Diferença entre Cd provocado por cada jato e Cd da esteira básica.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Visualização do escoamento

Através das imagens obtidas pelo ensaio de visualização, fica claro que a redução do tamanho da esteira tanto para o cilindro parado quanto para o rodando é bastante grande. Na Figura 1 pode-se ver a esteira formada pelos dois cilindros, fixo e rodando. Logo após na Figura 2 a esteira tem suas características modificadas pela injeção de massa. O mais notável aqui é a aparente eliminação dos vórtices periódicos no cilindro fixo. Apenas uma pequena modificação no comportamento do cilindro rodando é notada. No entanto assim que o valor da vazão do jato é aumentada, uma notável diminuição no tamanho da esteira para ambos cilindros é observada ( Figura 3 ). Pode-se aqui concluir que a injeção de massa provoca uma diminuição na pressão estática no escoamento à montante, fazendo com que o gradiente de pressão na superfície dos cilindros fique menos adverso.

### 4.2. Levantamento dos perfis de velocidade

De acordo com o que pode ser visto pelos resultados da anemometria, fica claro que a idéia de reduzir a distribuição de velocidades em esteiras através da injeção de massa, é um objetivo realizado. Os resultados apresentados na Figura 5, para o cilindro parado e na Figura 6 para o cilindro rodando, comprovam que a injeção de massa a uma determinada velocidade, a esteira sofre uma grande modificação. Esta modificação pode ser uma redução em seu tamanho como pode levar até a uma esteira invertida com acréscimo de velocidade e não de perda. Isto pode significar o surgimento de uma força de empuxo.

### 4.3. Medidas de Força

Os resultados das medidas de força de arrasto apresentados nas Figuras 7 e 8 mostram que o fenômeno de redução da esteira pela injeção de massa não comporta-se forma seqüencial. Em outras palavras fica claro que uma grande redução no valor do arrasto é

obtido. No entanto esta redução não é muito mais aumentada mesmo com o acréscimo na injeção de massa. Isto, aparentemente, leva à uma conclusão de que o fenômeno está mais relacionado com a injeção de um alto nível de turbulência no escoamento. Assim sendo, a camada limite na superfície do modelo tende a transicionar mais cedo do que o esperado, eliminando a separação que é em alguns casos laminar para uma separação, bem mais a frente, turbulenta. Isto representa uma grande diminuição na força de arrasto entre os números de Reynolds 20000 a 30000 e tendendo a um patamar logo após.

## 5. CONCLUSÕES

Observou-se uma série de provas experimentais que caracterizam a injeção de massa em uma esteira como sendo um método eficiente na redução do arrasto em corpos rombudos. Tanto os experimentos de visualização quanto o de medição dos perfis de velocidades mostraram uma redução grande nas dimensões da esteira e uma mudança de suas características. No entanto o experimento de medida das forças de arrasto mostrou que o fenômeno para certos números de Reynolds ser inerente à camada limite do que a esteira. Para os casos de separação laminar o efeito mais significativo para a redução do arrasto está na transição prematura da camada limite, devido ao aumento do índice de turbulência provocada pela presença do jato. Isto leva a um atraso na separação da camada limite com a conseqüente redução do arrasto de perfil. Mas todos estes resultados comprovam que houve de fato uma redução no valor do arrasto de perfil atrás dos modelos estudados.

Este método é, do ponto de vista de montagem, muito aconselhável para o uso em aplicações práticas. Dentre elas pode-se citar a redução do arrasto e o controle do 'Vortex Shedding' de pontes, torres altas, chaminés e demais estruturas sujeitas a ação de ventos. Outra aplicação é a implementação do sistema de injeção de massa para a redução do arrasto em aparelhos que pretendem o uso de cilindros rodando, efeito Magnus, melhorando assim a performance atualmente prejudicada pelo alto valor da força de arrasto encontrada nestes casos. Todas estas aplicações práticas irão necessitar de pouca adaptação para a montagem do sistema estudado.

## REFERÊNCIAS

- Batchelor, G. K.,1967, An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press, Londres.
- Birkhoff, G. , Zarantonello, E. H.,1957, Jets, Wakes, and Cavities, Academic Press Inc, Nova Iorque.
- Camargo Vieira, R. C.,1964, Contribuição ao estudo das aplicações dos cilindros rotativos, Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- Department of External Affairs,1988, Tecnologia dos transportes: A experiência Canadense, Ottawa, Ontario, Canadá. /folder/
- Flettner, A.,1925, The Flettner Rotor Ship, Engineering, P. 117-20, jan.
- Igarashi, T.,1997, Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71,p.141-53.
- Johnson, W.,1986, The Magnus effect – Early investigations and a question of priority, International Journal of Mechanics Sciences, V. 28, n. 12, p.859-72.
- Prandtl, L.,1927, The generation of vortices in fluids of small viscosity, Aeronautical Reprints, n.20.
- Schlichting, H.,1968, Boundary Layer Theory, McGraw-Hill Book Company, Nova Iorque, 6<sup>a</sup> Edição.

Swanson, W. M.,1961, The Magnus Effect: A Summary of Investigations to Date, Journal of Basics Engineering, ASME 830, p. 461-70, set.  
Tollmien, W.,1945, Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge, NACA TM 1085.

### **DETERMINATION OF THE MASS INJECTION EFFECT IN THE WAKE OF A FIXED AND ROTATING CYLINDER.**

*Abstract.* Experimental work was performed for the measurement of the effect of mass injection in a wake of a fixed and a rotating two-dimensional cylinder. The jet was injected by means of a small cylinder located just behind the main cylinder. The jet position could be adjusted in order to assure that the blowing was directed into the wake. A very low turbulence wind tunnel was used for flow visualization of both a fixed and rotating cylinder. The velocity distribution behind the cylinder was measured by a constant temperature hot wire anemometer in a grid of 100 points and at two downstream positions. A small open circuit wind tunnel was used for drag measurements using a special two component balance. Results showed that small jet flows could reduce significantly the wake of both fixed and rotating cylinders with the inherent reduction of the base drag. The jet and wake mixing measured in detail with a fine grid at the downstream positions showed that the jet mixing layer rapidly smooths out the velocity gradient between jet and wake. As the jet was blowing outside the main cylinder this indicates that this system could be used to control the vortex shedding of structures such as bridges, chimney and towers.

*Keywords:* Bluff bodies; Magnus effect; drag reduction; mass injection.