



DINCON 2017

CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Análise do escoamento com cilindro de base quadrada através de curvas de Lissajous utilizando POD

Amanda Felipe Faria¹

Henrique Fanini Leite²

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil.

Ana Cristina Avelar³

Cayo Prado Fernandes Francisco⁴

Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE)

Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil.

Resumo. Os vórtices na esteira de cilindros são um importante campo de estudos da mecânica dos fluidos, pois vários tipos de estruturas podem surgir na esteira de cilindros. Para a identificação dessas estruturas, foram conduzidos experimentos em túnel de vento, com o uso da Técnica de Velocimetria de Imagem por Partícula (PIV), e um modelo de um cilindro de base quadrada com razão de aspecto 6. A partir dos dados desses experimentos, foi feita uma análise Decomposição Ortogonal Própria (POD) do campo de escoamento. Foram identificados os modos do escoamento, obtendo-se padrões de interações harmônicas entre os modos, podendo estes serem descritos por curvas Lissajous.

Palavras-chave. Túnel de Vento, PIV-TR, cilindro, corpo rombudo e POD.

1 Introdução

A formação de vórtices na esteira de cilindros são um importante fenômeno da mecânica dos fluidos. Por serem rombudos estes corpos não possuem um perfil aerodinâmico dando origem a uma ampla gama de fenômenos associados ao descolamento da camada limite e à formação de estruturas coerentes. No caso do cilindro de seção quadrada, a posição de descolamento da

¹ amanda.felippe.faria@gmail.com

² leite05@gmail.com

³ anacristina.avelar@gmail.com

⁴ cayo.francisco@gmail.com

camada limite é fixa, nas bordas do lado voltado para o escoamento, o que simplifica o problema em relação aos cilindros circulares. [1]. O escoamento na esteira de cilindros, tanto de base quadrada quanto circulares, é dependente do número de Reynolds, podendo a separação, na borda do modelo, ser laminar ou turbulenta [2].

Em escoamentos com cilindros finitos uma estrutura complexa de vórtices pode ser encontrada ao longo de sua altura. De acordo com [3], para o estudo dessas estruturas, a análise do escoamento na região do cilindro pode ser dividida em:

- Região de escoamento livre, que ocorre os vórtices de bordo de fuga;
- Região de junção do corpo, onde aparecem os vórtices de topo, a partir do bordo de ataque do cilindro e os vórtices de ferradura formados a partir da separação do escoamento e a junção com a vorticidade da camada limite na parte da frente do modelo, que se separa nos lados do cilindro. Esses vórtices são formados perto da parede porque esse cilindro está colocado sobre uma placa plana;
- Região do meio do cilindro, paralela ao eixo do cilindro e semelhante a esteira do cilindro. Essa região é chamada de central de vórtices e dá origem aos vórtices de von Karman, dependendo do número de Reynolds.

Diferentes tipos de campos de vorticidade ocorrem por causa da região de escoamento livre e da camada limite. Todas essas estruturas de vórtices se misturam umas com as outras, dificultando o mapeamento destas estruturas [4].

Devido à complexidade das estruturas de vórtices encontradas na esteira de cilindros, muitos estudos são realizados utilizando a técnica de visualização de escoamento conhecida por Velocimetria de Imagem por Partículas (PIV) e a análise dessas estruturas a partir do uso da técnica Decomposição Ortogonal Própria (POD). Alguns trabalhos, que utilizaram esses dois métodos, podem ser citados, como por exemplo: [4], [5], [6] e [7]. Estes trabalhos apresentam uma abordagem mais geral, tentando diagnosticar a esteira como um todo. Em contrapartida, o presente estudo tem enfoque no escoamento próximo da extremidade livre do cilindro, uma vez que esta região é a chave para a compreensão da interação entre o *downwash* induzido pela extremidade e os processos de formação de vórtices.

Para isso, foram conduzidos experimentos em túnel de vento, utilizando a técnica PIV com resolução temporal e um modelo cilíndrico de base quadrada, com razão de aspecto (RA) 6. Como a formação e propagação de vórtices pode ser vista, de maneira geral, como uma série de variações, periódicas ou não, nos campos de velocidade, os dados obtidos foram analisados através da técnica POD, que permitiu identificar os modos predominantes do escoamento e a partir disso, realizar a identificação de estruturas coerentes na esteira.

2 Materiais e Métodos

2.1. Descrição Experimental

Os experimentos foram conduzidos no túnel de vento TA-3, localizado no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Este túnel de vento possui seção de testes aberta, facilitando o acesso ao modelo durante as mudanças de configurações dos ensaios. Apresenta velocidade máxima em torno de 38m/s e nível de turbulência de aproximadamente 2% [8].

Durante os experimentos, foram testados 4 tipos de cilindros variando suas geometrias e tamanhos. Contudo, neste trabalho serão apresentados apenas os dados do cilindro de base quadrada com $RA=6$, possuindo 40 mm de base e 240 mm de altura. Campos instantâneos de velocidade foram obtidos em quatro planos diferentes: três planos horizontais em diferentes alturas do cilindro, $z/H = 0.15$, $z/H = 0.5$ e $z/H = 1$, sendo H a altura do cilindro, e o plano de simetria vertical $x-z$, exatamente no meio do cilindro. A velocidade do escoamento foi de 20m/s, resultando em um número de Reynolds de 65300.

2.2. Técnica PIV

A Técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula de alta resolução no tempo (PIV-TR) foi utilizada para análise do campo de escoamento. Essa técnica emprega de um *laser*, pulsado a partir de duas cavidades, que ilumina partículas traçadoras, que são injetadas na seção de testes a partir de um gerador de partículas [9]. Esse *laser* ilumina essas partículas, e trabalha em sincronia com uma câmera de alta resolução, que captura um par de imagens do escoamento em um tempo inferior a 100 microssegundos, Fig.1.

Nos experimentos com PIV-TR, foi utilizado um *laser* Nd:YLF, pulsado a partir de duas cavidades, com saída de 10 mJ por cavidade, e uma câmera, de alta resolução, 9020 CMOS, com taxa de aquisição máxima de 1kHz e resolução total de 1125 x 896 pixels. As lentes usadas possuíam 105mm de distância focal de 5,6.

Foram adquiridas 663 imagens para cada condição estudada, com frequência de aquisição de 500Hz.

Os campos de velocidade foram obtidos a partir do método da correlação adaptativa para a identificação da posição das partículas entre os dois pulsos do *laser*, disponível no *software* da Dantec Dynamics e foram visualizados no *software* Tecplot; maiores detalhes podem ser encontrados em [8].

2.3. Análise POD

A POD é uma técnica quantitativa, utilizada juntamente com o PIV, para identificar estruturas coerentes e medidas instantâneas do campo de escoamento. Essa técnica, oferece uma base para decomposição modal dos dados nos chamados modos POD. O primeiro modo da POD é o que concentra, usualmente, a maior quantidade de energia e as estruturas mais coerentes do escoamento. Quando a dinâmica do escoamento apresenta uma estrutura predominante, os dados podem ser representados por um modelo reduzido com aproximação satisfatória pelo primeiro modo. Esse método pode ser efetivamente usado para descrever vários tipos de escoamento, como por exemplo, de jatos sintéticos, esteira de cilindros, escoamentos em canal e entre outros.

O primeiro modo é o modo que usualmente apresenta maior concentração de energia, devido ao espectro dos autovalores e também por apresentar normalmente as estruturas de larga escala do escoamento. Por exemplo, quando o escoamento apresenta estruturas dominantes em larga escala

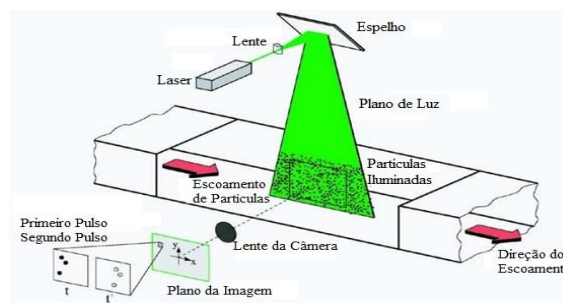


Figura 1: Sistema PIV [9].

ele será aproximado pelo primeiro modo da POD e então um “*snapshot*” pode ser recriado, de forma aceitável, utilizando o primeiro modo. Mais detalhes sobre POD podem ser encontrados em [1], [4], [5], [6] e [8]. Os “*snapshots*” e os modos da POD foram criados utilizando o programa MATLAB.

3 Resultados e Discussões

Embora tenham sido analisados todos os quatro planos descritos na seção anterior, este artigo apresentará resultados apenas para o plano horizontal no topo do cilindro ($z/H = 1$). Os resultados para os outros planos estão em pleno acordo com estudos similares de outros pesquisadores [1] [4], que apresentam análises detalhadas do comportamento da esteira nestas regiões. Em contrapartida, pouco se escreveu sobre o comportamento da esteira próxima à extremidade livre do cilindro, ainda que esta região seja chave para o entendimento das interações entre o *downwash* induzido pela extremidade e os processos de formação de vórtices longitudinais. Após a caracterização da dinâmica do escoamento neste plano a análise será expandida para todos os planos, com foco especial em possíveis relações entre o plano horizontal de topo e o plano de simetria vertical.

Os quatro primeiros modos obtidos pela POD estão representados na Fig. 2, que apresenta o escoamento imediatamente a jusante do cilindro. Se este fosse representado, estaria logo à esquerda dos campos vetoriais, visto de cima (isto é, “saindo do domínio da imagem”).

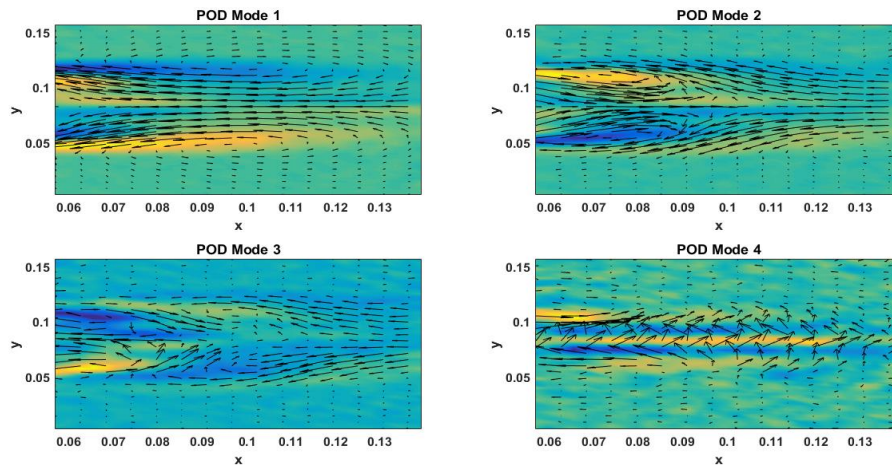


Figura 2: Modos da POD.

Enquanto os modos 1 e 2 são bem definidos, com simetria quase perfeita em relação ao plano médio, os campos vetoriais referentes aos modos 3 e 4 apresentam alguns vetores espúrios e maior grau de variabilidade o que se deve ao baixo nível de energia apresentado por estes modos. Isso fica claro ao se observar a Fig.3, que apresenta a energia cumulativa de todos os 663 modos da POD. O modo 1 contém em torno de 53% de toda a energia das flutuações do escoamento, enquanto o modo 2 possui cerca de 8%. Todos os modos subsequentes possuem menos de 1% do total de energia das flutuações. Os três primeiros modos são simétricos em relação ao plano central, enquanto o modo 4 é anti-simétrico. Este último modo está relacionado às oscilações induzidas pela esteira de von-Karman que se forma numa região mais próxima do centro do

cilindro [8] [11].

O modo 1, por sua vez, está relacionado com variações no *downwash* induzido pela extremidade livre do cilindro, conforme elucidado por [11]. Os outros dois modos, por sua vez, compõem uma relação harmônica em conjunto com o modo 1. Essa relação fica evidente quando se tem um gráfico relacionando os valores dos coeficientes de cada um desses modos com os campos de velocidade, conforme apresentado na Fig.4, onde as ordenadas e abscissas representam valores dos coeficientes a_1 , a_2 e a_3 referentes aos modos 1, 2 e 3, respectivamente. Em cada gráfico, foi adicionada uma linha contínua representando a curva de Lissajous que melhor descreve a relação entre os coeficientes representados.

Os coeficientes dos modos 1 e 2 estão representados na Fig.4a. Percebe-se que, a parábola formada representa uma relação de frequências de $\frac{1}{2}$, com diferença de fase de $\pi/4$. Assim, fica claro que o modo 2 representa um movimento oscilatório com o dobro da frequência daquele representado pelo modo 1, defasados em 45° . Na Fig. 4b, por sua vez, foram representados os coeficientes dos modos 1 e 3. Nesse caso, a figura formada representa uma relação de frequências de $1/3$, e uma defasagem de π . Seguindo a lógica anterior, isso significa que o tipo de flutuação representado pelo modo 3 tem uma frequência três vezes maior que a do modo um, com defasagem de 180° . Por fim, a Fig. 4c se refere aos coeficientes dos modos 2 e 3. Das relações obtidas nas Fig.4a e Fig.4b foi possível deduzir que a relação de frequências entre estes modos será de $2/3$, com defasagem de $3\pi/4$. De fato, a Fig.4 das curvas de Lissajous correspondente a esta relação harmônica é a que melhor se adapta aos dados. É visto que os pontos da Fig.4c apresentam uma dispersão muito maior. Isso se deve, novamente, à baixa energia destes modos, o que os torna mais suscetíveis à interferência de perturbações e fontes de erros diversas.

Embora não tenha sido possível determinar com certeza uma frequência definida para as flutuações representadas pelo modo 1, os resultados apresentados na Fig.4 deixam claro que há um comportamento periódico e bem definido relacionado à variações no *downwash* induzido, com uma componente principal de grande energia e componentes harmônicas secundárias com grau bem menor de energia.

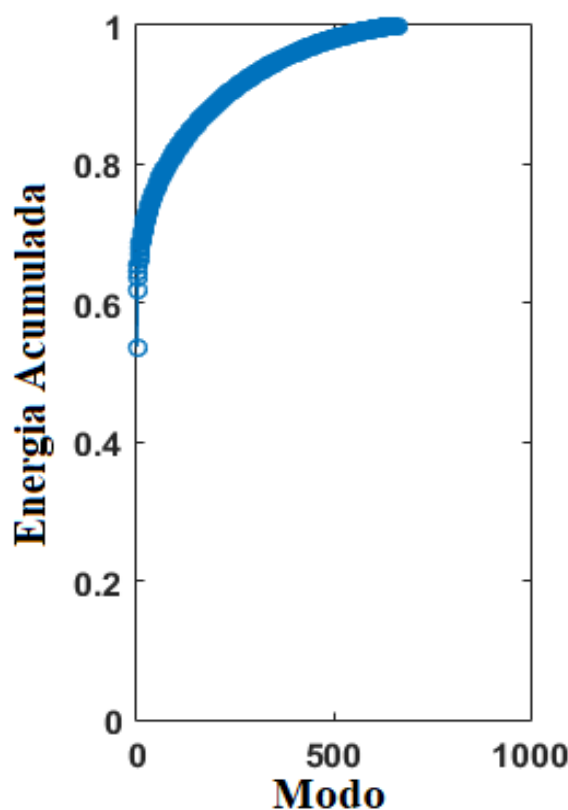


Figura 3: Energia dos modos da POD

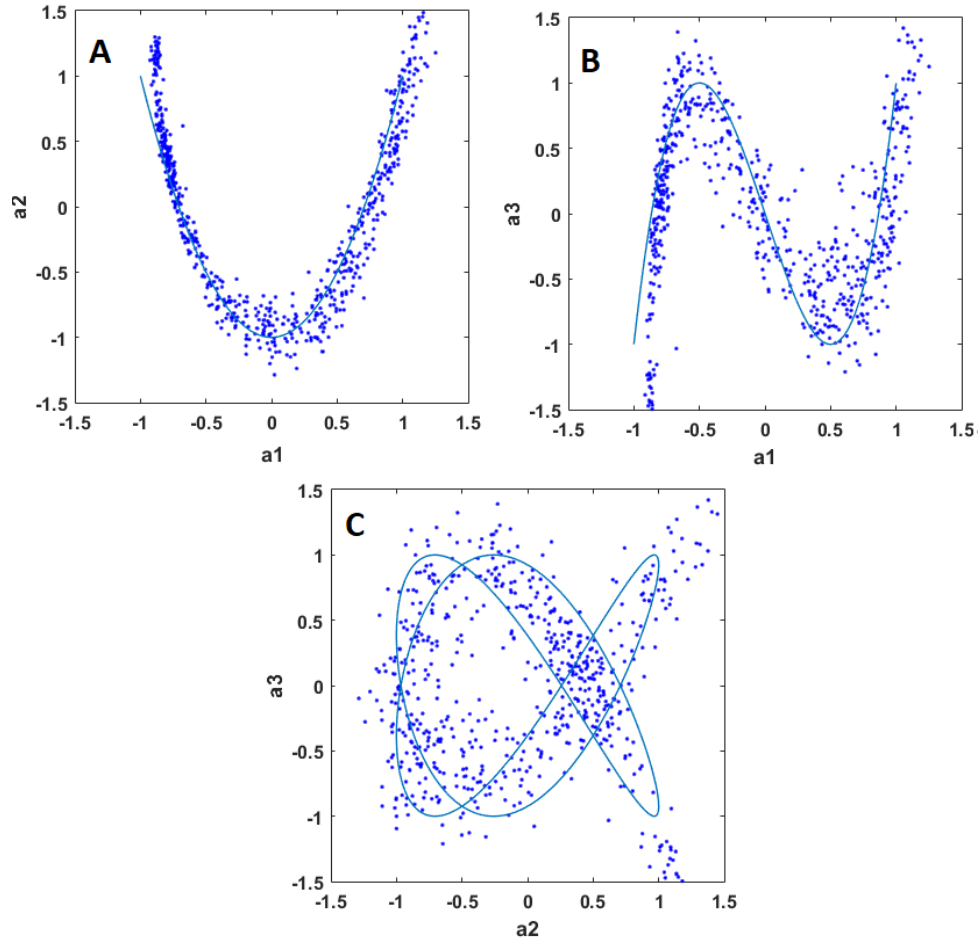


Figura 4: Relações entre os coeficientes dos modos 1, 2 e 3 e as curvas de Lissajous correspondentes.

4 Conclusões

Em relação aos modos da POD, conclui-se que, os modos 1 e 2 são bem definidos, com simetria quase perfeita em relação ao plano médio, e que os campos vetoriais referentes aos modos 3 e 4 apresentam alguns vetores espúrios e maior grau de variabilidade, devido ao baixo nível de energia nestes modos. Foi visto que o modo 1 contém em torno de 53% de toda a energia das flutuações do escoamento, enquanto que o modo 2 possui cerca de 8%. Todos os modos subsequentes possuem menos de 1% do total de energia das flutuações. Os três primeiros modos são simétricos em relação ao plano central, enquanto o modo 4 é anti-simétrico.

Quanto as figuras de Lissajous, foi visto que apresentam um comportamento periódico e bem definido, relacionado à variações no *downwash* induzido, e com uma componente principal de grande energia e componentes harmônicas secundárias com grau bem menor de energia. A partir desse trabalho percebe-se que a técnica POD pode ser empregada para análise de diversos tipos de escoamento e que é uma ferramenta útil para identificação de estruturas coerentes do escoamento.

Referências

- [1] WANG, H.F. and ZHOU, Y. (2009). “The finite-length square cylinder near wake” *Journal of Fluid Mechanics*, n. 638, p. 453-490.
- [2] APACOGLU, B.; PAKSOY, A.; ARADAG, S. (2012). “Effects of air blowing on turbulent flow over a circular cylinder”. *J. of Thermal Science and Technology*, Vol. 32, n. 2, p. 107-119.
- [3] BOURGEOIS, J. A.; SATTARI, P.; MARTINUZZI, R. J. (2011). “Alternating half-loop shedding in the turbulent wake of a finite surface-mounted square cylinder with a thin boundary layer”. *Physics of Fluids*, Vol. 23, Paper no. 095101-1.
- [4] WANG, H. (2012). “POD analysis of the finite-length square cylinder wake”. In *proceedings of The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7)*. Shanghai, China.
- [5] PEDERSEN, J. M. AND MEYER, K. E. (2002) “POD – analysis of flow structures in a scale model of a ventilated room”, *Exps. Fluids*, Vol. 33, No. 6, pp. 940-949.
- [6] SHI, L.L.; LIU, Y.Z.; WAN, J.J. (2009) “TR-PIV measurement of separated and reattaching turbulent flow over a surface-mounted square cylinder”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.24, pp.421-428.
- [7] HOSSEINI, Z.; BOURGEOIS, J.A.; MARTINUZZI, R.J. (2012) “Wall mounted finite cylinder wake structure modification due to boundary-layer interaction: Half-loop and full-loop coherent structure topologies”. In *proceedings of The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7)*. Shanghai, China.
- [8] LEITE, H. F.; ABREU, L.I.; SCHUCH, D.; AVELAR, A. C. (2016). “POD and spectral analysis of a wall-mounted square cylinder wake”. In: *ESCOLA DE PRIMAVERA DE TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA*, 10th, 2016, São José dos Campos, SP. **Proceedings... Rio de Janeiro: ABCM.**
- [9] RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; KOMPENHANS, J. **Particle Image Velocimetry: A Practical Guide**. 1 ed. Germany: Springer, (1998). 253p.
- [10] KAWAMURA, T.; HIWADA, M.; HIBINO, T.; MABUCHI, I.; KUMADA, M. (1984). “Flow around a finite circular cylinder on a flat plate”. *Bulletin of JSME*, Vol. 27, No. 232, 1984, pp. 2142 – 2151.
- [11] LEITE, H. F.; ABREU, L.I.; CAVALIERI, A.; AVELAR, A. C. (2017). “POD Analysis in the Wake of Wall-Mounted Cylinders”. In: *47th AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA AVIATION Forum*, Denver, EUA. **Proceedings...**