

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

IAGO DE CARVALHO BARBEIRO

Estruturas coerentes e modelos reduzidos para o escoamento  
ao redor de um cilindro no regime bidimensional periódico

São Paulo

2012

**IAGO DE CARVALHO BARBEIRO**

**Estruturas coerentes e modelos reduzidos para o escoamento  
ao redor de um cilindro no regime bidimensional periódico**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

**São Paulo**

**2012**

**IAGO DE CARVALHO BARBEIRO**

**Estruturas coerentes e modelos reduzidos para o escoamento  
ao redor de um cilindro no regime bidimensional periódico**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos

Orientador:  
Prof. Dr. Julio Romano Meneghini

**São Paulo**

**2012**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 30 de abril de 2012

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Barbeiro, Iago de Carvalho**

**Estruturas coerentes e modelos reduzidos para o escoamento ao redor de um cilindro no regime bidimensional periódico / I.C. Barbeiro. -- São Paulo, 2012.**

**59 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Dinâmica dos fluidos 2. Modelos matemáticos 3. Estabilidade de sistemas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.**

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Meneghini, pelo convite, pelo grande apoio e principalmente pela amizade ao longo desses anos. Ao professor Aranha, que me trouxe o desafio desta tese, pelas batalhas compartilhadas na compreensão dos problemas e na busca pelas questões.

À minha mãe e à minha irmã Fernanda queridas, pelo porto acolhedor sempre posto ao viajante quase sempre ausente. Ao meu pai, pela confiança e pelo suporte ao longo desses caminhos. Ao meu irmão Lincoln, companheiro nesses quase vinte e cinco anos, por me tentar ao risco das alegrias simples. Aos pequenos, Bianca e Matheus, pelas brincadeiras e pela alegria.

Aos grandes amigos do 54E: Freitas, Finamore, Furlaneto, Roque Jr., Fred, Luís, Doug e Ricardo, pela amizade infalível e pelos anos de churrascos e risadas.

Aos companheiros do NDF: Roque Jr. (de novo), pelos tantos socorros (não) técnicos; Pedrão, pela camaradagem; Ivan & Monica, pelos passeios e conversas; Gioria, pela prontidão e precisão; Brunoc, pelo primeiro código de *CFD* e pela revisão cuidadosa; Pjabardo, pelo *C++* e pelos brados; Pepe, pelas aulas de boxe; Baliño, também pelos churrascos; Fsaltara, pela primeira orientação; Clóvis, pelas discussões e recomendações; Lauro, pela atenção nas respostas; Fernanda, pela paciência; Ivone, pelo capricho; Stergios, Adson, Franzini, Nemoto, Provasi, Alfredo e Chaves, pelas conversas e cafés.

À Fernanda Canavêz, por ter acreditado no nosso mergulho, pelo afeto e, é claro, pelas vírgulas, gerúndios e outros realocados ou extraídos em prol da leitura deste texto.

Aos amigos de motocicletas: Marcio & Dó, Chico Landi e Tosi, pelos passeios, experiências, socorros e histórias que completaram esses anos com muito mais que 2 rodas.

À FAPESP, pela bolsa de doutorado.

À FINEP e à Petrobras, pelos financiamentos que possibilitaram esta pesquisa.

"En el fondo de un corredor, un no previsto muro me cerró el paso, una remota luz cayó sobre mí. Alcé los ofuscados ojos: en lo vertiginoso, en lo altísimo, vi un círculo de cielo tan azul que pudo parecerme de púrpura. Unos peldaños de metal escalaban el muro. La fatiga me relajaba, pero subí, sólo deteniéndome a veces para torpemente sollozar de felicidad. Fui divisando capiteles y astrágalos, frontones triangulares y bóvedas, confusas pompas del granito y del mármol. Así me fue deparado ascender de la ciega región de negros laberintos entretejidos a la resplandeciente Ciudad."

*Jorge Luis Borges*

## RESUMO

Esta tese trata o escoamento ao redor de um cilindro logo após a sua primeira instabilidade, dentro do seu regime bidimensional periódico. A abordagem é principalmente teórica, passa por experimentos e culmina em uma importante parte numérica que complementa a teoria com evidências e ilustrações.

As principais contribuições são a análise sobre a composição modal da solução dentro do regime periódico e o método desenvolvido para identificar autovetores de uma linearização da equação de Navier-Stokes presentes em uma dada solução. As bases compostas pelos autovetores identificados servem para a projeção da equação de Navier-Stokes e dão a essência dos modelos reduzidos deste estudo.

A aplicação numérica apresentada para  $Re = 60$  traz duas iterações do processo, com duas bases de autovetores de dimensões 12 e 24. Os modelos reduzidos são numericamente estáveis e a sua integração apresenta custo várias ordens mais baixo que o da simulação numérica completa. As séries temporais das coordenadas e as bases de autovetores possibilitam a recomposição do escoamento e a sua comparação com a simulação numérica de referência. A análise de aderência foi baseada nas médias temporais, nos valores de *Strouhal* e na estrutura dos harmônicos.

Ambos modelos reduzidos têm correspondência próxima com o comportamento assintótico do escoamento e a tendência convergente das iterações é clara. As simetrias espaciais e temporais dos harmônicos são facilmente identificadas na estrutura dos modelos, de forma que as bases construídas podem ser entendidas como conjuntos de estruturas coerentes do fenômeno.

**Palavras-chave:** *escoamento ao redor do cilindro, estruturas coerentes, dinâmica linearizada, dinâmica não linear e modelos reduzidos.*

# ABSTRACT

This thesis concerns the flow past a cylinder just after its first bifurcation, within its two-dimensional periodic regime. The approach is mainly theoretical, goes through experiments and is concluded by an important numerical part which complements the theory with evidences and illustrations.

The main contributions are the analysis concerning the modal composition of the solution within the periodic regime and a method to identify eigenvectors of some linearization of the Navier-Stokes equation participating on a given solution. The bases spanned by the identified eigenvectors are employed in the projection of the Navier-Stokes equation and are central to the reduced models of this study.

The numerical results for  $Re = 60$  present two iterations of the process, with two bases of dimensions 12 e 24. The reduced models are numerically stable and their integration is many orders less costly than that of the full simulation. The time series of the modal coordinates and the eigenvectors bases allow the recomposition of the flow and its comparison with the full simulation results. The convergence analysis was based on the time averages, the *Strouhal* number values and the harmonic structure.

Both reduced models have close correspondence with the asymptotic behavior of the flow and the convergent trend of the iterations is clear. The space and time symmetries of the harmonics have a simple representation within the structure of the models, therefore the identified bases can be understood as sets of coherent structures of the phenomenon.

**Keywords:** *flow past a cylinder, coherent structures, linearized dynamics, nonlinear dynamics and reduced models.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura - 2.1 Extraído de Van Dyke (1982): desenvolvimento das bolhas estacionárias. ....	5
Figura - 2.2 Extraído de Prandtl (1934): esteira de <i>von Kármán</i> com $Re = 250$ : (a) câmara fixa ao referencial do cilindro, (b) câmara com a velocidade do escoamento incidente. ....	6
Figura - 2.3 Harmônico zero (média temporal): PIV & SIM. ....	16
Figura - 2.4 Primeiro harmônico: PIV & SIM. ....	17
Figura - 2.5 Segundo harmônico: PIV & SIM. ....	18
Figura - 2.6 Terceiro harmônico: PIV & SIM. ....	18
Figura - 4.1 Espectro do operador discreto linearizado na solução estacionária do escoamento na bifurcação, em $Re = 46.05$ , extraído de Lopez, Meneghini e Saltara (2008). ....	30
Figura - 6.1 Malha computacional com 1386 vértices, 4104 arestas e 2718 elementos. ....	45
Figura - 6.2 Solução estacionária para $Re = 60$ : contornos de magnitude de velocidade e linhas de corrente definindo as bolhas recirculantes. ....	45
Figura - 6.3 $\mathbf{U}(t^*) = \mathbf{U}_s + \mathbf{U}'(t^*)$ : contornos de magnitude de velocidade. ....	46
Figura - 6.4 Espectro reduzido para $Re = 60$ com 12 autovalores, sendo 6 associados a autovetores simétricos (●) e mais 6 associados a autovetores anti-simétricos (○). ....	47

Figura - 6.5	Espectro reduzido para $Re = 60$ com 24 autovalores, sendo 12 associados a autovetores simétricos ( $\bullet$ ) e mais 12 associados a autovetores anti-simétricos ( $\circ$ ). . . . .	48
Figura - 6.6	Linhas de corrente com as bolhas recirculantes da solução estacionária, em laranja, e da média temporal da simulação de referência, em branco. . . . .	49
Figura - 6.7	Médias temporais das linhas de corrente com as bolhas recirculantes da simulação de referência, em branco, do primeiro modelo reduzido ( $n = 12$ ), em amarelo, e do segundo modelo reduzido, em vermelho ( $n = 24$ ). . . . .	50
Figura - 6.8	Identificação dos harmônicos a que pertencem os autovetores. . . . .	51
Figura - 6.9	Espectro reduzido para $Re = 60$ , o mesmo da figura 6.4, agora identificando a qual dos harmônicos pertence cada modo. . . . .	52

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

