

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica

EMISSÃO DE VÓRTICES EM ESCOAMENTO LAMINAR
AO REDOR DE CILINDROS

Autor: **Guilherme Coppi Durante**

Orientador: **Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa**

Campinas, Novembro de 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica

EMISSÃO DE VÓRTICES EM ESCOAMENTO LAMINAR AO REDOR DE CILINDROS

Autor: **Guilherme Coppi Durante**

Orientador: **Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa**

Curso: Engenharia Mecânica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Campinas, 2013

S.P. – Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Maria de Lourdes Coppi Durante e Francisco Durante, aos meus irmãos Beatriz Coppi Durante e Vítor Coppi Durante e aos meus avós Dirce de Almeida Coppi e Miguel Coppi (*in memoriam*) pelo apoio incondicional às minhas decisões durante os anos de faculdade e por acreditarem em meu potencial.

À minha namorada, amiga e confidente Larissa M. Gaspar de Souza por todo o suporte em todas as esferas, sejam elas emocionais, psicológicas, espirituais e tantas outras, que me ajuda a contrabalancear as loucuras da vida.

Aos meus colegas de faculdade que sempre me acompanharam, apoiaram e compartilharam tantas boas experiências durante todo o processo acadêmico. Em especial à Mariana Gerardi de Mello, Antonio Ruby Barreto, Gustavo Lourenço Lopes e Rodrigo Dias Panza pelo companheirismo e amizade verdadeira.

Dedico ainda a todos os meus amigos de longa data com quem eu sempre pude contar e que me acompanharam e apoiaram durante a minha graduação.

Agradecimentos

Presto a minha homenagem às seguintes pessoas que contribuíram de forma decisiva para a conclusão deste trabalho:

Ao Prof. Doutor Eugênio Spanó Rosa, pelos importantes direcionamentos passados em diversos momentos que se iniciaram antes mesmo do projeto de graduação, em sua disciplina de simulação computacional. Sem sua mão diretora e seu apoio acadêmico, este nunca teria sido possível.

Aos meus pais, irmãos e avós pelo apoio, incentivo durante a elaboração deste trabalho.

À minha namorada, pela paciência, compreensão e carinho.

Aos meus amigos e companheiros de morada, Antonio Ruby Barreto e Rodrigo Dias Panza, pela ajuda, dicas e sugestões durante a elaboração deste trabalho, mas também pela convivência agradável e pelos bons momentos de descontração e discussões filosóficas.

Índice

	Resumo	1
	Lista de Figuras	2
	Lista de Tabelas	3
	Nomenclatura	4
	Abreviações e Siglas	4
Capítulo 1	Introdução	5
Capítulo 2	Revisão Bibliográfica	7
2.1.	O Desprendimento de Vórtices	7
2.2.	Forças Atuantes em um Corpo Submerso	10
2.3	A Frequência de Desprendimento de Vórtices – Strouhal	12
Capítulo 3	Procedimento Numérico	17
3.1.	Introdução ao Modelo	17
3.2.	Características do Modelo Computacional	20
3.3.	Malha com Potência (Power)	23
3.4	Aquisição de Resultados	24
Capítulo 4	Resultados e Discussões	26
4.1	Campos de Pressão e Velocidade	27
4.2	Análise de Linhas de Corrente	30
4.3	Coeficiente de Arrasto e o Número de Strouhal	35
4.4	Considerações Gerais	42
Capítulo 5	Conclusões	43
	Referências Bibliográficas	44

Resumo

DURANTE, Guilherme Coppi, “Emissão de vórtices em escoamento laminar ao redor de cilindros”, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Trabalho de Conclusão de Curso, (2013), 44pp.

No presente trabalho, explorar-se-á a formação e desprendimento de vórtices decorrentes de escoamentos ao redor de dois perfis de cilindro, sendo eles quadrado e circular. Tal estudo foi feito com auxílio da ferramenta de simulação computacional em fluidodinâmica Phoenics CFD. Considera-se um escoamento adiabático e bidimensional perpendicular à superfície de ataque, e parâmetros de malha cartesiana suficientemente finos para captar os fenômenos de surgimento e evolução dos vórtices. O escoamento é laminar e quatro valores diferentes de Reynolds foram estudados (100, 300, 500 e 1000). Avaliaram-se os resultados de forças sobre os cilindros de forma adimensional através dos coeficientes de arrasto e sustentação. Além destes, sendo o fenômeno periódico, a avaliação da frequência de formação de vórtices, bem como do número adimensional associado, o número de Strouhal (St), se fazem indispensáveis.

Palavras Chave: CFD, Vortex shedding, esteira de vórtices, número de Strouhal, perfil circular, perfil quadrado

Lista de Figuras

Figura 1 - Formação e separação da camada-limite sobre um cilindro circular.....	8
Figura 2 - Perfil de velocidades associado à separação sobre um cilindro circular.....	9
Figura 3 - Ângulos de separação das camadas-limite laminar e turbulenta	9
Figura 4 - Coeficientes de arrasto para cilindro e esfera em escoamento cruzado	11
Figura 5 - Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular.....	13
Figura 6 - Linhas de corrente sobre perfil quadrado para diferentes Reynolds	13
Figura 7 - Número de Strouhal versus Reynolds para perfil circular	14
Figura 8 - Coeficiente de arrasto médio versus Reynolds para perfil circular.....	15
Figura 9 - Número de Strouhal versus Reynolds para perfil quadrado	15
Figura 10 - Coeficiente de arrasto médio versus Reynolds para perfil quadrado	16
Figura 11 - Domínio do sistema.....	18
Figura 12 - Modelo de malha para o perfil quadrado	19
Figura 13 - Tela de resultado de simulação.....	22
Figura 14 - Detalhe de uma malha com potência para o perfil quadrado	24
Figura 15 - Campo de pressão para perfil circular, Re 300	27
Figura 16 - Campo de velocidades para perfil circular, Re 300	29
Figura 17 - Campo de pressão para perfil quadrado, Re 300.....	29
Figura 18 - Campo de velocidades para perfil quadrado, Re 300	30
Figura 19 - Linhas de corrente em diferentes instantes para perfil circular, Re 300	31
Figura 20 - Linhas de corrente em diferentes instantes para perfil quadrado, Re 300	31
Figura 21 - Linhas de corrente em quatro faixas de Re, $t \approx 12s$, perfil circular.....	33
Figura 22 - Linhas de corrente em quatro faixas de Re, $t \approx 12s$, perfil quadrado	34
Figura 23 - Desprendimento do primeiro vórtice em $t \approx 20s$, perfil quadrado	34
Figura 24 - Resultados de CD e CL para perfil circular e quadrado, Re 100.....	35
Figura 25 - Resultados de CD e CL para perfil circular e quadrado, Re 300.....	37
Figura 26 - Resultados de CD e CL para perfil circular e quadrado, Re 500.....	38
Figura 27 - Resultados de CD e CL para perfil circular e quadrado, Re 1000.....	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Distribuição de volumes na malha para o perfil quadrado	19
Tabela 2 - Propriedades do fluido para cada perfil	20
Tabela 3 - Parâmetros numéricos de simulação	23
Tabela 4 - Resumo de resultados de CD e St, Re 100.....	36
Tabela 5 - Resumo de resultados de CD e St, Re 300.....	38
Tabela 6 - Distribuição de volumes na malha para o perfil quadrado, Re 500_2	39
Tabela 7 - Resumo de resultados de CD e St, Re 500.....	40
Tabela 8 - Resumo de resultados de CD e St, Re 1000.....	41
Tabela 9 - Resumo de resultados de CD e St, todos os Re simulados	41

Nomenclatura

Letras Latinas

C_D	Coeficiente de arrasto	-
C_L	Coeficiente de sustentação/força transversal	-
D	Diâmetro	[m]
F_D	Força de arrasto	[N]
F_L	Força de sustentação/transversal	[N]
f_v	Frequência de desprendimento de vórtices	[Hz]
L	Comprimento do lado do quadrado	[m]
NX	Número de elementos de volume na direção X	-
NY	Número de elementos de volume na direção Y	-
u_∞	Velocidade do fluido na corrente livre	[m/s]
V	Velocidade a montante	[m/s]

Letras Gregas

θ	Ângulo de separação da camada-limite	[°]
μ	Viscosidade absoluta	[kg/ms]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

Abreviações

Re	Número de Reynolds
St	Número de Strouhal

Siglas

CFD	Computational Fluid Dynamics
VIV	Vibração Induzida por Vórtices

Capítulo 1

Introdução

Qualquer corpo cilíndrico imerso em um escoamento de fluido pode estar sujeito a um fenômeno de formação e de desprendimento de vórtices. As condições para esta formação estão associadas principalmente à velocidade do fluido, ao ângulo de incidência sobre o corpo, à viscosidade cinemática e ao próprio perfil do corpo. A formação dos primeiros vórtices ocorre a partir de certo número de Reynolds laminar e continua mesmo em regime turbulento, dependendo das condições supracitadas. Este fenômeno de esteira de vórtices, ou *vortex shedding*, tem característica periódica onde os turbilhões que se formam atrás do corpo desprendem-se e continuam a percorrer o fluxo a jusante do mesmo. A formação desses turbilhões e dos seus desprendimentos periódicos cria regiões alternadas de baixa pressão, o que implica alterações no equilíbrio de forças sobre o corpo, podendo assim criar efeitos dinâmicos e de vibrações sobre o sistema. Por estarem diretamente associados ao fenômeno de fadiga mecânica, esses efeitos de vibração são frequentemente considerados nefastos para o sistema.

O efeito de vibração induzida sobre o sistema é conhecido como VIV (Vibração Induzida por Vórtices) e é resultado da variação periódica das componentes de força no cilindro, isto é, forças de arrasto (F_D) e forças de sustentação/transversal (F_L), esta última, sendo a maior responsável pelos fenômenos de vibração. Casos práticos e estruturais como vigas de construção, bases de plataformas petrolíferas, *risers* submarinos, prédios, pontes, postes e até mesmo antenas de veículos podem servir como ilustração de componentes que podem estar submetidos a este fenômeno e podem ressaltar a importância do estudo e da compreensão deste.

Da interpretação quantitativa deste fenômeno, podem-se retirar parâmetros importantes sobre o *vortex shedding*. Além do estudo de forças e da distribuição de pressão sobre o corpo, formalizou-se um parâmetro adimensional diretamente relacionado à emissão de vórtices. Este número, conhecido como número de Strouhal (St) estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de vórtices na esteira, a condição geométrica e a velocidade do escoamento, podendo, assim, ser relacionado ao número de Reynolds (Re). Além destes, cabe ressaltar o conceito de coeficiente de arrasto (C_D) e

sustentação (C_L), que estabelecem importantes relações entre as forças oscilatórias atuantes do corpo e as propriedades fluidodinâmicas e geométricas do sistema. A normalização dos resultados, portanto, é baseada nesses grupos adimensionais.

Com o uso da ferramenta de CFD é possível simular diferentes condições de escoamento em dois perfis de cilindro diferentes. O CFD permite a aplicação de métodos numéricos na resolução de equações fundamentais da mecânica dos fluidos, entretanto, a compreensão completa do problema conta com o auxílio de dados obtidos experimentalmente em laboratórios. Tanto o conhecimento da ferramenta computacional e seus modos de funcionamento quanto o embasamento teórico são essenciais para a interpretação dos resultados.

Estudar-se-ão os efeitos da esteira de vórtices em quatro condições distintas de escoamento ao redor de dois perfis de cilindro diferentes. Procurou-se estabelecer relações entre o tipo de perfil do corpo cilíndrico, as propriedades fluidodinâmicas do escoamento, a frequência de desprendimento de vórtices na esteira e as forças atuantes sobre o corpo. Para tanto, dois modelos de corpos foram criados na ferramenta de volumes finitos Phoenix, um com perfil circular e outro com perfil quadrado. Para cada perfil estabeleceu-se também uma malha numérica específica, sendo esta uma das chaves para os bons resultados de simulação. O fluido de simulação teve suas propriedades definidas de forma conveniente para este estudo e quatro valores diferentes de Reynolds laminares foram estudados.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 O Desprendimento de Vórtices

A formação de vórtice a jusante de um cilindro imerso em um escoamento depende fortemente de algumas propriedades geométricas e fluidodinâmicas. O número adimensional de Reynolds, que estabelece uma razão entre forças de inércia e forças viscosas, é um dos mais importantes fatores. Como definido por Osborne Reynolds, em termos escalares:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

Onde, V é a velocidade média do fluido, L é uma dimensão característica e ν é a viscosidade cinemática do fluido. A interpretação do número de Reynolds para escoamentos externos ao redor de corpos cilíndricos estabelece alguns limites. Estes limites separam os Reynolds em duas faixas principais, sendo elas: laminar e turbulenta. Segundo Fox (2006, p. 34):

“Um escoamento laminar é aquele no qual as partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou lâminas; um escoamento turbulento é aquele no qual as partículas fluidas rapidamente se misturam, enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades.”

Para escoamentos ao redor de cilindros na direção normal ao eixo, o limite de transição entre laminar e turbulento se dá em $Re \geq 2 \times 10^5$. Neste tipo de escoamento, o fluido da corrente livre é levado ao repouso no ponto de estagnação frontal, resultando assim em um aumento de pressão, como pode ser visto na Figura 1. A partir deste ponto, a

pressão diminui conforme o fluido avança ao redor do cilindro, portanto, a camada-limite¹ se desenvolve sob a influência de um gradiente de pressão favorável ($dp/dx < 0$). Em um certo ponto ao longo da superfície, a pressão atinge um mínimo e o desenvolvimento da camada-limite segue na presença de um gradiente de pressão adverso ($dp/dx > 0$).

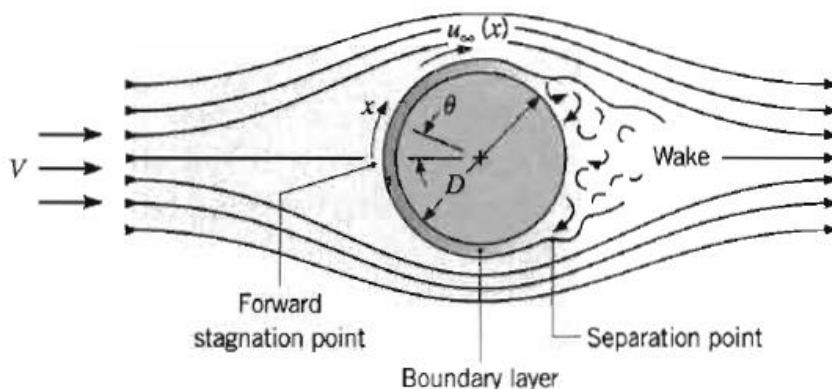


Figura 1 - Formação e separação da camada-limite sobre um cilindro circular.
(Incropera, 2006)

O mesmo fenômeno, sendo observado do contexto de velocidades, apresenta um comportamento oposto. A partir do ponto de estagnação, aonde a velocidade do fluido na corrente livre $u_\infty = 0$, o fluido acelera devido ao gradiente de pressão favorável ($du_\infty/dx > 0$ quando $dp/dx < 0$), atinge a velocidade máxima em $dp/dx = 0$, e a partir deste ponto desacelera devido ao gradiente de pressão adverso ($du_\infty/dx < 0$ quando $dp/dx < 0$), como pode ser observado na Figura 2. Com este fenômeno de desaceleração do fluido, o gradiente de velocidade na superfície do sólido acaba se tornando igual a zero. Nesta região, conhecida como ponto de separação, o fluido próximo à superfície não possui momento suficiente para superar o gradiente de pressão adverso e o movimento a jusante é impossibilitado. Uma vez que o fluido, ao chegar continuamente a esse ponto, obstrui o escoamento na direção inversa, tem que haver a separação da camada-limite. Essa é uma condição aonde a camada-limite se descola e uma esteira é formada a jusante do corpo. Este escoamento é caracterizado pela formação de vórtices.

¹ Camada-limite: região próxima ao corpo aonde efeitos de viscosidade (e logo o atrito) são consideráveis. Nela, a velocidade aumenta rapidamente de zero (na superfície) até o valor da corrente livre (Fox, 2006)

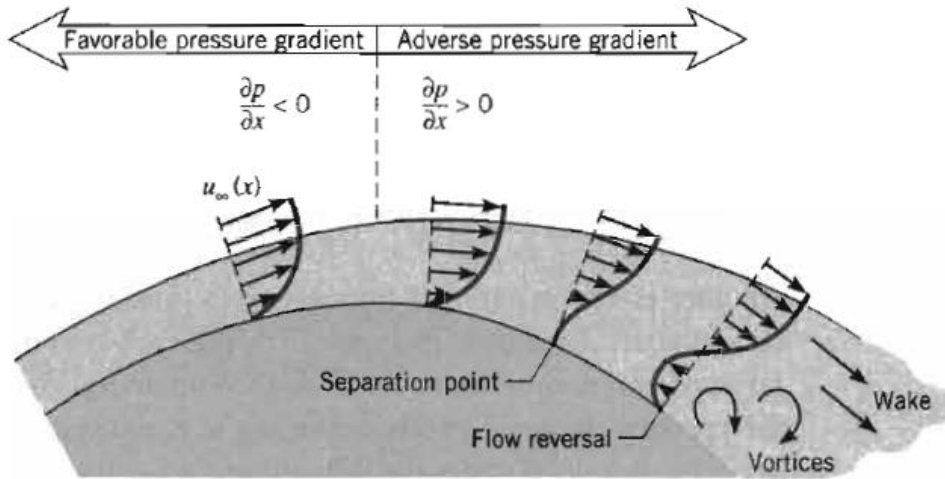


Figura 2 - Perfil de velocidades associado à separação sobre um cilindro circular
(Incropera, 2006)

Como já foi mencionado, o escoamento tende a transitar de regime laminar para turbulento em um valor de Reynolds da ordem de 2×10^5 . Sendo o momento do fluido em camada-limite turbulenta maior do que o de um fluido em camada-limite laminar, é natural esperar que o descolamento seja retardado naquela. Em termos quantitativos, para $Re \leq 2 \times 10^5$ o ângulo de separação θ , que é medido como mostrado na Figura 3, é da ordem de 80° ; para $Re \geq 2 \times 10^5$, o ângulo é da ordem de 140° .

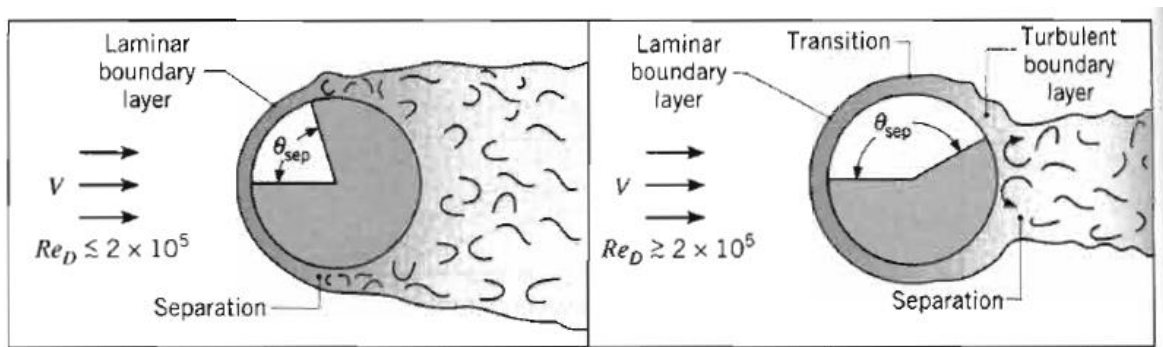


Figura 3 - Ângulos de separação das camadas-limite laminar e turbulenta
(Incropera, 2006)

2.2 Forças Atuantes em um Corpo Submerso

Do movimento relativo entre o corpo sólido e o fluido viscoso que o envolve, deriva uma força resultante. A magnitude e o sentido desta força dependem de vários fatores, dentre eles, a velocidade relativa, a geometria do sólido, as propriedades do fluido e da superfície do sólido. Tais forças podem surgir pelos esforços tangenciais à superfície, principalmente causados pelos efeitos viscosos, e pelos esforços normais, principalmente provocados pelos efeitos de variação de pressão ao longo da superfície. No presente estudo, consideramos o corpo sólido de superfície, logo, a força resultante será, quase na totalidade, provocada pelos efeitos de variação de pressão. Em geral, esta força resultante é decomposta em Força de arrasto (F_D) e Força de sustentação (F_L).

A *força de arrasto* é a componente da força que atua paralelamente à direção do movimento relativo fluido/sólido. Esta provém da soma do arrasto de atrito e do arrasto de pressão. No caso do escoamento ao redor de um cilindro, ambas contribuem para o arrasto total. A partir da aplicação do teorema de Pi de Buckingham², pode-se obter as seguintes relações:

$$\frac{F_D}{\rho V^2 A} = f\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right) = f(Re)$$

Onde A é a área da seção transversal. Desta relação estabeleceu-se o adimensional conhecido como *coeficiente de arrasto* C_D :

$$C_D \equiv \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = f(Re)$$

A figura 4 apresenta o gráfico de coeficiente de arrasto em função do Reynolds para dois corpos, um cilindro e uma esfera.

² O teorema Pi de Buckingham é um enunciado da relação entre uma função expressa em termos de parâmetros dimensionais e uma função correlata expressa em termos de parâmetros adimensionais. (FOX; 2006)

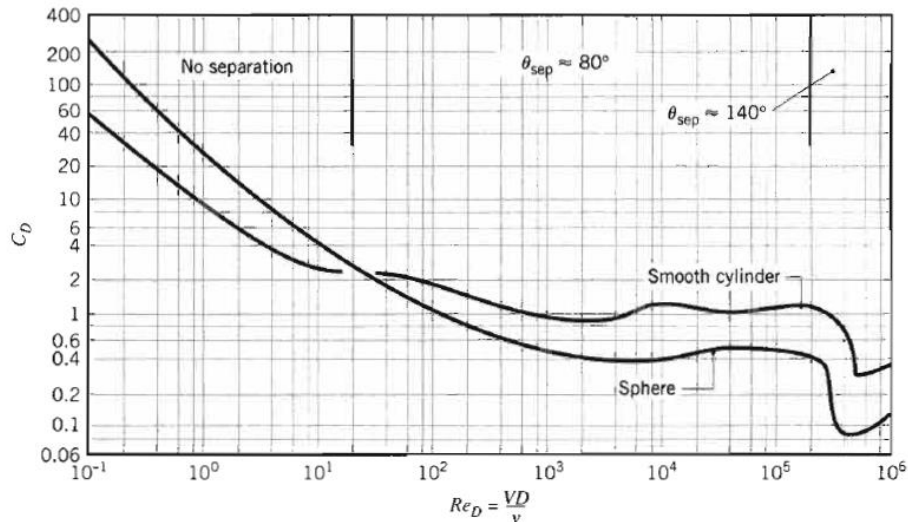


Figura 4 - Coeficientes de arrasto para cilindro e esfera em escoamento cruzado (Incropera, 2006)

A *força de sustentação* é definida como a componente perpendicular ao movimento do fluido. De forma análoga, pode-se definir a relação entre a força de sustentação (F_L) e o coeficiente de sustentação (C_L) da forma:

$$C_L \equiv \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_p} = f(Re)$$

Onde A_p é a área projetada máxima.

Em muitos casos de escoamento de fluido ao redor de um corpo, a força mais significativa atuante é a força de arrasto. Em situações onde se pretende estudar efeitos de vibração induzidas por vórtice, torna-se essencial o estudo das forças de sustentação também. O desprendimento de vórtices causa uma força de sustentação oscilatória que em casos extremos pode causar sérias vibrações, podendo causar tensões elevadas à estrutura. Uma maneira de reduzir este fenômeno é a inclusão de aletas ou pela aplicação de elementos de rugosidade, quebrando assim, a simetria do cilindro e estabilizando o escoamento ao seu redor. Notar-se-á, com a interpretação dos resultados, que as oscilações de forças de arrasto e, conseqüentemente, de coeficientes de arrasto são de amplitudes muito menores do que as oscilações das forças/coeficientes de sustentação.

2.3 A Frequência de Desprendimento de Vórtices – Strouhal

Por se tratar de um fenômeno periódico, a interpretação temporal torna-se indispensável. Tal interpretação dá-se através da obtenção da frequência de despreendimento de vórtices (f_v), que é expressa em vórtices por segundo, ou, hertz (Hz). Esta frequência pode ser determinada por três variáveis: velocidade de escoamento do fluido (V), um comprimento característico (L , ou D para cilindros de perfil circular) e a viscosidade cinemática do fluido (ν). Através da aplicação do teorema de Pi de Buckingham, pode-se encontrar a relação entre dois grupos adimensionais:

$$St = f(Re) = \frac{f_v L}{V}$$

Onde St representa o número adimensional de Strouhal. Este, mais o número de Reynolds, podem ser interpretados como uma frequência e uma velocidade adimensionais, respectivamente. Na literatura é comum encontrar outras formas para a mesma relação entre ambos, como:

$$\frac{f_v L^2}{\nu} = f(Re)$$

Ou ainda,

$$\frac{U}{f_v L} = f(Re)$$

Em função do número de Reynolds, o regime de despreendimento de vórtices varia. Começando em Reynolds muito baixos, aonde não se forma vórtice, até Reynolds muito altos aonde tanto a esteira de vórtices quanto a camada limite são turbulentas, a figura 5 faz um apanhado dos principais regimes para escoamento ao redor de um perfil circular. É interessante destacar a evolução da esteira que passa por uma zona de instabilidade para Reynolds entre 150 e 300, esta zona corresponde a uma esteira turbulenta com uma camada limite laminar. Logo em seguida, a figura 6 apresenta a evolução de regimes para um perfil retangular.

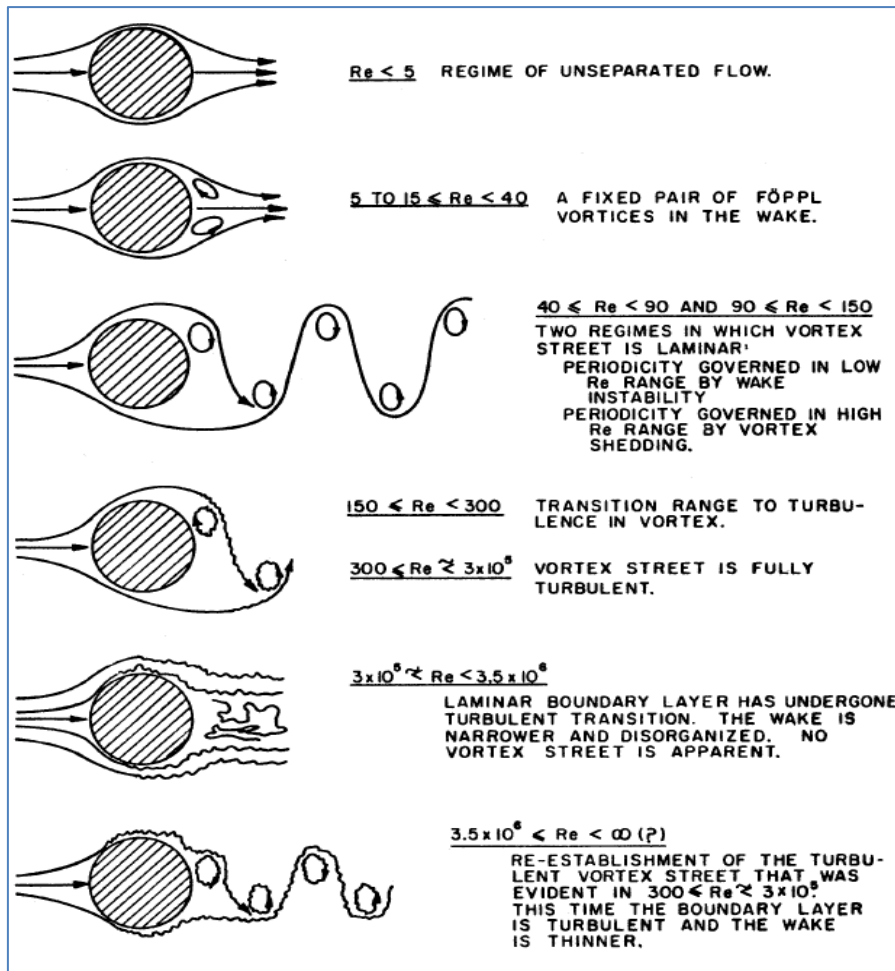


Figura 5 - Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular (Lienhard, 1966)

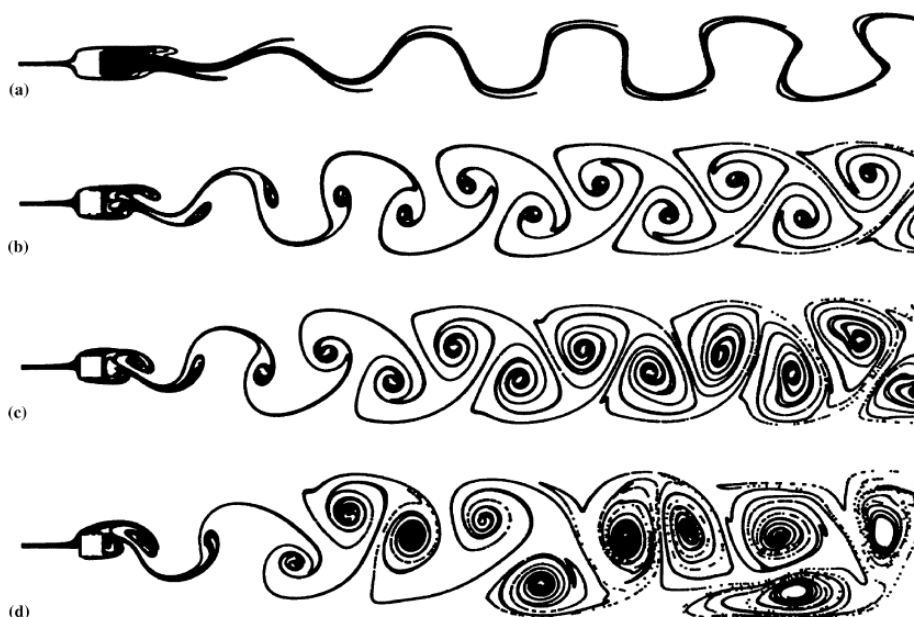


Figura 6 - Linhas de corrente sobre perfil quadrado para diferentes Reynolds (a) $Re = 60$; (b) $Re = 100$; (c) $Re = 200$; (d) $Re = 300$. (Breuer, 2000)

Em experimentos realizados por Lienhard (1966) para escoamentos ao redor de perfis circulares, conseguiu-se obter relações entre o número de Strouhal (adimensional de frequência) e o número de Reynolds (figura 7) e entre coeficientes de arrasto e o número de Reynolds (figura 8). Para o caso de um escoamento ao redor de um cilindro de perfil quadrado, autores como Okajima (1982), Norberg (1993) e Sohankar (1995, 1998) obtiveram resultados de simulação promissores e traçaram relações entre Strouhal e coeficiente de arrasto versus Reynolds. Seus resultados foram compilados nas figura 9 e 10.

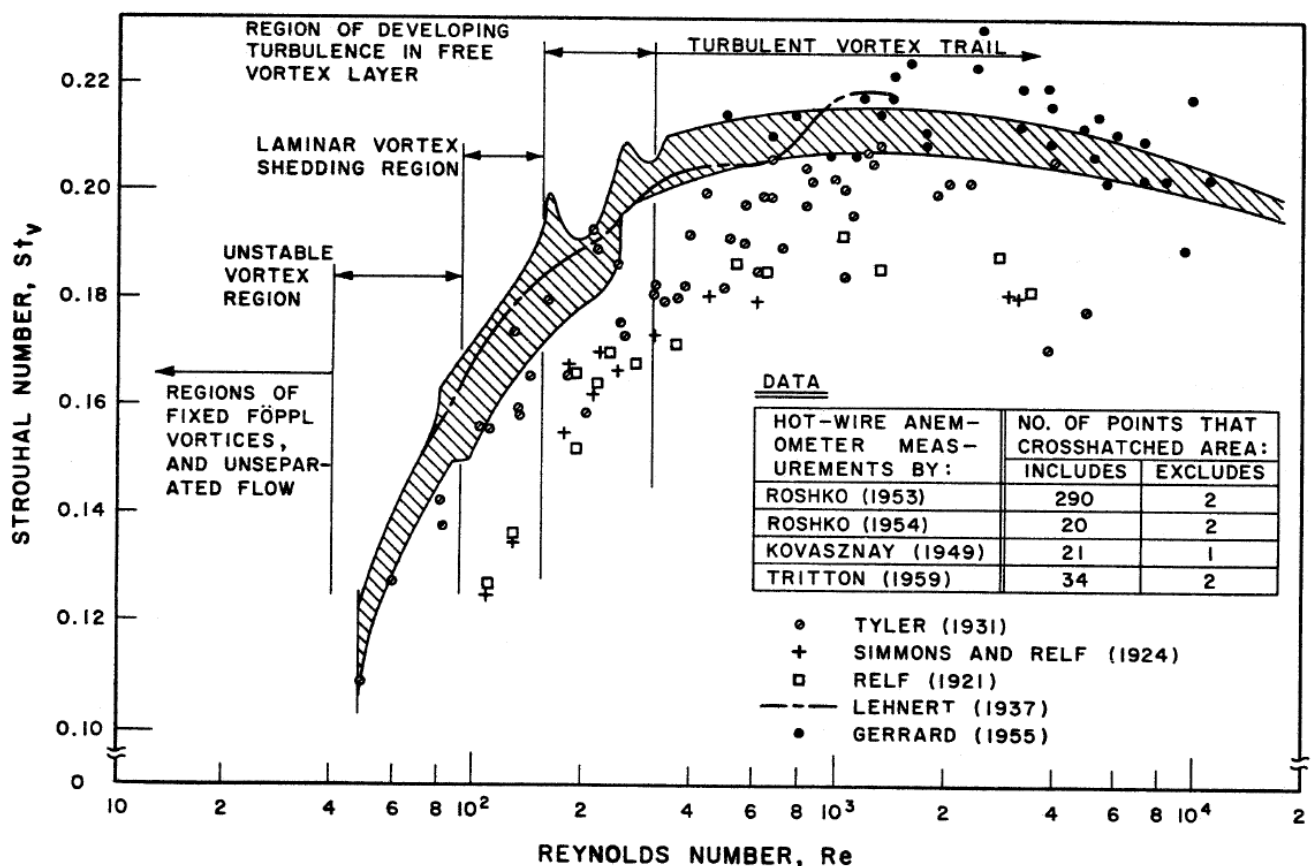


Figura 7 - Número de Strouhal versus Reynolds para perfil circular (Lienhard, 1966)

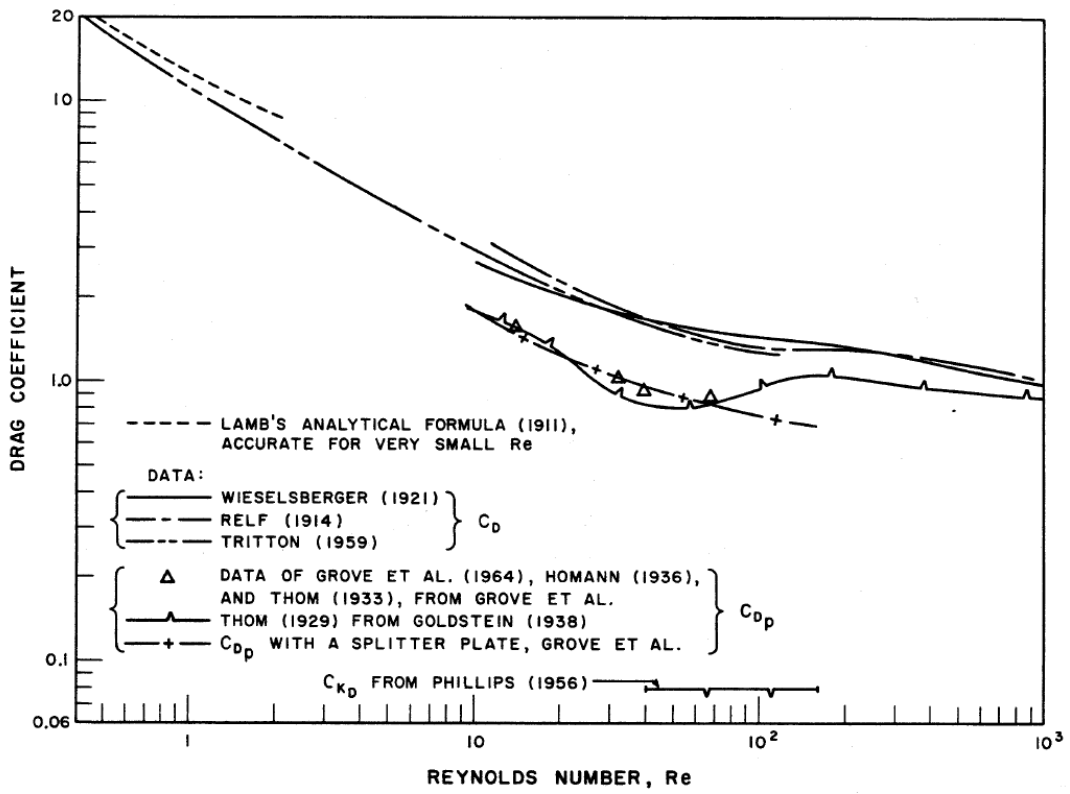


Figura 8 - Coeficiente de arrasto médio versus Reynolds para perfil circular (Lienhard, 1966)

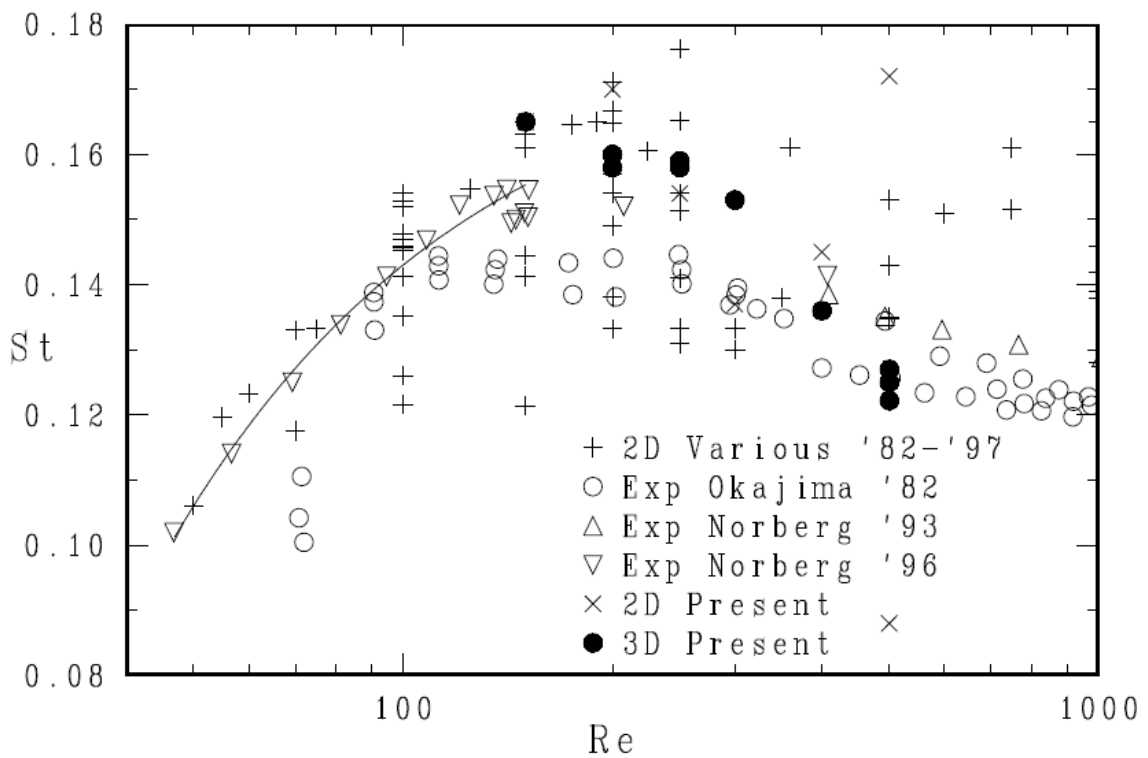


Figura 9 - Número de Strouhal versus Reynolds para perfil quadrado (Sohankar, 1998)

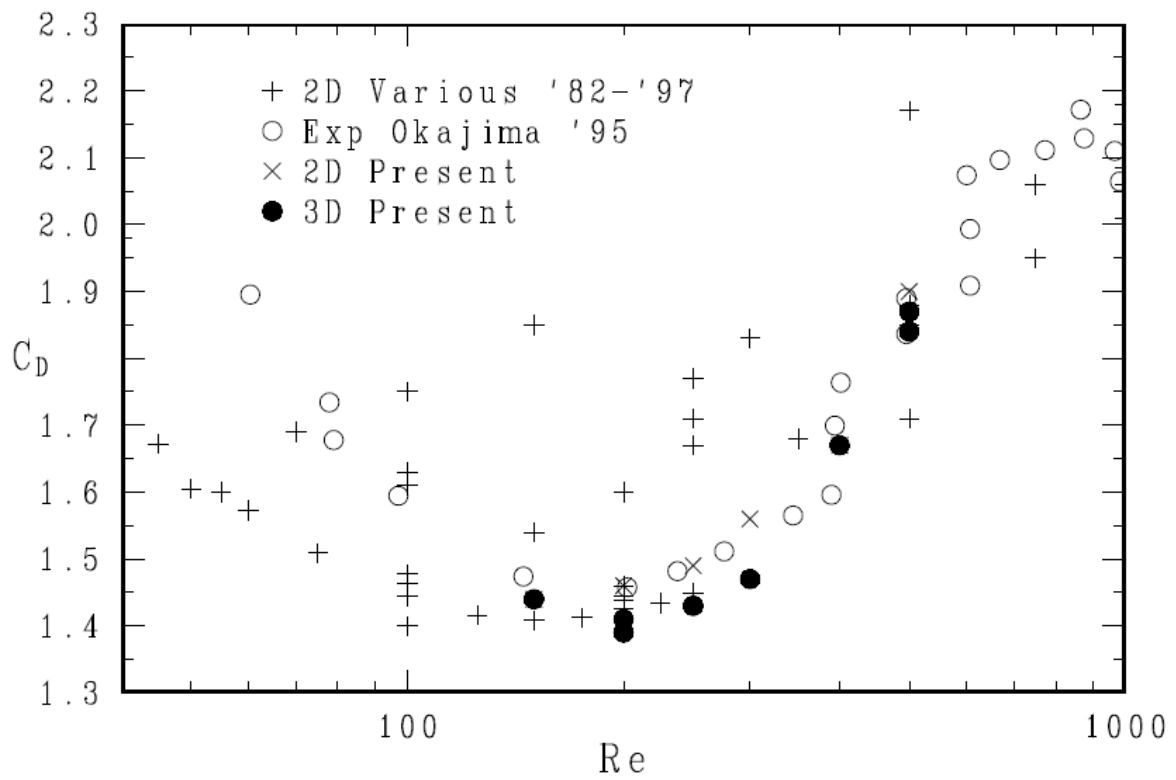


Figura 10 - Coeficiente de arrasto médio versus Reynolds para perfil quadrado (Sohankar, 1998)

Capítulo 3

Procedimento Numérico

3.1 Introdução ao Modelo

A simulação numérica foi possível através da utilização do software de volumes finitos PHOENICS® 2009. Este software permite a simulação, principalmente, de fenômenos físicos envolvendo escoamentos e transferências de calor. Apesar da alta capacidade de interpretação de problemas complexos, seu princípio de funcionamento é bem simples. O espaço sendo simulado é dividido em pequenos volumes e para cada volume calculam-se as equações básicas da fluidodinâmica e termodinâmica.

A qualidade dos resultados está diretamente associada às condições e considerações que foram adotadas nas etapas pré-simulação, por tal motivo que a preparação da simulação e a compreensão prévia do fenômeno físico tornam-se partes fundamentais do processo como um todo.

O fenômeno de esteira de vórtices pode ser considerado um problema bidimensional, portanto, adotou-se um sistema de coordenadas cartesiano tridimensional com dimensão de profundidade unicelular. A figura 11 detalha cada um dos elementos utilizados para a simulação e o posicionamento do sistema de coordenadas.

Por motivos de simplificação de cálculo computacional, o plano de estudo escolhido foi o XY, aonde o escoamento ocorre no sentido positivo do eixo X. A direção Z do sistema de coordenadas representa a dimensão unicelular. Em termos gerais, o domínio é composto por três elementos básicos, sendo eles: um “inlet” (ou entrada) aonde é determinada a velocidade do fluido, representando o escoamento a montante; três “outlets” (ou saídas) nas paredes leste, norte e sul e o cilindro (perfil circular ou quadrado) como obstáculo. Neste presente estudo, estabeleceu-se como dimensões: $D = 0,6$ m (perfil circular) e $L = 0,4$ m (perfil quadrado). Para tentar minimizar os efeitos das paredes de *outlet* nos resultados de simulação, estabeleceu-se uma velocidade tangencial (direção X) a elas de mesma intensidade que aquela do *inlet*, ou seja, um fluido escoando na superfície do *outlet* para garantir a continuidade de escoamento do domínio.

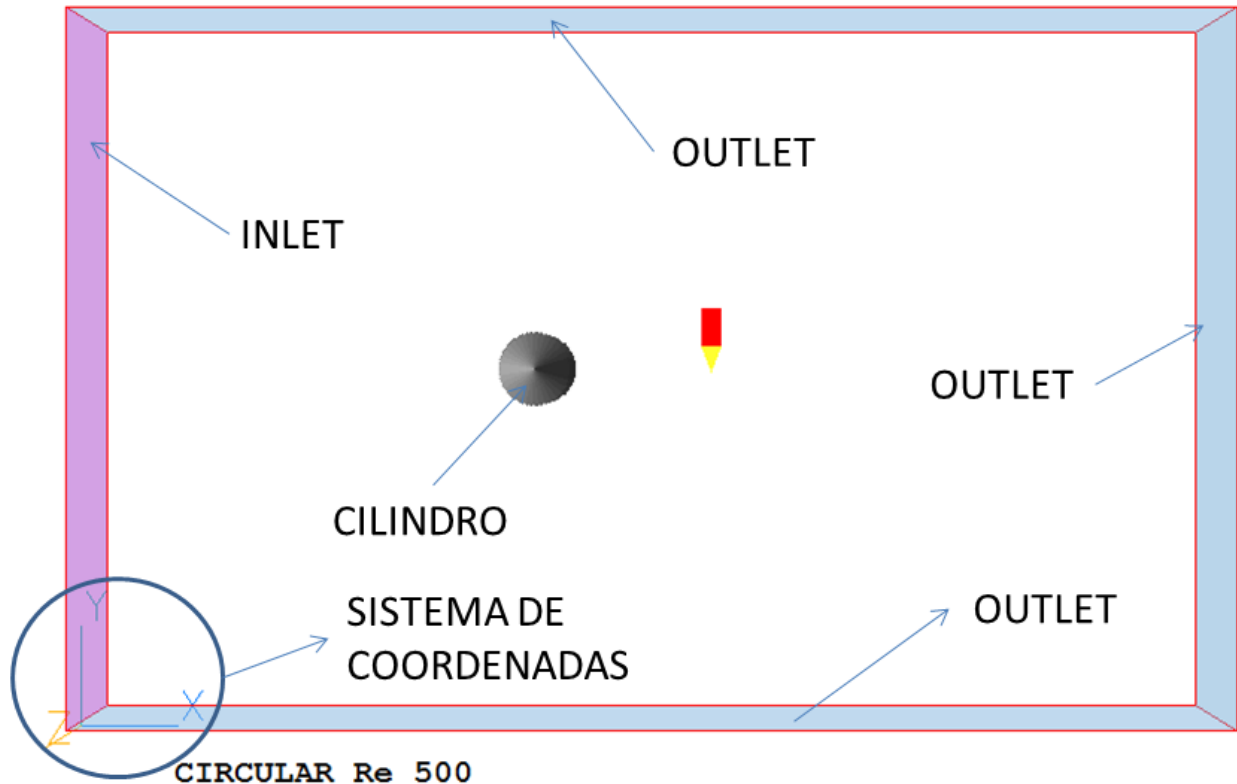


Figura 11 - Domínio do sistema

Com o intuito de não influenciar a formação e desenvolvimento da esteira de vórtices, e tendo em mente o trabalho de Almeida (2008), o tamanho do domínio foi escolhido como sendo, $16D \times 10D$ para o perfil circular, e $25L \times 15L$, para o perfil quadrado. Tais números culminaram em um domínio de tamanho $(X, Y) = (6, 10)$ m. O posicionamento do cilindro leva em conta o tamanho do domínio necessário à jusante para realizar a observação do fenômeno, sendo assim, no caso do perfil circular o centro do cilindro localiza-se na posição $(X, Y) = (4, 3)$ m, e no caso do quadrado, seu centro localiza-se em $(X, Y) = (3, 3)$ m.

O número de volumes utilizados na simulação varia entre os dois perfis, no caso do perfil quadrado, uma atenção maior se faz necessária para a região que segue exatamente na rasteira do objeto. Para o perfil circular, utilizou-se uma malha com $(NX, NY) = (167, 100)$ distribuídos uniformemente ao longo do domínio. Para o perfil quadrado, utilizou-se a malha de $(NX, NY) = (165, 95)$, mas distribuídos não uniformemente entre as regiões, esta distribuição foi resumida na tabela 1 e está ilustrada na figura 12. A escolha do número de

volumes foi feita com base na experiência empírica adquirida em uma série de diferentes simulações e em alguns dados encontrados na literatura.

Foram estudados um total de quatro velocidades diferentes para cada perfil, resultando um total de 8 casos simulados. Os Reynolds referentes às diferentes velocidades são 100, 300, 500 e 1000, tanto para o perfil circular quanto para o perfil quadrado.

Tabela 1 - Distribuição de volumes na malha para o perfil quadrado

Região	NX	NY
1	50	40
2	15	15
3	100	40

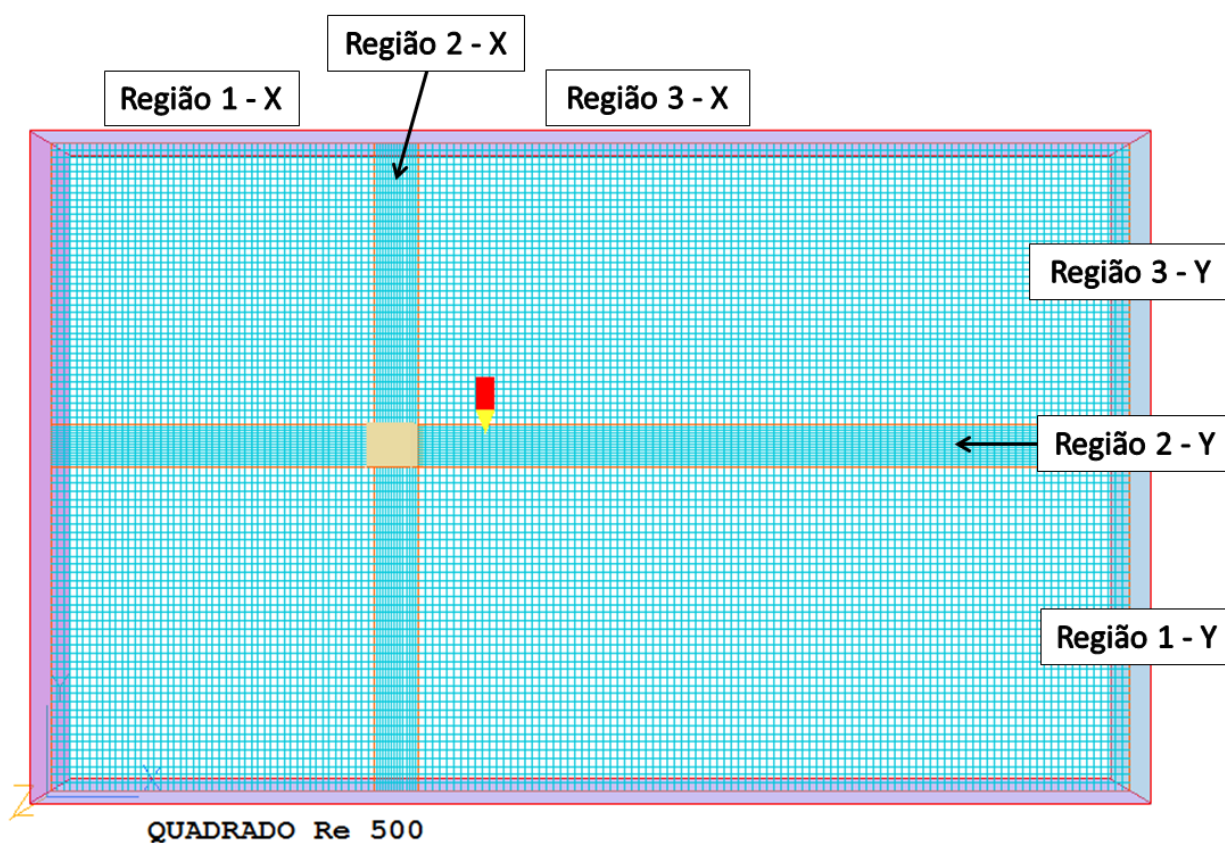


Figura 12 - Modelo de malha para o perfil quadrado

3.2 Características do Modelo Computacional

Com o intuito de estudar unicamente os efeitos causados pela esteira de vórtices, desconsideraram-se as forças provenientes de atrito, para tanto, o corpo cilindro utilizado nas simulações foi considerado de superfície lisa, ou seja, sem rugosidade superficial. O sistema de referência utilizado é inercial, desta maneira, conseguiu-se acompanhar a movimentação dos vórtices desprendidos.

Em termos de configurações numéricas, utilizou-se o modelo laminar e o método QUICK (“*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics*”) de diferenciação, que se baseia em uma interpolação quadrática do intervalo para o cálculo da equação de convecção-difusão. Este método permite cálculos com baixa influência na difusividade, alguns métodos numéricos acabam por introduzir um fenômeno artificial aos resultados conhecido como viscosidade numérica. Este aumento artificial da viscosidade provoca um aumento na difusividade e conseqüentemente, uma maior propagação dos resultados de uma célula para outra, incluindo dos erros. Isso faz com que, no caso deste estudo, o vórtice acabe sendo alongado e propagado para as células adjacentes. O resultado extremo deste efeito seria a não formação de vórtices, mas sim a de uma esteira contínua.

Para cada perfil, estabeleceram-se propriedades diferentes para o fluido de simulação, um resumo das propriedades está explicitado na tabela 2. A viscosidade do fluido para o perfil quadrado deve ser menor pelo mesmo motivo de redução de difusividade que foi comentado logo acima. Uma viscosidade muito alta nesta simulação não permitiria a formação dos vórtices.

Tabela 2 - Propriedades do fluido para cada perfil

Perfil	Fluido	Densidade (kg/m³)	Viscosidade (Pa.s)
Circular	Fluido 1	1	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Quadrado	Fluido 2	1,189	$1,5 \cdot 10^{-3}$

Por se tratar de um problema de características periódicas, foi necessário abordá-lo no como um problema transiente. Para tanto, foi necessário estabelecer para cada caso

um tempo total a ser simulado, o passo temporal, o número de iterações por passo e a frequência de aquisição dos dados.

O *tempo total a ser simulado* é o comprimento do período que se pretende estudar, este não deve ser confundido com o tempo de conclusão da simulação numérica. Aquele tempo foi escolhido de tal forma que fosse possível observar todo o desenvolvimento e a estabilização do fenômeno. Na faixa de velocidades que foi abordada neste estudo, observou-se que o tempo total de simulação é inversamente proporcional ao número de Reynolds. No caso do perfil circular, devido à sua geometria mais harmoniosa, os tempos de simulação foram ligeiramente maiores se comparados com os mesmos Reynolds para o perfil quadrado.

O *passo temporal* representa o intervalo de discretização do tempo total, significa a “distância” temporal entre cada passo da simulação. Neste caso, também se observou uma relação de proporcionalidade inversa entre passo temporal e Reynolds. Com o aumento do Reynolds, um passo temporal pequeno se faz necessário para garantir a continuidade de resultados entre as células adjacentes e entre os passos subsequentes. Apesar de uma larga abordagem desta problemática ser encontrada na literatura, a escolha dos passos temporais para cada caso simulado foi feita baseada nos resultados esperados de simulação. Partiu-se das frequências médias encontradas nas figuras 7 e 9 e embutiu-se uma margem de segurança.

O *número de iterações* corresponde ao número máximo de vezes que os cálculos são feitos dentro de cada passo temporal. Com o intuito de reduzir a propagação de erros entre passos temporais, precisa-se escolher um número de iterações tal que o erro seja minimizado. Além deste limite máximo, estabelece-se um limite de erro, se este for satisfeito antes de se atingir o número máximo de iterações, o cálculo é encerrado e avança-se para o próximo passo. Depois de afinados os outros parâmetros e condições de simulação, o número de iterações pode ser definido de uma forma que o erro final do passo temporal seja adequado. Algumas vezes, a simulação atinge um patamar de erro mínimo, nestes casos, não vale a pena deixar o número de iterações máximo muito elevado, seria um gasto computacional desnecessário. No presente estudo, muitos dos casos acabaram por reduzir o erro até um patamar de mínimo, o número de iterações, então, foi definido para cobrir com uma ligeira folga este intervalo. A figura 13 é uma tela

de resultado de simulação para um dado passo de simulação, pode-se observar no gráfico da esquerda a evolução dos valores das variáveis de interesse, e no gráfico da direita, a convergência numérica em termos percentuais de cada uma delas.

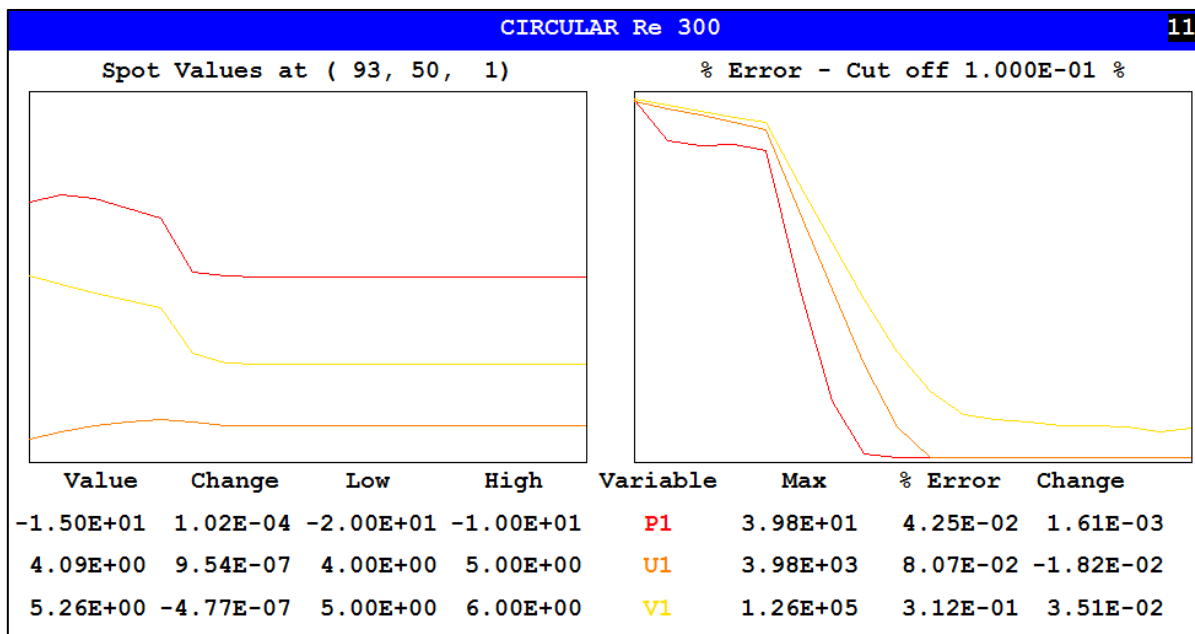


Figura 13 - Tela de resultado de simulação

Finalmente, a frequência de aquisição de resultados é o intervalo de registro dos resultados, ou seja, a cada quantos passos de iteração deve-se guardar os resultados. Esta frequência é um múltiplo do passo temporal e sua escolha foi feita de forma empírica, tendo em vista os resultados esperados.

A principal variável de entrada desta simulação é a velocidade do fluido à montante. Mantendo-se os parâmetros de fluido constantes para cada perfil, variou-se a velocidade para variar o número de Reynolds. Os outros parâmetros numéricos da simulação foram alterados com o intuito de proporcionar resultados mais adequados com otimização do gasto computacional. Tem-se em mente sempre um compromisso entre gasto computacional e precisão de cálculos nas simulações. A tabela 3 apresenta um resumo de todos os esses parâmetros para cada caso que foi estudado.

Tabela 3 - Parâmetros numéricos de simulação

Perfil	Re	Tempo Total (s)	Nº Passos	Passo de tempo (s/p)	Nº de iterações	Freq. de aquisição
Circular D = 0,6m	100	30	2500	0,012	220	10
	300	20	2000	0,01	150	10
	500	20	2000	0,01	220	5
	1000	15	3000	0,005	220	5
Quadrado L = 0,4m	100	60	6000	0,01	300	10
	300	40	1200	0,03	130	5
	500	15	500	0,03	150	5
	1000	15	1000	0,015	220	5

3.3 Malha com Potência (Power)

Em alguns casos de simulação em que se faz necessária a análise mais detalhada de um fenômeno, como por exemplo o desenvolvimento de uma camada limite em uma superfície ou a formação de vórtice a jusante de um corpo, pode-se recorrer a um outro tipo de malha cartesiana. Esta malha é muito semelhante à malha cartesiana descrita na seção 3.1, entretanto difere pelo fato de possuir uma distribuição não homogênea no domínio. Com este recurso, pode-se reduzir o tamanho dos volumes na região de interesse e aumentar nas regiões menos importantes, assim, refina-se o resultado na região sem comprometer todo o domínio. No estudo em questão, uma malha com potência pode ser usada à jusante do corpo, com volumes menores imediatamente atrás deste e com volumes maiores no resto da esteira.

Para a simulação do perfil quadrado, a malha que estava apresentando bons resultados para Re 100 e 300 acabou se mostrando pouco fina para Re maiores, neste caso, uma primeira tentativa foi feita com uma malha não homogênea, usando uma potência de 1,2. A figura 14 ilustra a malha utilizada, é possível observar uma maior “densidade” de volumes nas imediações do corpo.

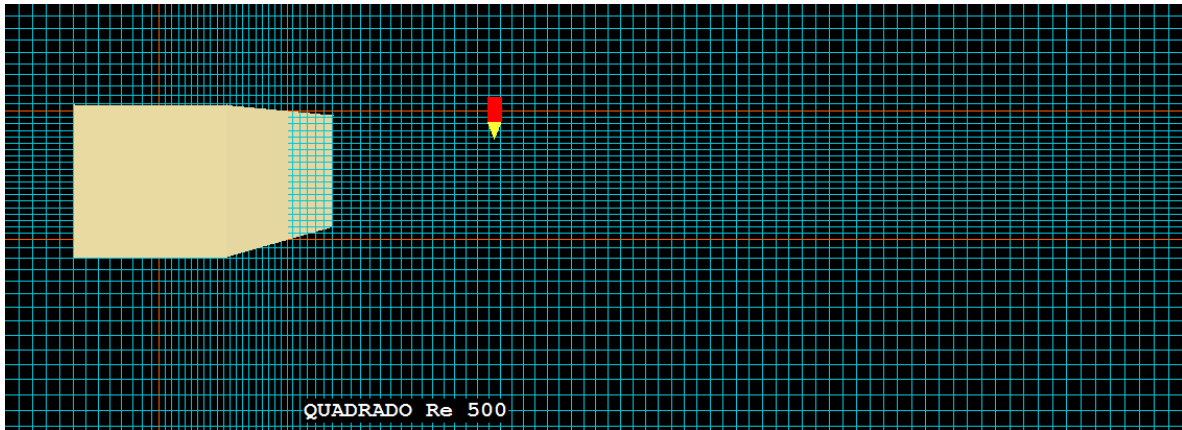


Figura 14 - Detalhe de uma malha com potência para o perfil quadrado

A malha tipo Power não é a única variação de malha existente em simulações CFD, outras malhas ainda mais complexas como *Fine Grid*³ e *BFC*⁴, por exemplo, são amplamente utilizadas e muito bem documentadas na literatura. Para os objetivos deste estudo, a malha Power proporciona um equilíbrio desempenho/custo computacional muito adequado, por este motivo ela foi escolhida.

3.4 Aquisição de Resultados

Durante a etapa de preparação também são definidas as variáveis, sejam elas principais ou derivadas, que se pretende calcular durante a simulação. Foram definidas como variáveis de interesse as velocidades do fluido nas direções X e Y, as pressões, as forças atuantes no corpo e os coeficientes de arrasto e sustentação. Estas variáveis são calculadas durante a simulação e armazenadas em arquivos de resultados.

Para a obtenção tanto das velocidades quanto das pressões, as equações de conservação da quantidade de movimento e de conservação de massa são resolvidas para cada volume do domínio em todos os passos de tempo. Já as forças atuantes e os coeficientes, que são conhecidos como variáveis derivadas, são obtidos de forma secundária a partir das variáveis principais. As forças sobre o corpo são calculadas a partir da integração da pressão sobre a superfície, e os coeficientes a partir das equações descritas na seção 2.2. Tanto as forças quanto os coeficientes são calculados separadamente para cada direção. Portanto, os resultados apresentam forças e

³ Malha cartesiana com volumes refinados que é definida em uma região específica de interesse dentro de um domínio.

⁴ *Body-fitted coordinate* – tipo de malha cujo desenho acompanha a geometria do corpo em estudo

coeficientes em X, Y e Z. No estudo em questão, as forças e coeficientes em X vão corresponder à força de arrasto e ao coeficiente de arrasto, respectivamente; e aquelas na direção Y vão corresponder à força e ao coeficiente de sustentação.

Além das variáveis de interesse, no arquivo de resultados, podem-se obter informações sobre o desempenho numérico da simulação. Informações como resíduos numéricos locais e globais, e conservação da massa e quantidade de movimento no domínio devem ser interpretadas a fim de validar a simulação. Cabe lembrar que estas condições são necessárias, mas não suficientes para garantir a validação do fenômeno estudado com a realidade. Como parte importante do processo de validação dos resultados está o bom conhecimento do objeto de estudo, a compreensão do fenômeno físico e a boa preparação da simulação.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Um certo número de simulações foi efetuado com o intuito de se chegar às condições numéricas descritas no capítulo anterior. Os resultados obtidos e suas análises foram divididos de forma que se permita a compreensão dos principais pontos chave do fenômeno, em primeiro lugar estudou-se a relação entre o campo de velocidades e o campo de pressão; em seguida, as linhas de corrente associadas ao escoamento, e em um terceiro momento, os coeficientes de arrasto e sustentação para cada perfil bem como as frequências de desprendimento de vórtices.

A observação da relação entre o campo de velocidades e o campo de pressões é de extrema importância para uma primeira avaliação qualitativa dos resultados de simulação. Comparando o comportamento de ambos com as referências encontradas na literatura pode-se avaliar a coerência do modelo computacional para com a realidade.

Com a análise de linhas de corrente pôde-se passar a um segundo estágio de avaliação qualitativa, aonde a capacidade de representar a formação e o desprendimento de vórtices na rasteira dos cilindros é observada. Através da visualização das linhas de corrente é possível observar como estas evoluem para diferentes números de Reynolds e para os dois perfis.

No que diz respeito à interpretação quantitativa dos resultados, o uso dos coeficientes se faz necessário como forma de padronização dos resultados. Através de números adimensionais podem-se fazer comparações entre resultados independentemente das condições de simulação. Para tanto, será empregado o número de Reynolds como velocidade adimensional, os coeficientes de arrasto e sustentação como “forças” adimensionais e o número de Strouhal como frequência adimensional de desprendimento de vórtices.

Em um último momento, tomou-se o cuidado de comparar os valores obtidos na simulação computacional com os resultados de diversos trabalhos publicados na área.

4.1 Campos de Pressão e Velocidade

Neste estudo, os resultados foram avaliados em função de parâmetros adimensionais, mas, para uma primeira compreensão e avaliação do fenômeno, estudar-se-á a relação entre o campo de pressões e de velocidades.

Como descrito na seção 2.1, existe uma relação intrínseca entre a pressão e a velocidade do fluido nas imediações do cilindro. A figura 15 ilustra a distribuição de pressões ao longo do perfil circular para um dado instante de tempo e Re 300.

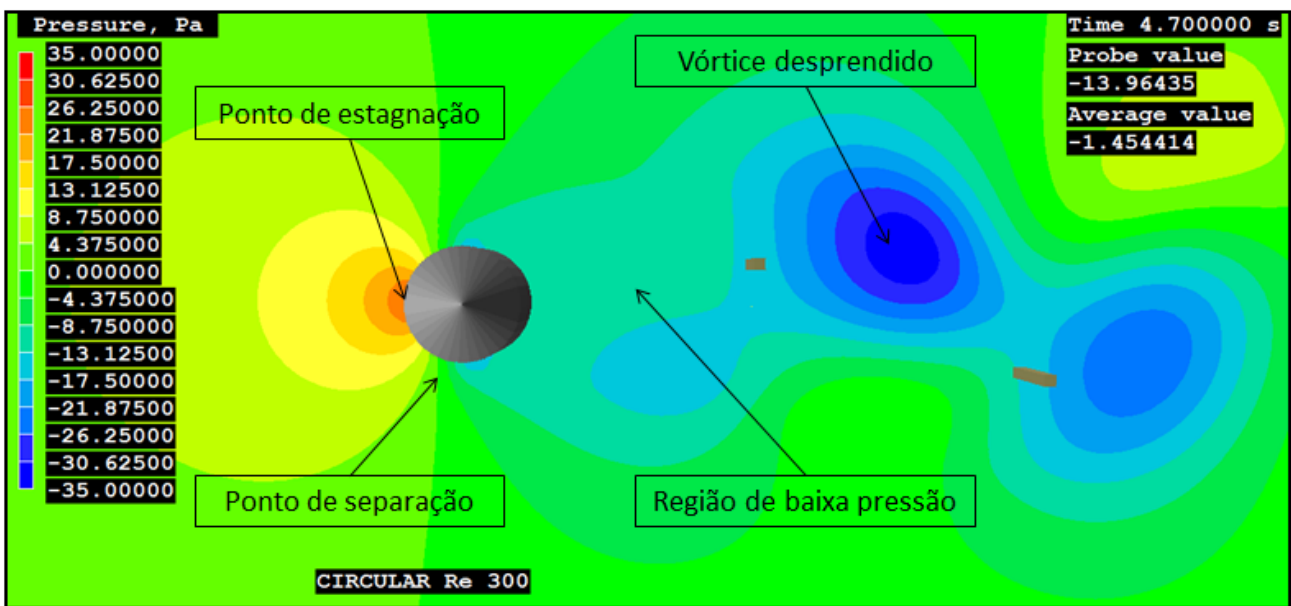


Figura 15 - Campo de pressão para perfil circular, Re 300

A escala de cores representa pressões relativas à pressão atmosférica. No bordo de ataque pode-se perceber de imediato uma região com a mais alta pressão relativa, esta corresponde ao ponto de estagnação do fluido a montante. A jusante do corpo pode-se observar uma região de baixa pressão que começa a se desenvolver a partir do ponto de separação. Ponto este que corresponde à inversão dos sinais de gradiente de pressão e velocidade. Como ponto de mais baixa pressão relativa está o último vórtice desprendido.

A teoria desenvolvida na seção 2.1 explica o comportamento da camada limite e posicionamento do ponto de separação no corpo para escoamentos laminares. Pode-se verificar que o resultado obtido corresponde ao descrito pela teoria.

As forças resultantes que atuam no corpo surgem pela diferença de pressão total entre as regiões a montante e a jusante, e entre as regiões superior e inferior em torno do cilindro. Esta força tem sentido da região de baixa pressão à região de alta pressão, e como o desprendimento de vórtices periódico provoca constantes variações nas pressões relativas, as forças atuantes sobre o cilindro também são periódicas.

Apesar de ambas as forças resultantes (arrasto e sustentação) variarem de forma periódica, existe uma diferença entre suas frequências. A força na componente X, ie força de arrasto sobre o cilindro, apresenta uma variação em sua resultante para cada vórtice criado e desprendido, independentemente do local de formação (superior ou inferior). Portanto, a componente de força apresenta a frequência de desprendimento de um único vórtice. No caso da força na componente Y, ie força de sustentação, observa-se que para cada ciclo de desprendimento de dois vórtices (um inferior e outro superior) a resultante apresenta um ciclo de variação. Portanto, esta força apresenta a frequência de desprendimento de dois vórtices.

A observação do campo de velocidades corrobora o que foi discutido até este ponto. A figura 16 ilustra o campo de velocidades absolutas do escoamento ao redor do corpo. Pode-se observar o comportamento da velocidade no ponto de separação, as velocidades do fluido nas imediações do corpo logo após o ponto de estagnação são contrária ao escoamento e sua amplitude é reduzida, segundo evidencia a escala de cores e o tamanho das flechas. A partir deste ponto, também é possível observar a região de recirculação do fluido a jusante do corpo e o comportamento do fluido na região do vórtice.

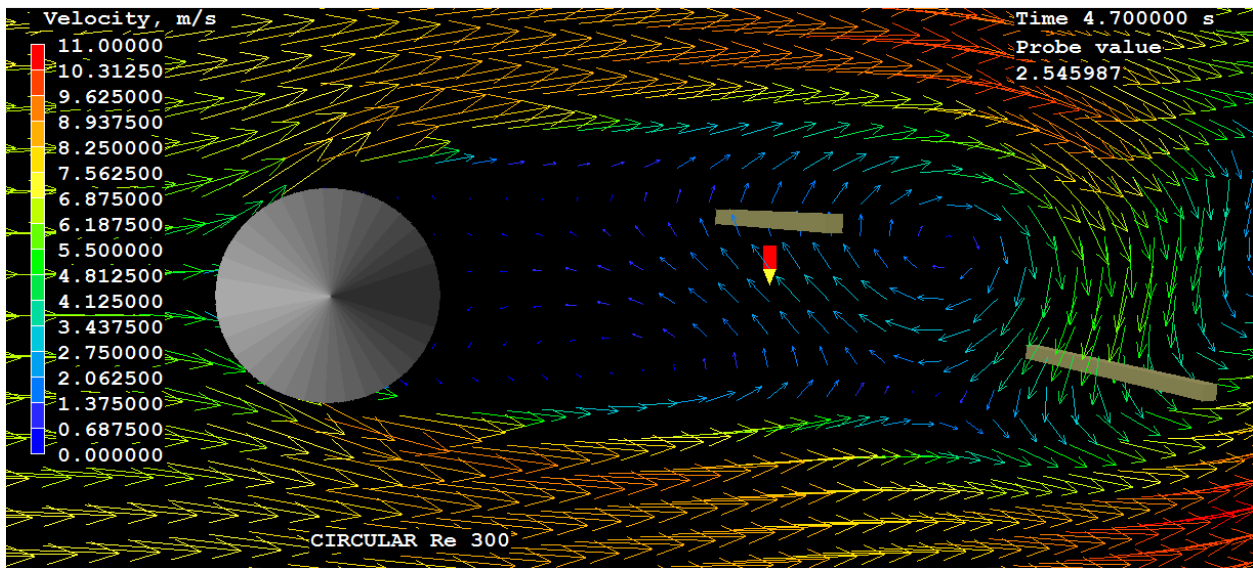


Figura 16 - Campo de velocidades para perfil circular, Re 300

As próximas duas figuras ilustram o mesmo comportamento observando o caso do perfil quadrado e Re 300. Uma diferença fundamental entre o perfil circular e o quadrado é observada na zona de separação, pelo perfil menos harmonioso do quadrado, a zona de separação se dá bem próxima às arestas da face de ataque.

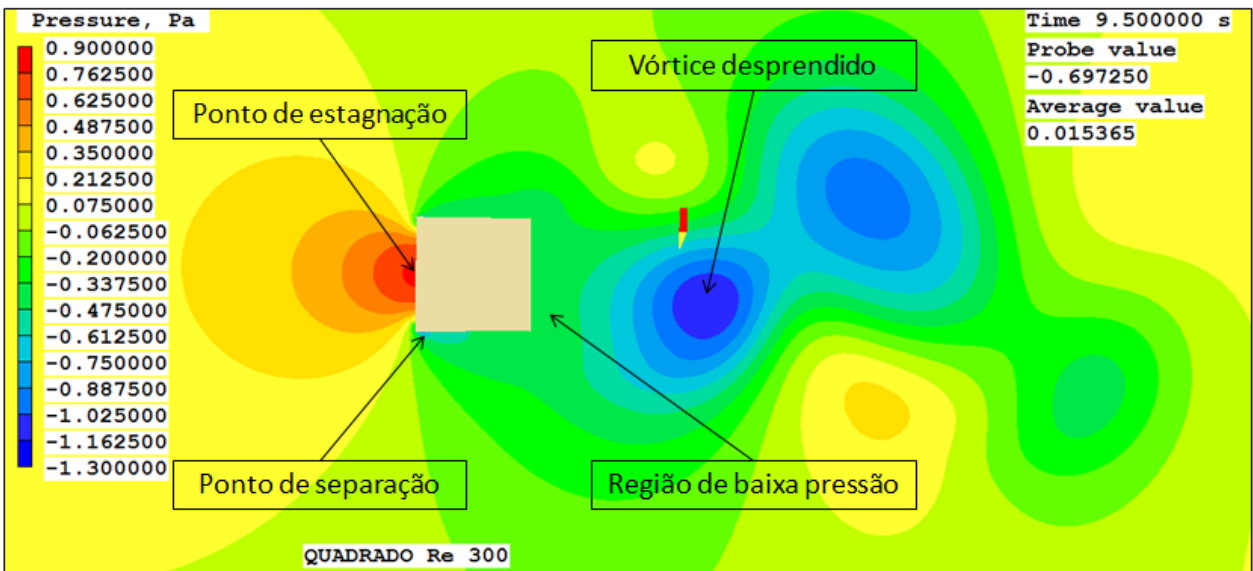


Figura 17 - Campo de pressão para perfil quadrado, Re 300

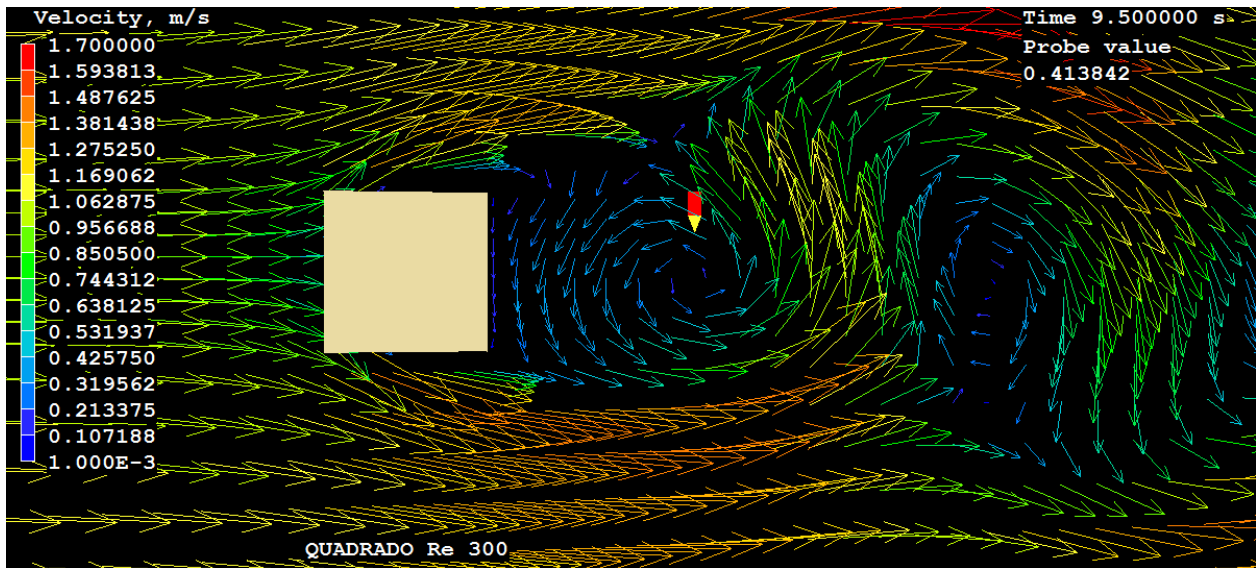


Figura 18 - Campo de velocidades para perfil quadrado, Re 300

4.2 Análise de Linhas de Corrente

Linhas de corrente foram traçadas da entrada até a saída do domínio na região do cilindro. O objetivo é observar o comportamento dessas linhas no contorno do corpo. Para ilustrar os resultados tomou-se como exemplo o escoamento de Re 300, tanto para perfil circular como quadrado. As figuras 19 e 20 são imagens de uma fração da simulação aonde é possível ver o surgimento de um vórtice, seu desenvolvimento e seu desprendimento a jusante do cilindro. O comportamento dessas linhas ficou de acordo com o esperado, cf. figuras 5 e 6, aonde a formação de vórtices é alternada (superior e inferior) e as linhas de corrente acompanham o contorno dos vórtices.

Na figura 19 é possível ver na primeira imagem ($t = 5,7s$) o início da formação de um vórtice na parte superior e o desprendimento de um vórtice na parte inferior. Com o avanço do tempo, o vórtice inferior que se desprende segue o fluxo e o princípio de vórtice superior acaba por crescer e se desprender também do cilindro. Este fenômeno periódico completa seu ciclo após o desprendimento de um vórtice superior e um inferior, sendo então esta frequência aquela utilizada no cálculo do número de Strouhal.

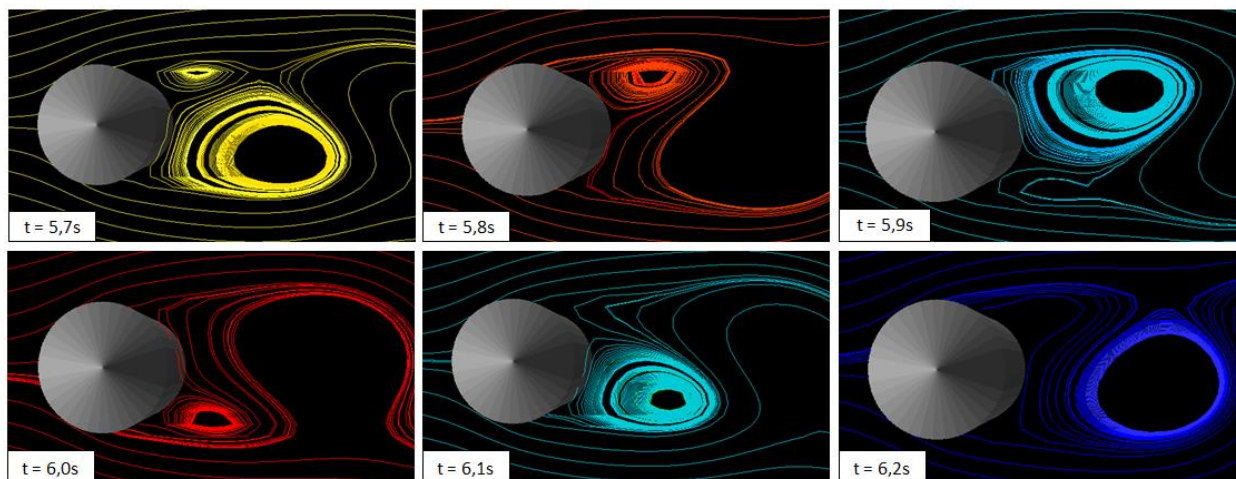


Figura 19 - Linhas de corrente em diferentes instantes para perfil circular, Re 300

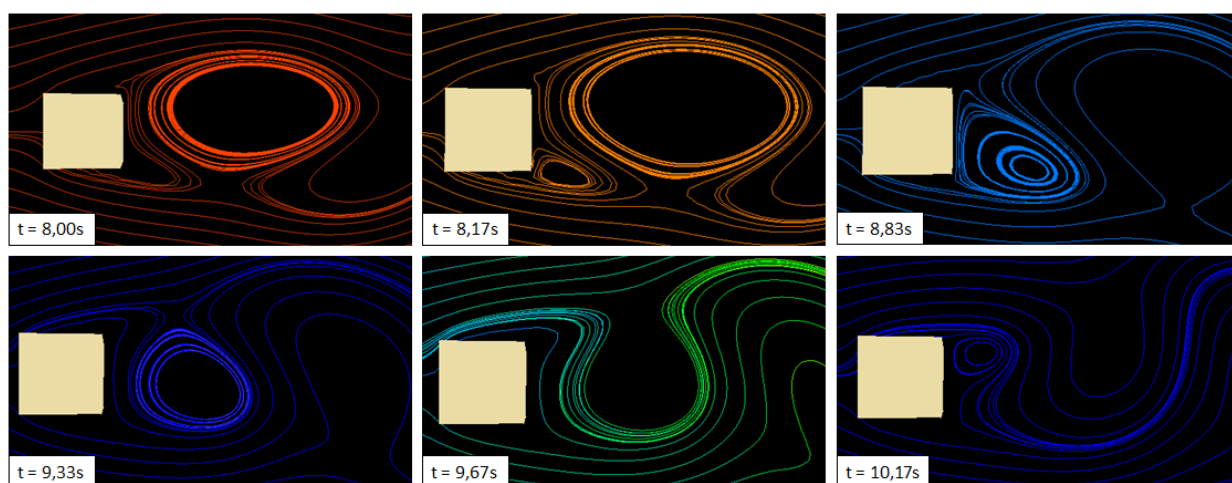


Figura 20 - Linhas de corrente em diferentes instantes para perfil quadrado, Re 300

A figura 20 apresenta uma sequência similar de surgimento, desenvolvimento e desprendimento de vórtice, mas dessa vez para o perfil quadrado. Uma diferença visível no caso do perfil quadrado e Reynolds 300 é a curvatura das linhas de corrente na rasteira do cilindro. Provavelmente pela sua face de ataque menos harmoniosa que a do cilindro, o fluido acaba sendo projetado em uma direção verticalizada. É possível observar também que a zona de recirculação começa a se desenvolver nas faces superior e inferior do quadrado.

À título comparativo, as figuras 21 e 22 ilustram as linhas de corrente de ambos os perfis e para todos os Reynolds simulados aproximadamente no mesmo instante de tempo (12s). Em ambos os casos pode-se ver o movimento do fluido a jusante do cilindro, os

rastros dos vórtices desprendidos estendem-se pelo domínio. Também vê-se um ligeiro achatamento nesta “cauda” conforme o número de Reynolds aumenta, tal fenômeno é explicado pelo comportamento da esteira que à partir de Re 300 torna-se turbulenta, como observado no gráfico da figura 5. Com uma esteira turbulenta, os fenômenos difusivos são aumentados e os vórtices tem maior possibilidade de difundirem na corrente.

Nas simulações com Re 100, em ambos os casos, para o tempo de aproximadamente 12 segundos a esteira de vórtices ainda não tinha se desenvolvido totalmente. Para o cilindro, podem-se observar dois vórtices de perfil alongado sendo que o superior começa a crescer em relação ao inferior. Este primeiro movimento acaba culminando no desprendimento de um pequeno vórtice, e conseqüentemente em pequenos ciclos de desprendimento. Quando totalmente desenvolvido, os vórtices têm formato menos alongados e o desprendimento ocorre nas imediações do cilindro.

Para o perfil quadrado, para o tempo de 12 segundos de simulação a esteira também não estava desenvolvida. O início dos ciclos de desprendimento começa da mesma maneira que para o perfil circular, mas com um tempo de simulação ligeiramente superior. A figura 23 ilustra o momento do desprendimento do primeiro vórtice para este perfil, isto ocorre em torno dos 20 segundos.

Para todos os casos simulados, a análise qualitativa das linhas de corrente apresenta resultados satisfatórios para a simulação. Os padrões observados estão de acordo com o que era esperado.

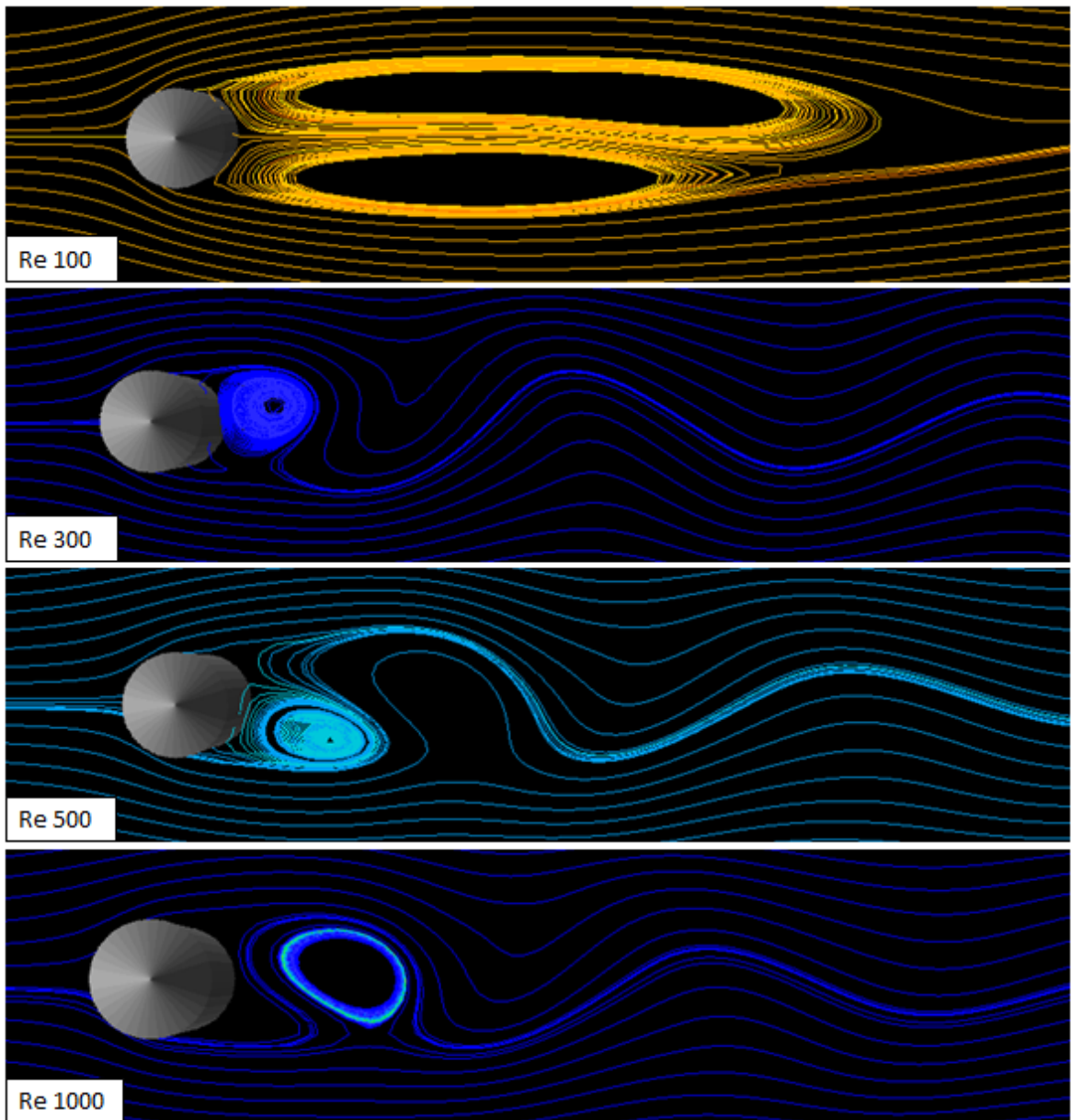


Figura 21 - Linhas de corrente em quatro faixas de Re, $t \approx 12s$, perfil circular

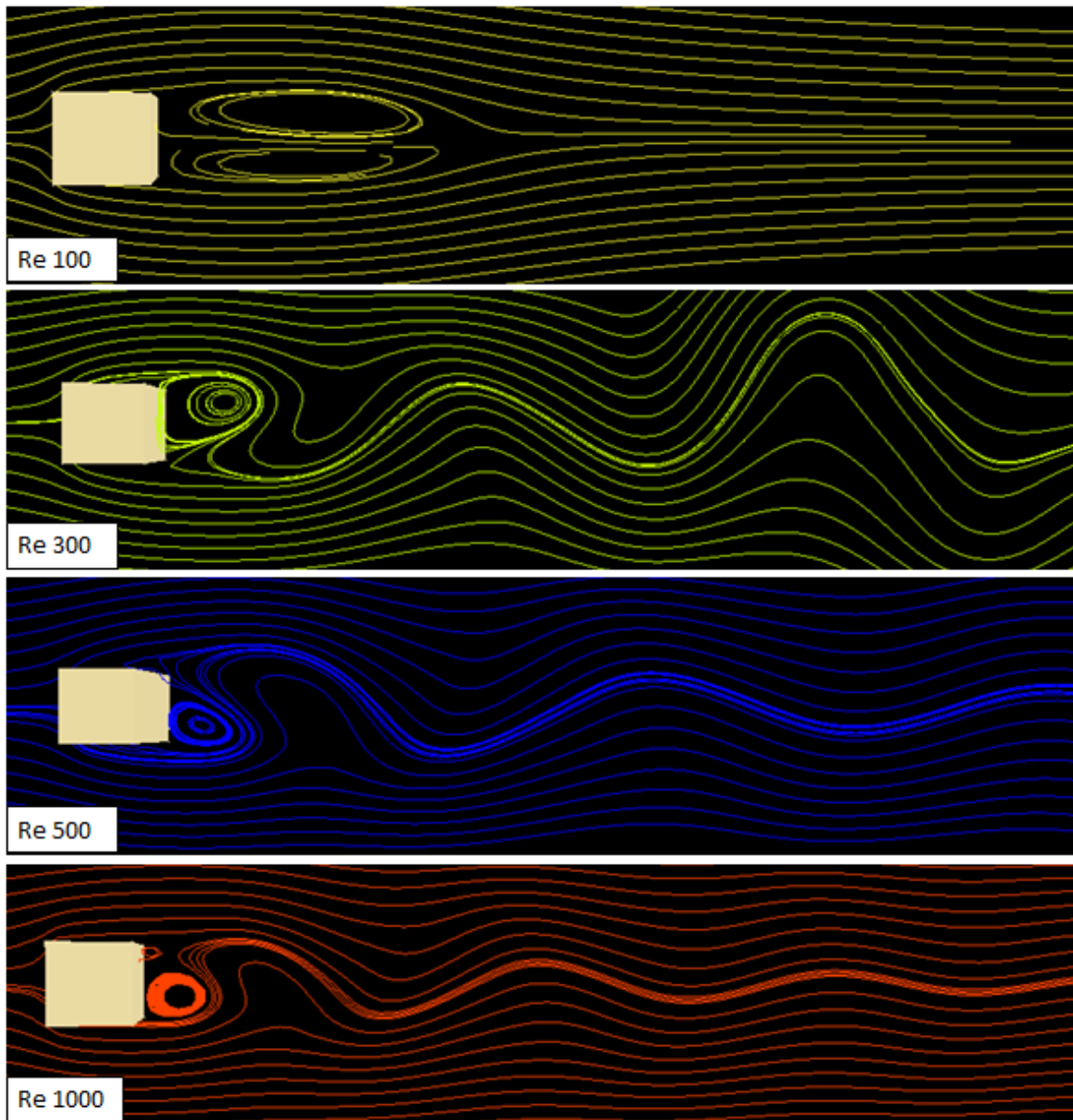


Figura 22 - Linhas de corrente em quatro faixas de Re, $t \approx 12s$, perfil quadrado

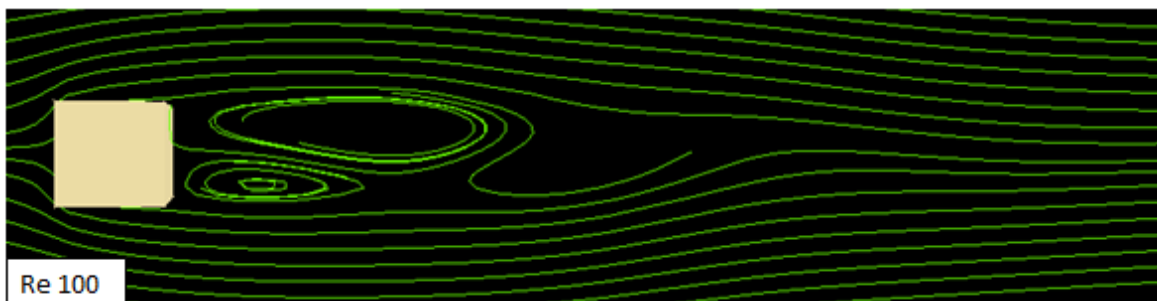


Figura 23 - Desprendimento do primeiro vórtice em $t \approx 20s$, perfil quadrado

4.3 Coeficiente de Arrasto e o Número de Strouhal

Para cada passo numérico da simulação, valores de forças e momentos atuantes sobre o cilindro, e seus respectivos coeficientes, foram armazenados em tabelas de dados. Esses dados foram então organizados na forma de gráficos em função do tempo. A apreciação dos resultados foi feita através das variáveis adimensionais de coeficientes de arrasto e sustentação, desta forma, a comparação com valores da literatura e entre os próprios resultados se torna possível.

A seguir, foram comparados os resultados dos dois perfis para o mesmo número de Reynolds.

Re 100

A figura a seguir apresenta os gráficos de C_D e C_L versus tempo para Re 100.

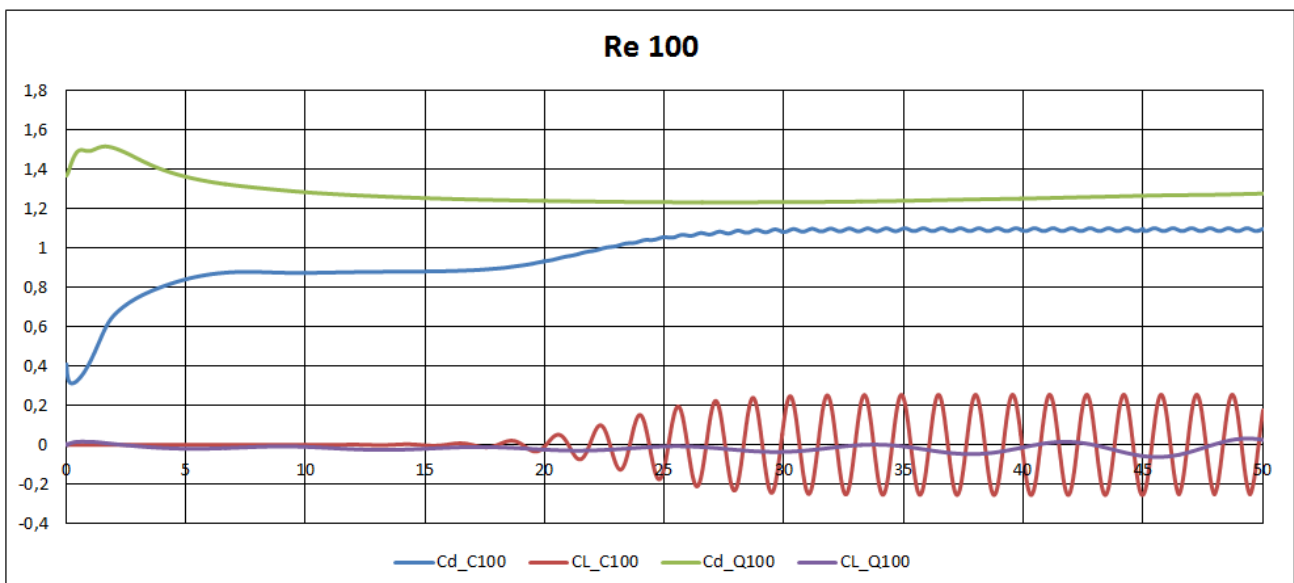


Figura 24 - Resultados de C_D e C_L para perfil circular e quadrado, Re 100

Neste gráfico é possível perceber que o cilindro de perfil circular atinge um regime estável em aproximadamente 30 segundos enquanto que o perfil quadrado não chega a estabilizar. Segundo Gera (2010), o tempo para a estabilização do escoamento ao redor do perfil quadrado é de aproximadamente 150 segundos, tal tempo de simulação acarretaria

um gasto computacional muito elevado, o que inviabilizou a simulação completa com a ferramenta usada neste trabalho. Em termos de coeficientes, pode-se observar que a faixa de coeficiente de arrasto médio para o perfil quadrado é ligeiramente superior à faixa do perfil circular. Para o perfil circular o coeficiente de arrasto médio é da ordem de 1,1 e para o perfil quadrado seu valor não pode ser concluído. As frequências de desprendimento foram medidas a partir do gráfico de coeficiente de sustentação, e no caso do perfil quadrado, mesmo a esteira não estando desenvolvida, foi possível fazer uma primeira aproximação. Estes valores de frequência foram convertidos em número de Strouhal segundo as equações apresentadas na seção 2.3.

A tabela 4, logo abaixo, apresenta um resumo dos resultados obtidos para $Re = 100$.

Tabela 4 - Resumo de resultados de C_D e St , $Re = 100$

Perfil	C_D	St
Circular	1,1	0,156
Quadrado	NA	0,147

Os valores encontrados de C_D e St na literatura para o perfil circular são bem próximos aos resultados de simulação. Portanto, para o caso do perfil circular o modelo numérico utilizado aparenta estar correto e reproduzir com certa precisão os efeitos da esteira de vórtices. No caso do perfil quadrado, o valor de C_D não pode ser concluído mas o valor de St está de acordo com o que é encontrado na literatura. Apesar de um valor satisfatório de St ter sido encontrado, este vem de uma primeira aproximação de uma esteira não desenvolvida, portanto não se pode concluir que o modelo é adequado para a simulação do perfil quadrado.

Re 300

O gráfico abaixo apresenta os resultados de C_D e St para $Re\ 300$.

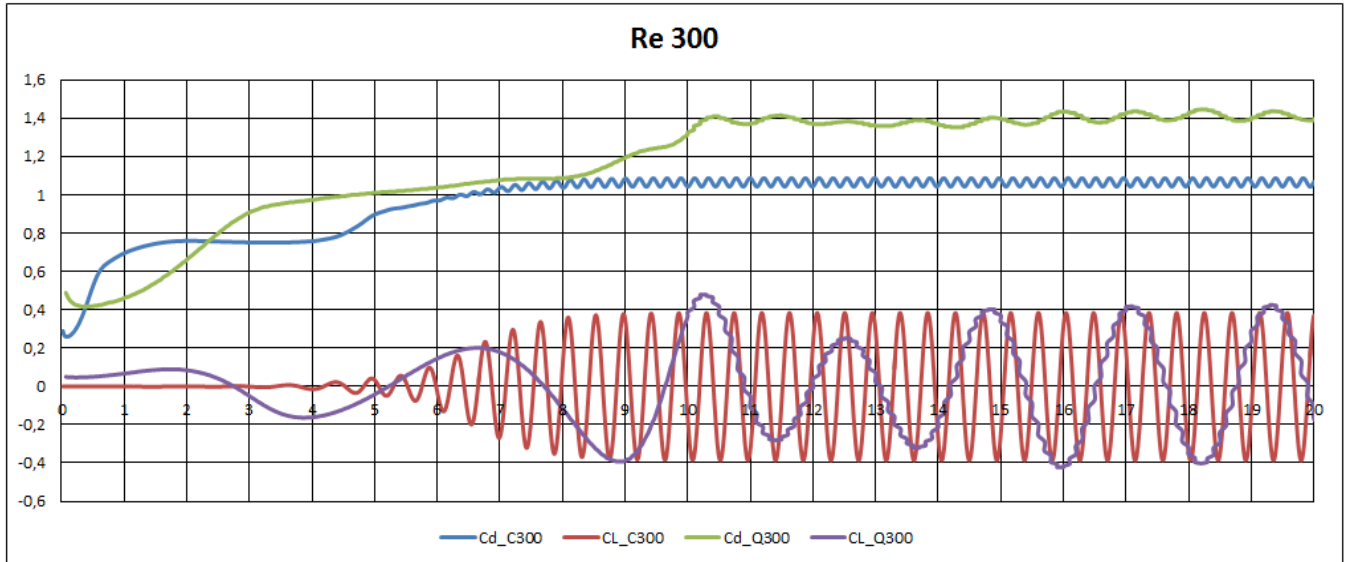


Figura 25 - Resultados de C_D e CL para perfil circular e quadrado, $Re\ 300$

A partir do gráfico pode-se observar que o tempo de simulação foi suficiente para que ambas as esteiras atingissem um regime estável, muito embora a do perfil circular tenha se estabilizado significativamente antes daquela do perfil quadrado. A faixa de coeficientes de arrasto médios do perfil quadrado é superior à do perfil circular, sendo 1,4 contra 1,1. Quanto à frequência de desprendimento, o perfil circular desprende significativamente mais vórtices que o perfil quadrado, no entanto, quando os números de Strouhal são comparados, esta diferença fica mais estreita, sendo 0,18 para o circular contra 0,156 para o quadrado.

No gráfico do coeficiente de sustentação do perfil quadrado, uma pequena oscilação pode ser observada, acredita-se que este fenômeno pode estar associado à característica transitória da esteira de vórtices nesta faixa de Reynolds trabalhada. Apesar desta oscilação, todos os resultados encontrados são satisfatórios e o modelo numérico tem boa capacidade para representar os fenômenos físicos. A tabela 5 apresenta um resumo dos resultados encontrados.

Tabela 5 - Resumo de resultados de CD e St, Re 300

Perfil	Cd	St
Circular	1,05	0,18
Quadrado	1,4	0,156

Re 500

No caso de Re 500, o gráfico abaixo apresenta um resultado simulado para o perfil circular e dois resultados diferentes para o perfil quadrado.

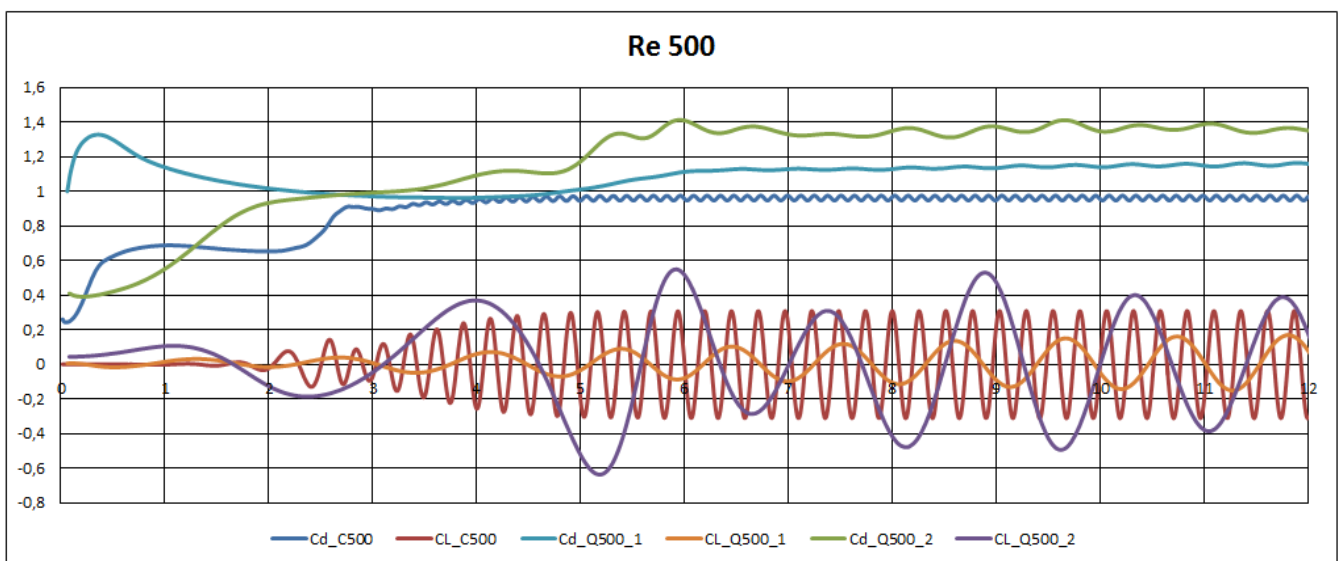


Figura 26 - Resultados de CD e CL para perfil circular e quadrado, Re 500

Mais uma vez, a estabilização da esteira ocorre antes para o perfil circular, quando comparado com o perfil quadrado. Em termos de tempo até a estabilização da esteira, o perfil circular tem uma ligeira vantagem quando comparado com o perfil quadrado.

Os resultados apresentados no gráfico para o perfil circular são bem otimistas, mesmo a simulação se passar em um caso de esteira de vórtices turbulenta, os resultados foram satisfatórios. O coeficiente de atrito médio é da ordem de 0,97 e o número de Strouhal da ordem de 0,19, resultados suficientemente próximos aos encontrados na literatura (cf. Figura 7). Pode-se concluir que o modelo empregado está sendo até o momento uma representação do fenômeno físico.

Quanto ao perfil quadrado, desta vez, os resultados encontrados começaram a apresentar sinais de que o modelo numérico não está totalmente adequado para a simulação do perfil quadrado. No gráfico são apresentados dois resultados distintos. Os resultados nomeados “_1” são referentes à uma primeira simulação feita a partir do modelo usado para os Re 100 e 300. Este modelo baseava-se em uma malha cartesiana homogênea e no caso de Re 500, resultou em resultados muito foras do que era esperado e do que é encontrado na literatura. Tanto o número de Strouhal (0,198) quanto o C_D (1,1) não são aceitáveis. Tendo estes resultados não aceitáveis, uma tentativa de melhoria foi feita a fim de captar melhor os efeitos turbulentos da esteira de vórtices. A malha foi mudada tanto em número de elementos quanto em distribuição dos volumes, e aquela que estava sendo usada como indicada na tabela 1, passou a ter um número maior de volumes, segundo a tabela abaixo:

Tabela 6 - Distribuição de volumes na malha para o perfil quadrado, Re 500_2

Região	NX	NY
1	60	55
2	20	20
3	150	55

Além da mudança do número de elementos, uma alteração foi feita na distribuição destes dentro do domínio. Usou-se uma distribuição com potência de 1,2 (cf. Seção 3.3).

Como estas alterações, puderam-se obter resultados sensivelmente mais próximos daqueles encontrados na literatura. O número de Strouhal encontrado passou para 0,145, o que corresponde ao valor esperado, entretanto, o valor do coeficiente de arrasto médio (1,4) ainda está longe da faixa de 1,7 à 2,2 encontrado em Sohankar (1998). Estes resultados deixam evidentes que o modelo adotado está provavelmente no caminho certo para uma boa representação do fenômeno físico, mas ainda não está completamente adequado. Dentre vários fatores que podem ser alterados, algum refinamento na malha e uma redução no passo de tempo talvez sejam suficientes para a adequação do modelo numérico.

A tabela a seguir apresenta um resumo dos resultados obtidos na simulação para Re 500.

Tabela 7 - Resumo de resultados de CD e St, Re 500

Perfil	Cd	St
Circular	0,97	0,19
Quadrado “_1”	1,1	0,198
Quadrado “_2”	1,4	0,145

Re 1000

A figura 26 apresenta os resultados de simulação para Re 1000.

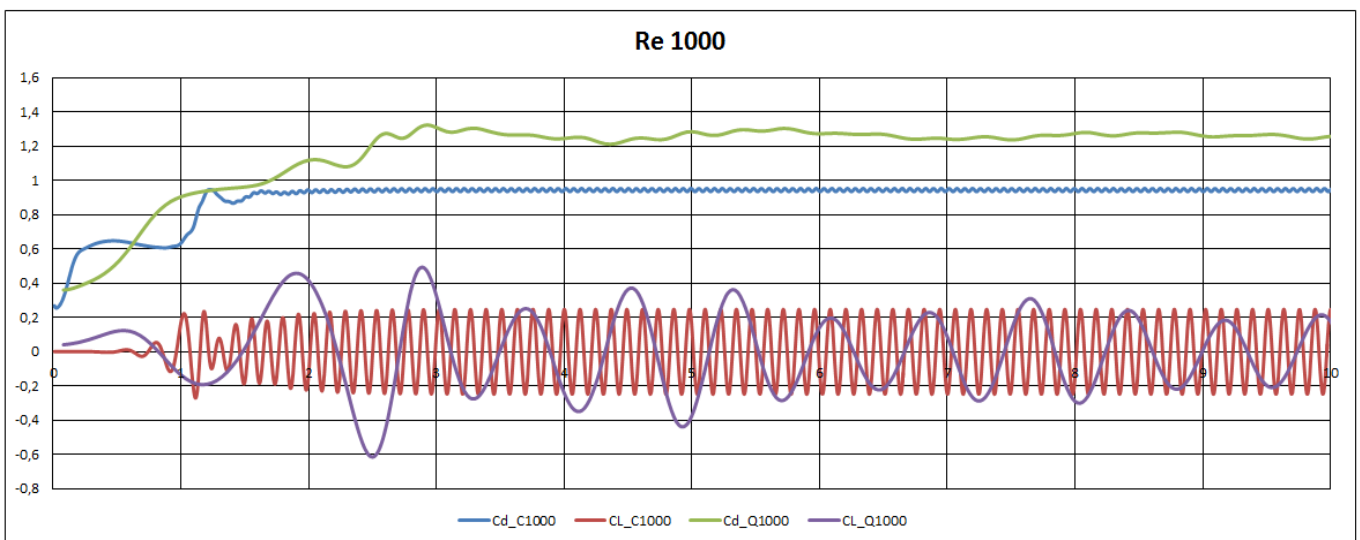


Figura 27 - Resultados de CD e CL para perfil circular e quadrado, Re 1000

A análise do gráfico para o perfil quadrado não se faz possível, pois ambos os valores encontrados não são válidos. O modelo numérico utilizado foi o mesmo que havia sido utilizado na segunda tentativa para Re 500. Mesmo com um número maior de elementos na malha e o uso de volumes não uniformes, não foi possível obter resultados satisfatórios para esta faixa de velocidade. Este modelo que tinha dado um passo na direção certa para Re 500 se mostrou não adequado para Re 1000. Provavelmente, por causa dos efeitos turbulentos na esteira de vórtices, uma malha ainda mais fina tenha que ser utilizada e possivelmente com um passo de tempo ainda menor. Além desta malha cartesiana, cabe lembrar a existência de malhas mais complexas como BFC. Sendo a esteira turbulenta, os efeitos de difusividade são muito mais intensos, se adicionados aos efeitos de viscosidade numérica excessiva proveniente de um modelo não adequado, os vórtices acabam sendo

dissipados e o cálculo numérico não consegue representar a realidade do fenômeno. À título comparativo, os valores encontrados foram $C_D = 1,3$ e $St = 0,147$, enquanto que os valores encontrados em Sahankar (1998) são $C_D \approx 2,1$ e $St \approx 0,12$.

No caso do perfil circular os resultados são mais otimistas. Tanto o coeficiente de arrasto médio ($C_D = 0,95$) quanto o número de Strouhal ($St = 0,195$) estão dentro da faixa de valores esperados encontrados em Lienhard (1966). Isto indica que o modelo numérico escolhido para o perfil circular se mostrou muito adequado para toda a faixa de Reynolds estudada, sendo ela uma boa representação da realidade física do fenômeno.

A tabela 8, à seguir, apresenta um resumo dos valores encontrados na simulação com $Re = 1000$.

Tabela 8 - Resumo de resultados de C_D e St , $Re = 1000$

Perfil	C_D	St
Circular	0,95	0,197
Quadrado	1,3	0,147

Finalmente, a tabela 9 apresenta uma compilação de todos os resultados encontrados em comparação com dados da literatura. Os dados para perfil circular foram encontrados no trabalho de Lienhard (1966) e os de perfil quadrado nos trabalhos de Sohankar(1998). Ambos os trabalhos apresentam valores compilados de outros autores.

Tabela 9 - Resumo de resultados de C_D e St , todos os Re simulados

Perfil	Re	C_D	C_D (literatura)	St	St (literatura)
Circular	100	1,1	1,1-1,3	0,156	0,15-0,17
	300	1,05	1,1	0,18	0,165-0,205
	500	0,97	1,0	0,19	0,18-0,21
	1000	0,95	0,95	0,197	0,185-0,21
Quadrado	100	IND	1,4-1,7	0,147	0,12-0,15
	300	1,4	1,4-1,8	0,156	0,13-0,155
	500_1	1,1	1,7-2,1	0,198	0,12-0,17
	500_2	1,4	1,7-2,1	0,145	0,12-0,17
	1000	1,3	2,1	0,147	0,12

4.4 Considerações Gerais

Quando se observam as tendências nos resultados de frequência de desprendimento e coeficiente de arrasto, alguns cuidados devem ser tomados a fim de se evitar deduções falaciosas. Deve-se ter em mente as limitações encontradas nos modelos numéricos utilizados e o tamanho do espaço amostral de simulações.

De qualquer maneira, apesar de terem sido avaliadas apenas quatro condições diferentes de escoamento para cada perfil, algumas tendências nos resultados podem ser inferidas. A primeira e mais facilmente observável está no tempo para a estabilização da esteira de vórtices, nos casos simulados percebeu-se que conforme o número de Reynolds foi aumentado, o tempo para a estabilização foi reduzido. Além disso, o tempo para a estabilização da esteira para o perfil quadrado é sempre superior ao do perfil circular.

A evolução do número de Strouhal para o perfil circular apresenta uma tendência crescente com o aumento do Re , enquanto que para o perfil quadrado, os resultados que podem ser considerados dentro do esperado (Re 100, 300 e 500_2) não apresentam nenhuma tendência de evolução ordenada, constatação esta que é corroborada pelos resultados encontrados em Sohankar (1998). Além do número de Strouhal, em termos absolutos, pode-se perceber que o perfil circular apresentou em todos os casos simulados uma maior frequência de desprendimento de vórtices se comparado com o perfil quadrado.

No que se refere ao coeficiente de arrasto, mais uma vez o perfil circular apresentou resultados condizentes com a literatura, aonde o C_D tem uma tendência levemente decrescente na faixa de Re estudada, partindo de Re 100 até Re 1000. Os resultados para o perfil quadrado são um pouco menos otimistas, apenas dois resultados foram coerentes com o que era esperado. Apesar disso, pode-se perceber uma tendência dos coeficientes de arrasto para o perfil quadrado serem sempre superiores aos do perfil circular.

Em última análise, quando se pensa em observar a evolução do coeficiente de sustentação, constata-se que para ambos os perfis o comportamento é análogo. A amplitude máxima na zona de esteira desenvolvida do C_L sofre um pequeno aumento de Re 100 para Re 300 e depois uma queda de Re 300 para Re 500. Acredita-se que este pico de amplitude de C_L em Re 300 possa ser associado à zona de transição de esteira de vórtices. Em termos de amplitude, tanto o perfil circular quanto o quadrado não apresentaram diferenças significativas nos seus valores.

Capítulo 5

Conclusões

Em um primeiro momento, pôde-se verificar a partir da análise do campo de pressões que os vórtices estão associados a zonas de baixa pressão. O crescimento e desprendimento desses vórtices geram variações de pressão ao redor do cilindro e conseqüentemente da força resultante atuando sobre ele. A frequência com que esta força varia está diretamente associada à frequência de desprendimento dos vórtices.

Com a análise das linhas de corrente e do campo de velocidades, identificou-se o padrão alternado de desprendimento entre a parte superior e inferior a jusante do corpo. Também foi possível observar o formato da esteira de vórtices e como o aumento do Reynolds tem a tendência a afinar o seu perfil. Além disso, conseguiu-se identificar as regiões de recirculação de fluido na parede dos cilindros.

Por sua vez, a análise dos coeficientes de arrasto permitiu averiguar os efeitos da diferença de perfil nas forças de arrasto. Concluiu-se que no caso do um perfil mais harmonioso como o do cilindro circular os valores do coeficiente de arrasto são inferiores quando comparados com um perfil quadrado. No caso do perfil circular, também é possível observar uma leve redução no C_D com o aumento do Re .

A observação dos coeficientes de sustentação levou a conclusão de que este é o maior responsável pelos efeitos de vibração no corpo e que também determina a frequência desta vibração.

Quando observados os número de Strouhal, averiguou-se que para o perfil circular uma tendência crescente de evolução pode ser traçada em função do Re e que o mesmo não pôde ser feito para o perfil quadrado.

Em termos mais gerais, foi possível perceber a importância da compreensão do fenômeno físico e das condições e hipóteses utilizadas na construção do modelo numérico. Inclusive, neste estudo, conclui-se que o modelo numérico utilizado no perfil circular estava adequado para a faixa de Re estudada e que no caso do perfil quadrado, modificações precisariam ser feitas para os Re de 500 e 1000.

Como proposta para estudos futuros, ficaria a tentativa de melhoria no modelo numérico utilizado para as simulações do perfil quadrado, bem como a investigação dos resultados obtidos para os coeficientes de sustentação (em especial na zona de transição da esteira de vórtices).

Referências Bibliográficas

- Almeida, O., Mansur S. S., Silveira-Neto, A. On the flow past rectangular cylinders: Physical aspects and numerical simulation. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, v.7, n.1, p. 55-64, 2008.
- Breuer, M., Bernsdorf, J., Zeiser, T., Durst, F. Accurate computations of laminar flow past a square cylinder based on two different methods: lattice-Boltzmann and finite-volume. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v.21, p.186-196, 2000.
- CHAM, Disponível em, <<http://www.cham.co.uk>> , Acesso em: 02 Outubro de 2013.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. Introdução à mecânica dos fluidos. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 798p.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. Fundamentals of heat and mass transfer. 6 ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. Cap. 7: External Flow.
- Lienhard, J. H. Bulletin 300-Synopsis of lift, drag, and vortex frequency for rigid circular cylinders. Pullman: Washington State University, 1966. 32p.
- Norberg, C. Flow around rectangular cylinders: pressure, forces and wake frequencies. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v.49, p.187-196, 1993.
- Okajima, A. Strouhal numbers of rectangular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, v.123, p.379-398, 1982.
- Gera, B., Pavan, K. Sharma, Singh, R.K. CFD analysis of 2D unsteady flow around a square cylinder. *International Journal of Applied Engineering Research*, v.1, n.3, p.602-610, 2010.
- Sohankar, A., Davidson, L., Norberg, C. Vortex shedding: numerical simulation of unsteady flow around a square two-dimensional cylinder. *12th Australian Fluid Mechanics Conference*, p.517-520, 1995
- Sohankar, A., Davidson, L., Norberg, C. Application of different subgrid-scale models in large eddy simulation of flow around a square cylinder. Gothenburg: Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, 1998.