

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TYAGO FYLIPE VIEIRA PROENÇA

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS
ALINHADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

TYAGO FYLIPE VIEIRA PROENÇA

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS
ALINHADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS ALINHADOS
POR

TYAGO FYLIPE VIEIRA PROENÇA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado às 15 horas do dia 10 de dezembro de 2014 como requisito parcial para obtenção do título de ENGENHEIRO MECÂNICO, linha de pesquisa – Refrigeração, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____.

(aprovado, aprovado com restrições, ou reprovado)

Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo
(UTFPR)
orientador

Prof. Dr. Rubens Gallo
(UTFPR)

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço
(UTFPR)

A Deus primeiramente, por ter me concedido capacidade e condições para chegar até aqui.

Aos meus pais, Josias e Mercedes, pelo carinho, apoio, e amor irrestrito a mim durante essa jornada.

Aos meus irmãos, Cristiane, José Manoel, Joslaine, Josias Júnior, conselheiros e incentivadores.

Ao meu sobrinho, Pedro Lucas, algo mais valiosa que Deus me concedeu durante toda essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo o qual não mediu esforços afim de que esse trabalho pudesse ter sido concretizado.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio, por ter concedido a estrutura do Laboratório de Mecânica dos Flúidos para execução deste trabalho.

Aos demais docentes que indiretamente ou diretamente, colaboraram de alguma forma para a concretização deste objeto.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

PROENCA, Tyago Fylipe Vieira. Análise do escoamento ao redor de cilindros alinhados. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Este trabalho lida com o escoamento externo incompressível ao redor de dois cilindros alinhados rígidos e imóveis, através de simulações numéricas computacionais. Observa-se o comportamento do escoamento em função da variação dos números de Reynolds. O coeficiente de arrasto é calculado. Para este trabalho foi considerado três situações diferentes: distanciamento entre centros com 1.5 D, 3D e 5D.

Palavras-chave: Escoamento externo ao redor de dois cilindros. Desprendimento de vórtices. Coeficiente de arrasto

ABSTRACT

PROENCA, Tyago Fylipe Vieira. Análise do escoamento ao redor de cilindros alinhados. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This work deals with the external incompressible flow around two cylinders aligned rigid and immovable, using computational numerical simulations. Observe the behavior of the flow due to the variation of Reynolds numbers. The drag coefficient is calculated. For this work was considered three different situations: distance between centers with 1.5 D, 3D and 5D.

Keywords: External flow. Drag Coefficient. Cylinders in Tandem. Vortex shedding

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção “offshore” de petróleo.....	18
Figura 2. Trocador de calor Casco e Tubo.....	19
Figura 3. Túnel de vento.	26
Figura 4. Esquema do escoamento ao redor de cilindros alinhados. (CARMO,2005)	27
Figura 5. Esteiras observadas para o escoamento ao redor de um cilindro isolado (A) e pares de cilindros alinhados com espaçamentos 16D (B); 10,4D (C); 8,5D(D e E); 6,6D (F) e 3,6D (G) Extraído e adaptado de Thomas; Kraus (1964).....	28
Figura 6. Variação de St com o espaçamento para $Re=6,5 \times 10^4$	30
Figura 7. Regimes de interferência no escoamento ao redor de pares de cilindros alinhados. Reproduzido de Igarashi (1981).....	30
Figura 8. Variação do coeficiente de arrasto médio dos dois cilindros com o espaçamento, $Re=3,55 \times 10^4$	32
Figura 9. Cilindros distanciados a 1.5D.....	36
Figura 10. Cilindros distanciados a 3D.....	37
Figura 11. Cilindros distanciados a 1.5 D.....	37
Figura 12: Distribuição da componente u do vetor velocidade. a) para o caso 1.5 D. b) para o caso 3 D. c) para o caso 5 D.....	39
Figura 13: Distribuição de pressão. a) para o caso 1.5 D. b) para o caso 3 D. c) para o caso 5 D.	40
Figura 14: Distribuição de pressão para o caso 5 D..... Erro! Indicador não definido.	
Figura 15: Linhas de corrente de velocidade para caso de 1.5D.....	45
Figura 16: Detalhe da recirculação presente na região entre os dois cilindros, caso 1.5D.....	46
Figura 17: Campo de vorticidade, caso 1.5 D.	46
Figura 18: Linhas de corrente de velocidade para caso de 3D.....	47
Figura 19: Detalhe da recirculação presente na região entre os dois cilindros, caso 3D.....	48
Figura 20: Campo de vorticidade, caso 3D.	48
Figura 21: Linhas de corrente de velocidade para caso de 3D.	49

Figura 22: Detalhe da recirculação presente na região entre os dois cilindros, caso 5D.....	50
Figura 23: Campo de vorticidade, caso 5 D.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparações de resultados de C_D para o cilindro a montante, $Re=300$...51

Tabela 2: Comparações de resultados de CD para o cilindro a jusante, $Re=300$52

Tabela 3: Comparações de resultados de CD para o cilindro a montante, $Re=40$53

Tabela 4: Comparações de resultados de CD para o cilindro a jusante, $Re=40$53

Tabela 5: Comparações de resultados de CD para o cilindro a montante, $Re=100$..53

Tabela 6: Comparações de resultados de CD para o cilindro a jusante, $Re=100$ 53

LISTA DE SÍMBOLOS

Re	Número de Reynolds
L_{cc}	Distância entre centros
D	Diâmetro do cilindro
St	Número de Strouhal
U_{∞}	Velocidade do escoamento
C_D	Coefficiente de arrasto
ρ	Massa específica
A	Área da seção transversal
P	Pressão
V	Velocidade do escoamento

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÕES	16
2	OBJETIVOS	20
2.1	GERAL.....	20
2.2	ESPECÍFICOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRaFICA	21
3.1	O FENÔMENO DA INTERFERÊNCIA NO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS ALINHADOS	21
3.2	O ESCOAMENTO AO REDOR DE PARES DE CILINDROS ALINHADOS E O FENÔMENO DE INTERFERÊNCIA.....	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	ETAPAS PARA SOLUÇÃO.....	33
4.2	MALHA COMPUTACIONAL.....	33
4.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	34
4.4	DOMÍNIO DO ESCOAMENTO.....	34
4.5	PRÉ-PROCESSAMENTO, PROCESSAMENTO E PÓS- PROCESSAMENTO	35
4.6	MALHAS	36
5	Resultados	38
5.1	CAMPOS DE PRESSÃO E VELOCIDADE PARA $Re = 100$, REGIME PERMANENTE	38
5.2	COEFICIENTE DE ARRASTO.....	41
5.2.1	Cilindro a montante e a jusante $Re = 25$, regime transiente	42
5.2.2	Cilindro a montante e a jusante $Re = 40$, regime transiente	42
5.2.3	Cilindro a montante $re=300$	43
5.2.4	Cilindro a jusante $Re=300$	44
	Para $l_{cc} = 1.5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 67,65 N$. Logo, o $C_d = 1,35$	44

Para $l_{cc} = 3 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 37.48 N$. Logo, o $C_d = 0,75$.	44
Para $l_{cc} = 5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 59,43 N$. Logo, o $C_d = 1,19$.	44
5.2.5 Cilindro a montante e a jusante $Re = 100$, regime transiente	44
5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM A LITERATURA	51
6 Conclusão	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O escoamento ao redor de corpos rombudos apresenta uma vasta aplicação na engenharia. Trata-se de um problema muito abordado na mecânica dos fluidos. Alguns exemplos práticos de escoamentos ao redor de formas rombudas são: pilares de pontes de engenharia civil; tirantes e longarinas de asas de engenharia aeronáutica; de elementos externos de automóveis; linhas de ancoragem da engenharia naval, dentre outros.

Nos últimos anos, muitos estudos foram realizados sobre escoamento ao redor de corpos cilíndricos, seja com metodologias computacionais ou experimentais. Entretanto, existe uma carência quanto ao estudo focado em agrupamentos de cilindros, haja visto que a maior parte destes são baseados em um cilindro isolado. Surge então a necessidade e interesse do aprofundamento neste estudo.

A presença de mais de um corpo no estudo convencional de escoamento incompressível, interfere consideravelmente nos resultados antes obtidos. Mudanças tanto nas características das forças impostas nos corpos pelo fluido quanto no campo de velocidades são notórias. Trata-se, portanto, em um estudo mais completo e complexo, podendo obter um entendimento melhor dos fenômenos de desprendimento de vórtices, das forças fluidas e distribuição tanto de velocidade como pressão.

O grande desafio, então, é a partir desses resultados obtidos com corpos e situações simplificadas, poder relacioná-los com a dinâmica entre o fluido e uma estrutura usada na prática. Isso tem sido uma motivação há muitos anos na Dinâmica dos Fluidos. Obter um estudo fundamental de qualidade é primordial para que esses objetivos sejam alcançados. Como estão presentes na maior parte das estruturas de interesse, os cilindros são modelos elementares utilizados nestes estudos.

Neste trabalho faremos um estudo e uma abordagem no escoamento externo ao redor de cilindros alinhados, a fim de verificar as relações de causalidade entre características físicas do escoamento, além das mudanças dos campos de forças e no campo fluido com as variações do número de Reynolds (Re) e da distância entre os cilindros. Para isso lançaremos mão da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) através da qual, segundo Carmo (2005) o escoamento pode ser estudado com maior detalhamento, pois tem acesso a todas as variáveis envolvidas no fenômeno. Desse modo, conhecimento fundamental pode ser adquirido investigando detalhadamente os resultados numéricos das variáveis de interesse e através de análises paramétricas.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÕES

Na mecânica dos fluidos, frequentemente, fenômenos decorrentes do movimento de um fluido viscoso nas vizinhanças de um corpo ou arranjo deste possuem uma compreensão complexa. Casos como da camada limite instável, separação, esteira de Von Kármán são exemplos destas situações. A fim de estudar esses problemas surge a Dinâmica dos Fluidos, a qual inicialmente lançou mão de experimentos em túneis de vento ou em canais fluidodinâmicos para tentar responder a algumas questões relevantes da engenharia.

Nos últimos anos uma nova ferramenta tem ganhado espaço para auxiliar nessa tarefa: a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). Segundo Moraes, 2011, o objetivo primordial da DFC é o de modelar física e matematicamente meios contínuos usando equações diferenciais parciais e depois discretizá-las em sistemas de equações algébricas. Estes sistemas de equações devem ser resolvidos para validar as equações e, assim, resolver um projeto baseado em simulações numéricas, ao invés de se construir e testar modelos. O uso de computadores de alto desempenho é importante, por exemplo, para a simulação numérica refinada de fenômenos físicos de fluidos que são difíceis de serem mensurados por experimentos, a saber: simulações em escala (navios e aeronaves em escala real), situações de risco (explosões, radiações, poluição), física (previsão do tempo, camada limite planetária, evolução estelar), etc.

O problema do escoamento ao redor de um cilindro, apesar de ser clássico na Dinâmica dos Fluidos, esta ainda longe de ser completamente entendido. Principalmente o fenômeno de vibrações induzidas pelo escoamento (V.I.E.). Moraes, 2011, cita que o fenômeno de Vibrações Induzidas pelo Escoamento (V.I.E.) se manifesta principalmente quando uma estrutura cilíndrica fica exposta a uma passagem de escoamento, que interage com a estrutura e provoca vibrações transversais e paralelas em relação à direção do próprio escoamento. Um caso particular de vibração é identificado quando a força hidrodinâmica responsável pela vibração origina-se da distribuição de pressão ao redor da superfície do corpo devido à geração e desprendimento de estruturas vorticiais contra-rotativas (é comum chamar as regiões do domínio fluido com vorticidade concentrada simplesmente de vórtices). Este caso particular é conhecido como Vibrações Induzidas por Vórtices (V.I.V.) e está presente, por exemplo, nos *risers*, nos trocadores de calor do tipo casco e tubos e em cabos de torre de transmissão de eletricidade. Outro fenômeno é uma instabilidade hidroelástica conhecida por *galloping*, que ocorre em corpos rombudos com ponto de separação fixo ou em corpos rombudos onde há o desenvolvimento das forças hidrodinâmicas em fase com o movimento da estrutura. Combinações entre estes dois fenômenos também podem ser identificadas.

Dois exemplos motivadores para este trabalho são: os *risers* e trocadores de calor tipo casco e tubos os quais apresentam uma configuração muito próxima do tema proposto.

O primeiro caso está muito presente na engenharia petrolífera. Como exemplifica Moraes, 2011, Na engenharia *offshore* (abrange os sistemas oceânicos que estão afastados da costa) adota-se a nomenclatura *riser* para o trecho do duto que fica suspenso e a nomenclatura duto submarino (*pipeline, flowline*) para o trecho que fica em contato com o solo marinho. Geralmente os *risers* são compostos por mais de 40 tubos juntos, cada um possuindo de 20 a 50 cm de diâmetro. Estes tubos comportam-se como linhas flexíveis quando atingem águas mais profundas.

Na figura 1 podemos observar de *risers* e dutos marinhos.

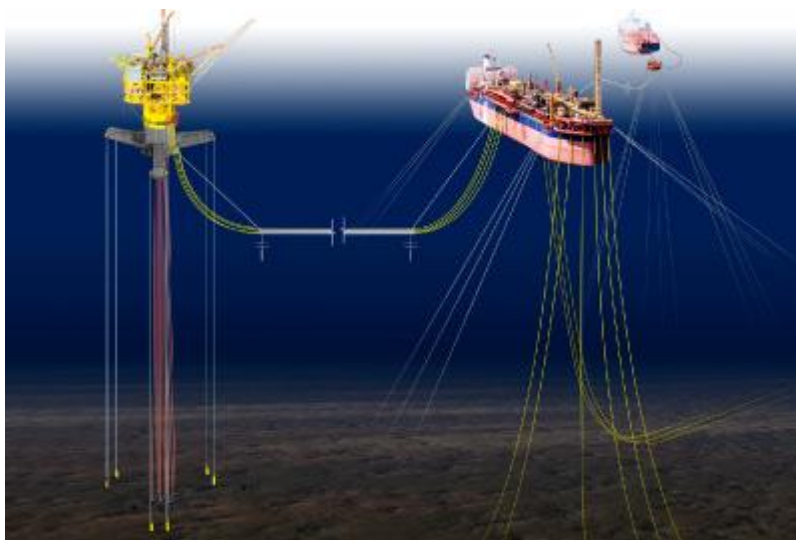


Figura 1. Produção “offshore” de petróleo
Fonte: <http://www.atlantia.com/seastar/>

Uma segunda situação está presente em torres de transmissão de eletricidade. As quais utilizam trocadores de casco e tubos para realização do resfriamento necessário. Este que também apresenta outras aplicações na Engenharia tais como nas indústrias químicas, petroquímicas, alimentícia e de geração de energia, assim como os *risers*, também apresentam uma configuração física muito próxima do interesse neste trabalho. Portanto o estudo do escoamento ao redor de cilindros alinhados possui uma série de aplicações práticas de grande interesse para área acadêmica e industrial. Um exemplo de trocador de calor de casco e tubos está presente na Figura 2.



Figura 2. Trocador de calor Casco e Tubo
Fonte: <http://www.offimar.com.br/trocador-de-calor.php>

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

- O objetivo deste estudo consiste em analisar o escoamento incompressível ao redor de cilindros rígidos e imóveis, alinhados em relação a uma corrente uniforme.
- Determinar o coeficiente de arrasto sobre o cilindro a montante e a jusante.

2.2 ESPECÍFICOS

- Verificar as relações de causalidade entre características físicas do escoamento e as mudanças nas forças e no campo fluido com o número de Reynolds (Re) e com espaçamento;
- Comparar os resultados obtidos com a literatura;
- Observar a dinâmica da esteira na região entre os dois cilindros alinhados, em função do número de Reynolds e do espaçamento entre os corpos;
- Observar o comportamento da esteira com o caso convencional de um cilindro isolado.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O objetivo desta revisão bibliográfica é apresentar um histórico do conhecimento adquirido a respeito do objeto de estudo deste trabalho. Os conteúdos destes artigos são apresentados de formas sucintas, caso o leitor possua o interesse de aprofundar a respeito, poderá fazê-lo consultando tais referências. Basicamente aqui trata-se do fenômeno da interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados.

3.1 O FENÔMENO DA INTERFERÊNCIA NO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS ALINHADOS

Os primeiros estudos deste tema remontam da primeira metade do século XX, motivados principalmente pela avaliação do arrasto em componentes de aviões biplanos, utilizando números de Reynolds altos. Em meio aos arranjos testados está o arranjo alinhado. Para essa configuração, entre as conclusões tiradas pelos autores estão o fato do arrasto do cilindro a jusante diminuir com a presença do cilindro a montante, este que não tem o arrasto significativamente afetado pelo segundo cilindro. Verificaram-se também diferentes regimes de acordo com o espaçamento: maiores do que 4 diâmetros, a magnitude do arrasto de interferência não sofre grandes mudanças; menores do que 4 diâmetros, o arrasto do cilindro a jusante decresce rapidamente com a diminuição do espaçamento; menores do que 3 diâmetros o arrasto torna-se negativo.

Em meados da década de 60, estudos foram constituídos basicamente de ensaios em túneis de vento para Re baixos, com visualização através de técnicas que utilizam fumaça. Nesta época Thomas; Kraus (1964, apud Carmo, 2005, p.15) realizou um trabalho relevante, onde o escoamento ao redor de cilindros lado a lado e alinhados é visualizado em túnel de vento. Os autores apresentaram a comparação de visualizações do escoamento ao redor de cilindros alinhados em diferentes espaçamentos para $Re=62$. Concluíram que os vórtices depois do cilindro a jusante sofrem contração, expansão, cancelamento ou coalescência, conforme a variação de espaçamento entre centros.

Zdravkovich (1972 apud Carmo, 2005, p.16) estudou o escoamento para cilindros alinhados, para $40 < Re < 250$. São realizados ensaios em túnel de vento e

com esses dados inferências sobre a transição para a turbulência na esteira são delineadas. Ele concluiu que para espaçamentos entre 8 e 12 diâmetros a transição para a turbulência é antecipada, comparativamente ao caso de um cilindro isolado. Entretanto para espaçamentos entre 4 e 8 diâmetros, a transição ocorre em ambos os casos de forma igual, porém a esteira se forma a uma distância maior no escoamento ao redor do par de cilindros. Já para espaçamentos menores do que 4 diâmetros, a transição é adiada conforme Re , e este adiamento é tanto maior quanto menor for o espaçamento. Fica evidente que o segundo cilindro muda completamente o escoamento, tanto nas proximidades dos corpos, como também na esteira produzida. O mesmo autor, fez uma análise das pesquisas sobre o escoamento ao redor de pares de cilindros publicadas até então. Ele ratificou que quando os dois cilindros estão próximos, ocorre uma alteração drástica do escoamento ao redor deles e produz distribuições de pressão substancialmente diferentes do caso de cilindro isolado, interferindo na emissão de vórtices. No que tange a configuração de cilindros alinhados, esta revisão foca-se principalmente na descontinuidade do fenômeno de emissão de vórtices que aparece para um espaçamento que o autor denomina espaçamento crítico. Esta descontinuidade manifesta-se nas medições de coeficiente de arrasto em ambos os cilindros, assim como nas pressões de base (medida no ponto mais a jusante dos cilindros) e na pressão de *gap* (medida no ponto mais a montante do cilindro a jusante). Ela é causada por uma mudança abrupta de um padrão estável de escoamento para outro, a partir de um dado espaçamento. Os efeitos do número de Reynolds e rugosidade superficial também são abordados.

Estudos foram realizados por Igarashi (1981 apud Carmo, 2005, p.17,) a respeito do tema em questão. Ele apresentou resultados de ensaios realizados em túneis de vento afim de investigar os fenômenos presentes no escoamento ao redor de cilindros alinhados. Seu estudo foi realizado com trocadores de calor do tipo banco de tubos, pelos quais possuía um desejo de investigar os fenômenos presentes. O autor utilizou em seus ensaios Re variando entre $8,7 \times 10^3$ e $5,2 \times 10^4$, e os espaçamentos l_{cc} (distância entre os centros dos cilindros) variaram entre 1,03 e 5,00. Os resultados são apresentados de forma bastante detalhada, com a medição de diversas grandezas, tais como coeficiente de arrasto, distribuição do coeficiente de pressão médio pela superfície dos corpos, número de Strouhal, flutuação de velocidade na esteira e flutuação de pressão nas paredes dos corpos,

além da utilização de técnicas de visualização. O autor após realizado os experimentos e tendo em mãos os resultados, avalia atributos interessantes, tais como o ponto de adesão da camada cisalhante advinda do cilindro a montante no cilindro a jusante, a dependência em relação a Re para certos espaçamentos e a existência de diversos padrões de escoamento de acordo com o espaçamento, dado um Re .

Arie et al. (1983 apud Carmo, 2005, p.17) apresentam medições da flutuação da pressão na superfície de cilindros dispostos em arranjos alinhados para Re pré-crítico de valor $1,57 \times 10^5$. Grandezas como valores RMS da sustentação e arrasto e correlações longitudinais e circunferenciais são apresentados. Dentre as principais conclusões está o fato da flutuação das grandezas no cilindro a jusante ser muito maior do que a flutuação no cilindro a montante até um espaçamento de 7 diâmetros. Após este espaçamento, os valores para ambos os corpos diferem minimamente daqueles encontrados para cilindro isolado. Uma outra observação importante é o salto da correlação longitudinal do RMS do sinal de pressão no espaçamento crítico. Para espaçamentos maiores do que esse, o valor de correlação de cilindro isolado é recuperado. Alguns resultados dispostos neste trabalho diferem dos apresentados em Igarashi (1981 apud Carmo, 2005, p.17) principalmente por se tratar de um regime pré-crítico de Reynolds, enquanto que no trabalho anterior os Re eram mais baixos.

Um artigo foi publicado por Zdravkovich (1987 apud Carmo, 2005, p.17) a fim de verificar a interferência entre cilindros imersos em escoamento. Neste trabalho ficou evidenciado o interesse do autor de categorizar os arranjos em *clusters* de cilindros, que também classificou as maneiras de interferência em escoamentos ao redor de pares de cilindros e que, por fim, obteve os resultados experimentais de escoamento em *clusters*. O estudo específico do escoamento ao redor de cilindros alinhados, o qual é objeto deste estudo, foi observado pelo autor de maneira que diversos regimes de escoamentos fossem manifestados. Tal fenômeno apresentou características diversas conforme a variação entre centros e Re adotados nos experimentos.

Os autores Slaouti; Stansby (1992 apud Carmo, 2005, p.18) apresentam resultados de mesmo interesse deste trabalho. Eles lançaram mão de simulações computacionais bidimensionais nos casos de cilindros alinhados e lado a lado. O método utilizado é o método de vórtices discretos e as simulações foram feitas para

diversos espaçamentos com $Re=200$. Para o primeiro caso, o principal foco é na observação dos diferentes padrões de escoamento de acordo com a variação do espaçamento, conforme observado em Zdravkovich (1987 apud Carmo, 2005, p.18). Em seguida com o espaçamento entre os cilindros maior do que o crítico, os autores idealizam uma hipótese para o mecanismo de sincronização dos números de Strouhal e intensificação da sustentação para o cilindro a jusante. Os resultados obtidos foram muito próximos dos dados experimentais, avaliando de forma qualitativa. Já de forma quantitativa eles diferem significativamente. Isto porque para o Re testado já há a presença de tridimensionalidades importantes no escoamento

Wu et al. (1994, apud Carmo, 2005, p.18) apresenta um estudo observando características tridimensionais do escoamento com a presença de um segundo cilindro alinhado. Neste trabalho, ensaios em túneis de vento e de água foram realizados para $Re=4,2 \times 10^4$ e $Re=1,7 \times 10^4$, utilizando-se técnicas de visualização e anemometria de fio quente para poder obter uma análise mais sucinta dos aspectos tridimensionais do fenômeno. Os resultados mostram que a coerência num certo ponto o plano $x-y$ tende a decrescer com o aumento da distância longitudinal entre os pontos. Foram verificados diversos espaçamentos, na região entre os cilindros e na região a jusante do segundo cilindro, observou-se que para espaçamentos menores do que o crítico a coerência é maior do que no caso de cilindro isolado. Para espaçamentos maiores que o crítico, há a formação de estruturas tridimensionais na região entre os corpos e a coerência nesse local se aproxima daquela encontrada no caso de cilindro isolado, enquanto que na esteira a jusante do segundo corpo ela é menor do que o caso de cilindro isolado. Estas hipóteses são suportadas tanto pelas medições quantitativas realizadas com os anemômetros quanto qualitativamente pelas visualizações realizadas no túnel de água com bolhas de hidrogênio.

Mittal; Kumar; Raghuvanshi (1997, apud Carmo, 2005, p.19) realizaram uma simulação computacional para estudar o escoamento ao redor de cilindros alinhados com espaçamentos entre centros de 2,5 e 5,5 diâmetros, e $Re=100$ e $Re=1000$. Eles observaram certas discrepâncias com resultados experimentais e fenômenos de tridimensionalidades importantes no escoamento utilizando $Re=1000$, entretanto algumas propriedades obtidas foram próximas as observadas em outras simulações bidimensionais. Para $Re=100$, foi observado que não houve emissão de vórtices em uma situação de espaçamento com 2,5 D. Ao contrário, com $Re=1000$, houve um

desprendimento de vórtices mais elevado e desorganizado, evidenciando a influência no escoamento da presença de outro corpo rombudo na região da esteira próxima.

Um estudo numérico do fenômeno de interferência no escoamento foi realizado por Meneghini et al. (2001, apud Carmo, 2005, p.19). Nesta ocasião foi observado os casos onde pares de cilindros são posicionados de forma alinhada e lado a lado com o escoamento. Foi utilizado o método de elementos finitos nas simulações bidimensionais do escoamento. Os resultados obtidos com o caso dos cilindros alinhados foram muito próximos às observações feitas por Zdravkovich (1987, apud Carmo, 2005, p.19), principalmente no que se refere ao fenômeno de inversão de arrasto, sendo que para as simulações foram usados diversas situações de espaçamentos variando o número de Reynolds (100 e 200). Observações interessantes como a diferença significativa do comprimento de formação entre os casos de pequeno espaçamento e o caso de cilindro isolado, e também a diferença existente entre os números de Strouhal observados para o cilindro isolado e para pares de cilindros. Observa-se, entretanto que os resultados obtidos do trabalho foram limitados devido às simulações serem bidimensionais.

Lin; Yang; Rockwell (2002, apud Carmo, 2005, p.20) fizeram experimentos com o fenômeno de dois cilindros alinhados analisando-se espaçamentos de 1,15; 1,5; 2,0 e 5,1 diâmetros e o número de Reynolds é igual a 10.000, preocupando-se mais com a região entre os cilindros e próxima ao cilindro a jusante. Para os espaçamentos de $1,5D$ e $2,0D$, concentrações de vorticidade atingem o segundo corpo e influenciam diretamente a esteira deste último. Na região entre os cilindros, há regiões de recirculação cuja configuração alterna entre simétrica e assimétrica. Observou-se que de uma maneira geral nesta situação o escoamento apresenta características distintas do caso de escoamento ao redor de um cilindro isolado, principalmente se tratando das emissões de vórtices. Um caso bem particular foi observado para o espaçamento $5,1 D$. Aqui ocorre uma formação completa de vórtices de von Kármán, entre os dois cilindros. Comparativamente ao cilindro isolado, a esteira neste caso é mais larga e as tensões de Reynolds são maiores. Trata-se, portanto, de um estudo mais complexo ao que já fora visto anteriormente.

Ensaio em túnel de vento foram realizados por Mahbub Alam et al. (2003, apud Carmo, 2005, p.20) do escoamento ao redor de cilindros alinhados com $Re=6,5 \times 10^4$. Neste trabalho houve o intuito de observar diversas características do

escoamento conforme visto anteriormente em outras publicações, lançando mão de uma análise mais minuciosa do escoamento aerodinâmico em questão, empregando técnicas que não foram até então utilizadas nos trabalhos disponíveis na literatura. O estudo ratificou algo que, conforme dito, fora observado por outros pesquisadores: a dependência do arrasto no cilindro a jusante em relação ao espaçamento. Neste ponto deve-se salientar que principalmente antes do espaçamento crítico, esta dependência se manifesta de forma mais proporcional, ou seja na região onde o espaçamento é $3,0D$. No caso contrário, ou melhor, para espaçamentos maiores que o crítico, a flutuação da sustentação atuando no cilindro a montante é estritamente influenciada pela fase de emissão de vórtices no cilindro a jusante.



Figura 3. Túnel de vento.
Fonte: Laboratório de Engenharia Aeronáutica do ITA

3.2 O ESCOAMENTO AO REDOR DE PARES DE CILINDROS ALINHADOS E O FENÔMENO DE INTERFERÊNCIA

Neste capítulo apresenta-se alguns conceitos sedimentados na literatura a respeito das características do escoamento ao redor de pares de cilindros alinhados, objeto de estudo deste trabalho.

Na Figura 4, vemos uma situação genérica abrangida neste trabalho. A esquematização dos dois cilindros alinhados com o mesmo diâmetro, denominado D . O cilindro 1 se trata do cilindro mais a montante no escoamento e o cilindro 2 se trata do cilindro mais a jusante no escoamento. L_{cc} é a distância entre centro destes dois corpos, dada em função de D , também denominada espaçamento.

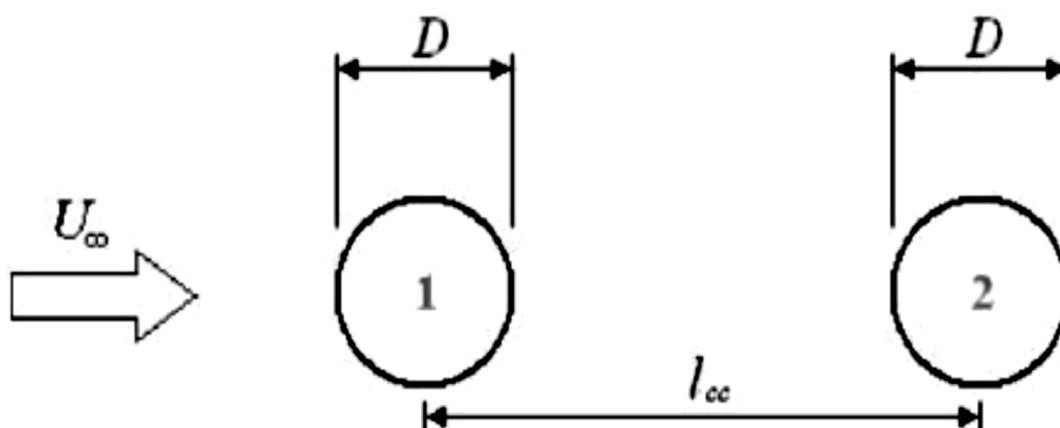


Figura 4. Esquema do escoamento ao redor de cilindros alinhados. (CARMO,2005)

Ao estudar esse caso, observamos o fenômeno da *interferência*, o qual causa variações em algumas propriedades do escoamento comparativamente aquelas em que temos na situação de um cilindro isolado. Tais propriedades são: estruturas da esteira, limiares de transição, esforços nos cilindros, St e distribuição de pressão.

A interferência segundo Carmo (2005) é:

A interferência num escoamento pode ser de dois tipos: de proximidade ou de esteira. O primeiro acontece basicamente porque as regiões de escoamento perturbado de cada corpo se interceptam, sem que um corpo esteja na região de esteira do outro. É esse o tipo de interferência observada em escoamentos ao redor de pares de cilindros dispostos lado a lado. Já a interferência de esteira se dá quando um corpo está imerso na esteira de outro corpo, que é o caso específico de pares de cilindros alinhados. Há ainda a possibilidade da coexistência dos dois tipos de interferência, como no caso de arranjos oblíquos (CARMO, 2005,p.54).

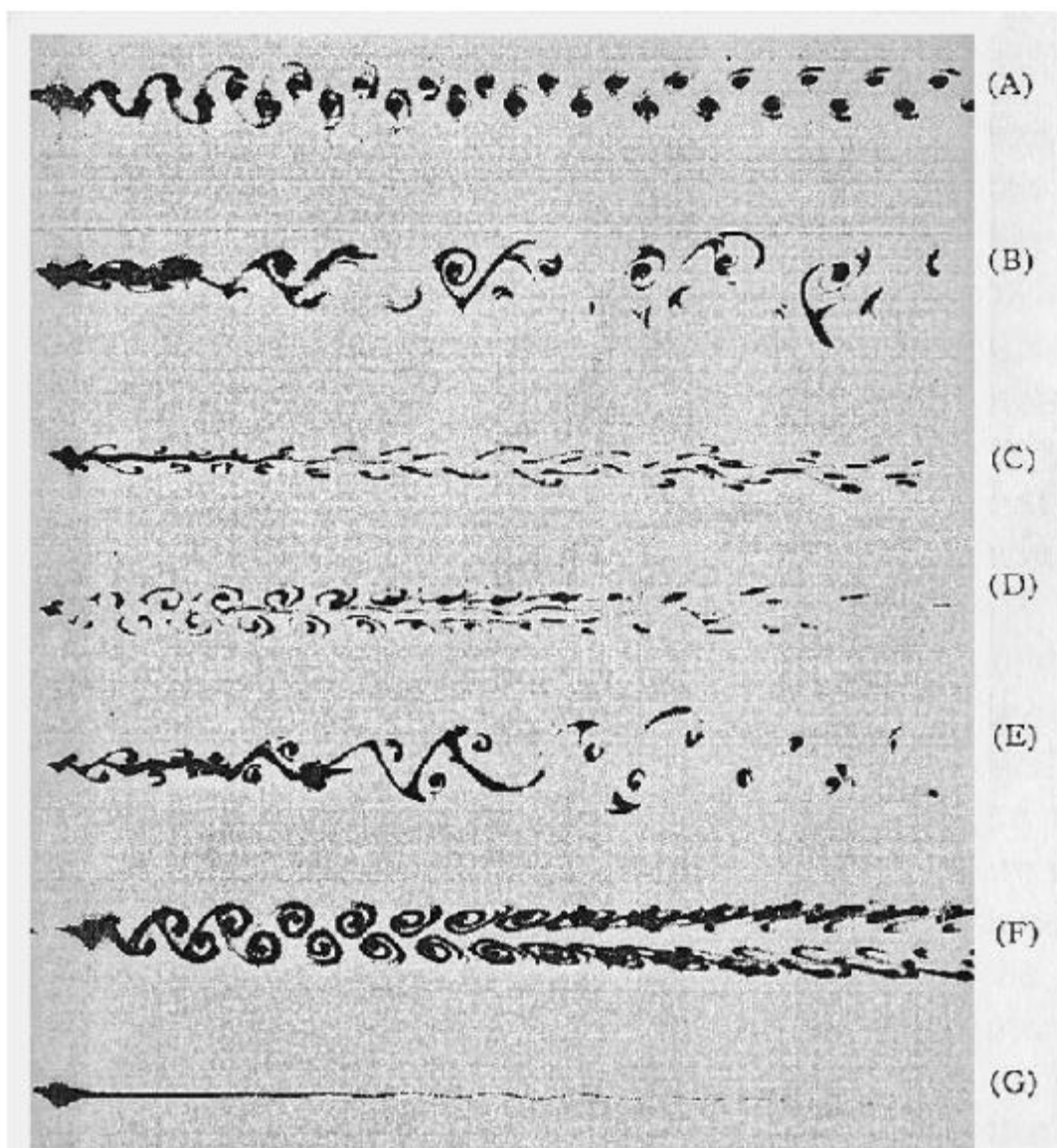


Figura 5. Esteiras observadas para o escoamento ao redor de um cilindro isolado (A) e pares de cilindros alinhados com espaçamentos 16D (B); 10,4D (C); 8,5D(D e E); 6,6D (F) e 3,6D (G) Extraído e adaptado de Thomas; Kraus (1964).

Alguns aspectos importantes do escoamento ao redor de dois cilindros serão analisados mais especificamente a seguir. A Figura 5 mostra a mudança das estruturas observadas na esteira para um escoamento ao redor de um par de cilindros alinhados, com $Re=62$ e diferentes espaçamentos. Pode-se perceber que a presença do segundo cilindro na região de formação pode promover um atraso do início do regime laminar periódico (esteira G). Quando observado a presença de um regime bi-estável, no caso $l_{cc}=8,5$, duas esteiras diferentes são manifestadas. Observando a variação de St com o espaçamento, disposta na Figura 6, vê-se que este adimensional é bastante sensível à interferência. Um aspecto interessante na curva apresentada é o salto descontínuo que existe para $l_{cc}=3,1$. Para espaçamentos menores do que este, o St medido é muito menor do que o observado para o cilindro isolado. Para espaçamentos maiores do que 3,1 as curvas para ambos os cilindros começam a se aproximar do valor encontrado para o cilindro isolado. Outro ponto importante é que os valores de St dos dois cilindros são bastante próximos e seguem a mesma tendência, evidenciando uma sincronização de frequências nas emissões de vórtices. As curvas observadas para outros Re apresentam o mesmo comportamento, sendo que o valor de l_{cc} da descontinuidade muda. (CARMO, 2005).

O comportamento da curva $St \times l_{cc}$ está intimamente ligado a diferentes regimes de interferência. Esses regimes foram classificados em vários trabalhos publicados na literatura especializada (Igarashi, 1981; Zdravkovich, 1987), sendo que as classificações são bastante semelhantes. São identificados seis diferentes regimes de interferência (CARMO, 2005).

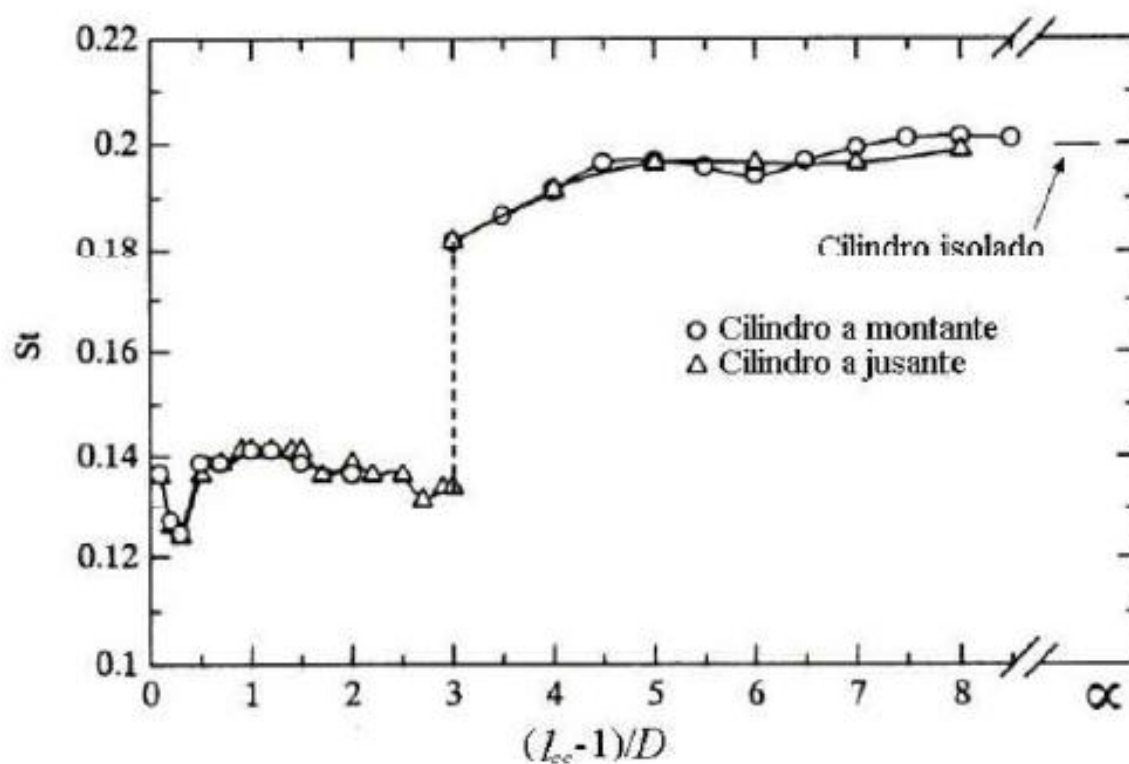


Figura 6. Variação de St com o espaçamento para $Re=6,5 \times 10^4$
 Extraído e adaptado de Mahbub Alam et al. (2003).

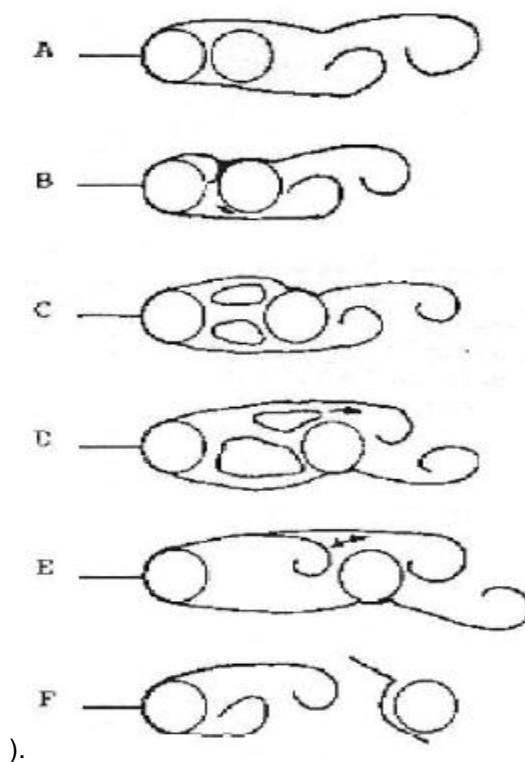


Figura 7. Regimes de interferência no escoamento ao redor de pares de cilindros alinhados.
 Reproduzido de Igarashi (1981).

Na Figura 7, é apresentado os diversos tipos de escoamento ao redor de dois cilindros. Para cada situação, fenômenos visuais e físicos se manifestam. Uma melhor explicação de cada caso é abordada a seguir:

A) As camadas cisalhantes livres vindas da separação do cilindro a montante não re-aderem à superfície do segundo cilindro. Apenas uma esteira é formada.

B) As camadas cisalhantes do primeiro cilindro são capturadas pelo segundo, mas não há a formação de vórtices no espaço entre os corpos. Também aqui apenas uma esteira pode ser identificada.

C) Vórtices simétricos são formados entre os cilindros.

D) Os vórtices simétricos tornam-se instáveis, passando a crescer e diminuir de forma alternada nas proximidades do segundo cilindro.

E) A camada cisalhante do cilindro a montante se enrola bem próximo do segundo cilindro. Este regime é um estado bi-estável na transição entre os regimes D e F.

F) A região da esteira próxima do primeiro cilindro termina antes do segundo corpo e vórtices passam a serem formados nesta região de maneira regular. A esteira formada após o segundo cilindro é chamada binária, porque cada vórtice é formado pela combinação de um vórtice emitido pelo cilindro a montante e um outro pelo cilindro a jusante (CARMO, 2005, p.56).

Do regime A ao D, o coeficiente de arrasto no cilindro a jusante é consideravelmente menor do que no cilindro a montante. Isto pode ser entendido ao se notar que para estes casos o cilindro a jusante está dentro de uma região de baixa pressão da esteira próxima formada pelo outro corpo. O arrasto do segundo cilindro nestes casos normalmente é negativo. Assim sobre o segundo cilindro está agindo uma força resultante com sentido contrário a direção proporcionada pelo escoamento. A Figura 8 mostra a variação do coeficiente de arrasto médio com o espaçamento, para $Re=3,55 \times 10^4$. Perceba que neste caso ocorre um salto descontínuo neste gráfico. Este salto representa o momento em que a força de arrasto muda de módulo, ou seja, se torna positiva. Também, esse espaçamento pode ser denominado como crítico devido a essa característica. Por fim, observa-se no coeficiente de arrasto um acréscimo com a variação no número de Reynolds.

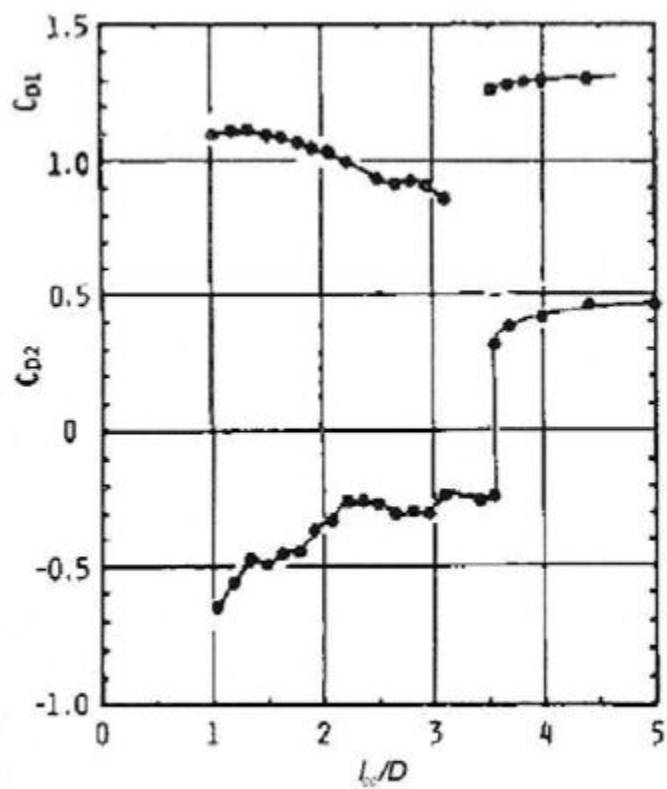


Figura 8. Variação do coeficiente de arrasto médio dos dois cilindros com o espaçamento, $Re=3,55 \times 10^4$

Extraído e adaptado de Igarashi (1981).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ETAPAS PARA SOLUÇÃO

Devem-se seguir as seguintes etapas para resolução das equações de continuidade e de Navier-Stokes numericamente através dos métodos de volumes finitos:

- a) Malha: Em primeiro lugar deve ser gerada uma malha computacional, esta deve possuir boa qualidade a fim de se obter uma solução coerente com a DFC;
- b) Condições de contorno: devem ser especificadas para arestas (Bidimensionais) e para as faces (Tridimensionais) que delimitam o domínio a ser simulado;
- c) Parâmetros numéricos e algoritmos: as quais proporcionarão os resultados
- d) Fluido: propriedades físicas (temperatura, massa específica, viscosidade)
- e) Solução final: uma infinidade de iterações são necessárias para convergir a uma solução final a problematização do escoamento, e os resíduos (soma dos termos da equação de Navier-Stokes colocados em algum da lado da igualdade) podem diminuir em várias ordens de grandeza. (Çengel, 2007).
- f) Pós processamento: processo final pelo qual podemos visualizar melhor o escoamento

4.2 MALHA COMPUTACIONAL

Uma malha computacional segundo Frari;Pedroso (2009):

Uma malha computacional é constituída por linhas e pontos, os pontos são considerados onde essas linhas se interceptam e servem de orientação para o cálculo de propriedades físicas baseado num modelo matemático. Uma malha computacional nada mais é que uma representação ou a “discretização” do plano físico utilizado na simulação

numérica. A solução de um sistema de equações diferenciais (modelo matemático) pode ser geralmente simples quando empregado uma malha bem construída. (FRARI;PEDROSO, 2009,p.2)

Quanto à classificação das malhas, uma malha dita estruturada é quando cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos e a numeração dos mesmos tem uma sequência natural. E quando se diz que uma malha é não-estruturada, temos o número de vizinhos variando de volume para volume, ficando difícil estabelecer uma regra de ordenação (FRARI;PEDROSO, 2009)

4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Basicamente temos as seguintes condições de contorno:

- a) De parede: é a situação em que o fluido está em contato direto com a parede, neste caso a caso a velocidade do fluido na face se torna igual a velocidade da parede.
- b) De entrada e de saída: na face de entrada geralmente é considerado a própria velocidade de escoamento do fluido. Na saída do domínio computacional, considerando-se uma condição de pressão prescrita, a pressão estática se faz presente, sendo que esta pode ser considerada a própria pressão atmosférica, ou simplesmente uma pressão nula, uma vez que na solução, de forma geral, estamos interessados apenas na variação da pressão e não na pressão absoluta.
- c) Condição de contorno periódica: assume-se periodicidade entre determinadas faces, ou seja, o fluxo de saída de uma face é considerado como sendo o fluxo de entrada em outra face;
- d) Condição de contorno de simetria: a condição de simetria garante que não exista um fluxo normal à face, no entanto, permite o fluxo tangencial à mesma.

4.4 DOMÍNIO DO ESCOAMENTO

Foram adotadas neste trabalho as mesmas condições do trabalho de Carmo (2005). O domínio na direção do escoamento variou de $-36 D$ a $45 D$, onde D é o diâmetro do cilindro ($D=1$ m) que é constante. Na direção transversal ao escoamento, o domínio variou de -50 a 50 . Em todos os casos o centro do cilindro a montante foi posicionado no ponto: $x = 0$ m e $y = 0$ m.

Seguindo a normatização descrita anteriormente, na entrada do escoamento foi utilizado uma condição de contorno de entrada (lado esquerdo do domínio), com velocidade variando de 1 a 10 m/s (constante em cada simulação) de tal forma que quando combinada com as propriedades adotadas para o fluido (viscosidade e massa específica) resultava no número de Reynolds desejado. Na saída foi utilizada a condição de contorno de saída (pressão prescrita onde a pressão foi considerada nula), no lado esquerdo do domínio da malha. Optou-se por esta condição de contorno devido a sua robustez, uma vez que a mesma não assume gradientes nulos na direção perpendicular à direção do escoamento, como ocorre por exemplo na condição de outflow (saída do escoamento).

As malhas geradas possuem um elemento na terceira dimensão, porque o código computacional utilizado, denominado (UNSYFL3D) foi concebido para analisar escoamentos tridimensionais. Logo, nas faces frontal e traseira do domínio foi adotada a condição de contorno de simetria.

Os casos de escoamento ao redor dos cilindros alinhados foram analisados em três situações distintas: o primeiro caso quando a distância entre centros é $1.5D$; a segunda situação onde os cilindros se distanciam de $3D$, e por fim, a terceira situação onde a distância entre centros é igual a $5D$.

4.5 PRÉ-PROCESSAMENTO, PROCESSAMENTO E PÓS-PROCESSAMENTO

- a) Pré-processamento: todas as malhas não estruturadas foram geradas pelo software comercial Ansys ICEM CFD. Foram elaboradas 9 malhas (variando o número de elementos de 50, 100 e 200 mil elementos para cada uma das três situações descritas)
- b) Processamento: foi utilizado o código computacional UNSYFL3D (não comercial), o qual foi disponibilizado para uso neste trabalho pelo

Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

- c) Pós-processamento: para a visualização dos campos de pressão e perfis de velocidade, foi utilizado o software gratuito VisIt, disponibilizado em: <https://wci.llnl.gov/codes/visit/>

4.6 MALHAS

Nas figuras 10,11 e 12, temos as malhas geradas para o estudo do escoamento ao redor de cilindros alinhados. Nas quais, podemos observar um maior refinamento dos elementos próximos do cilindro e nas esteiras. Todas as malhas obtiveram uma qualidade considerável, com determinante de qualidade próximo a 1.

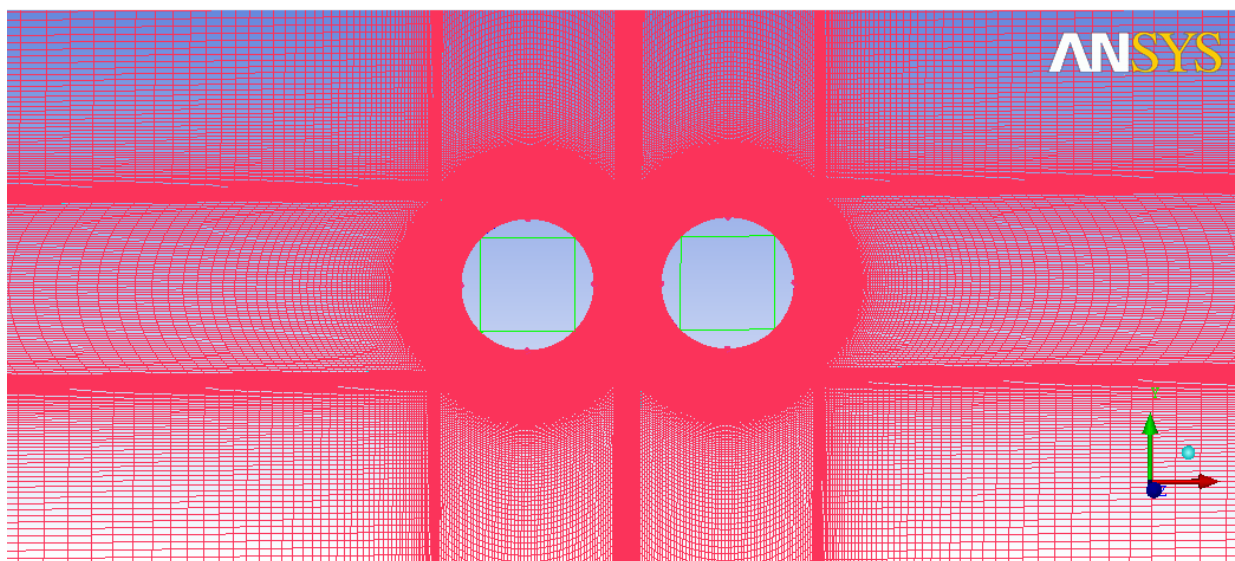


Figura 9. Cilindros distanciados a 1.5D

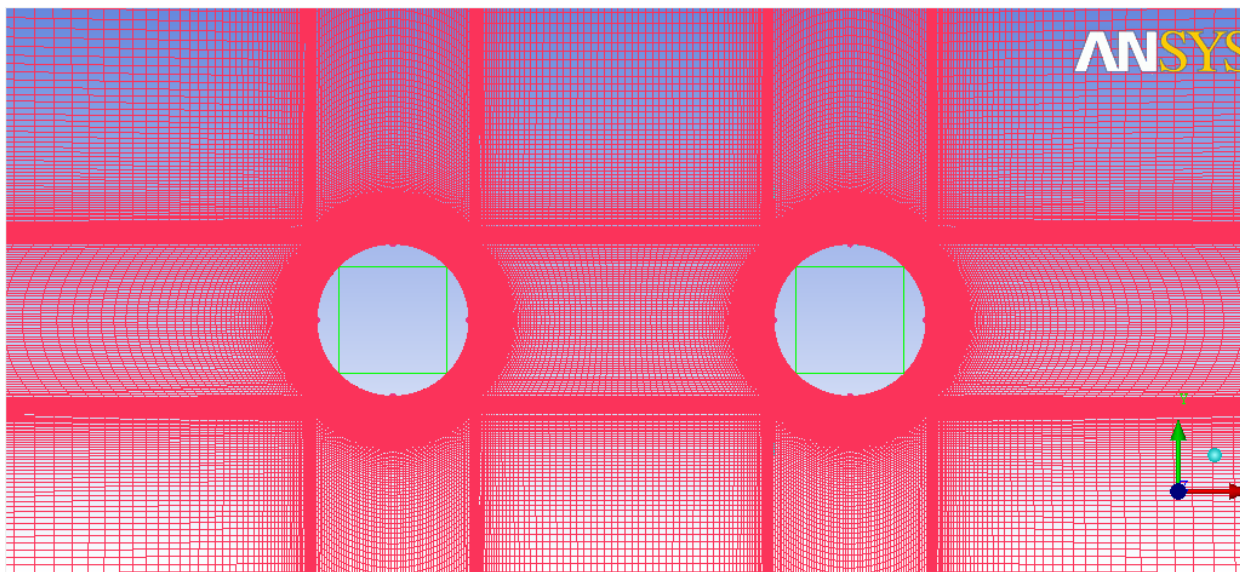


Figura 10. Cilindros distanciados a 3D

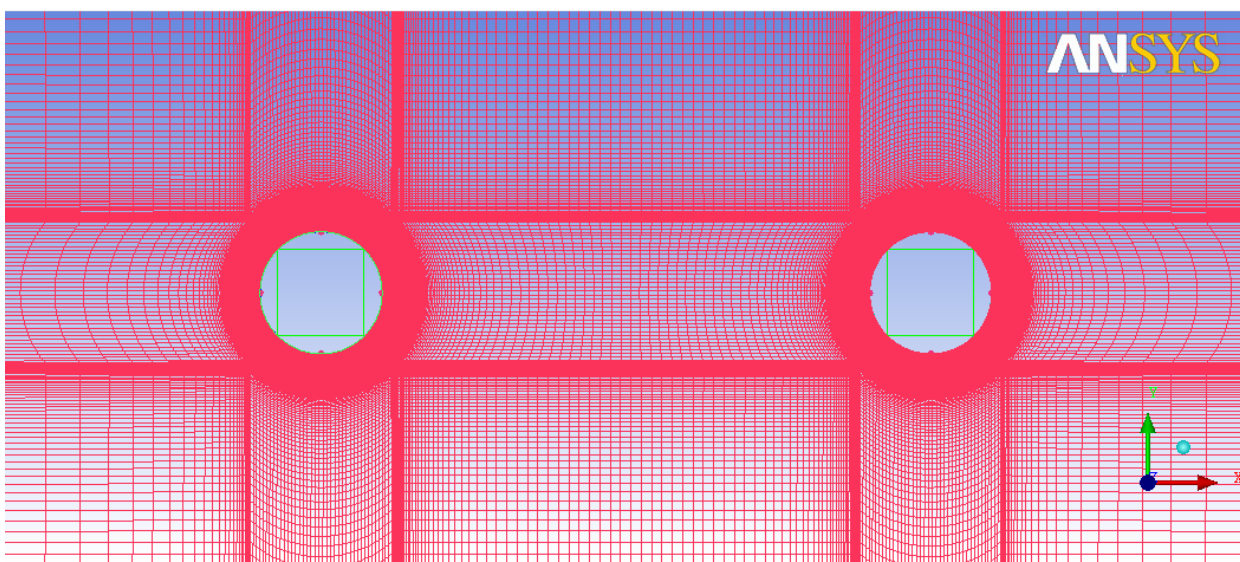


Figura 11. Cilindros distanciados a 1.5 D

5 RESULTADOS

Esta seção é dedicada a uma análise dos resultados obtidos com o UNSYFL3D, primeiramente com o escoamento considerado em regime permanente e em seguida com o escoamento considerando em regime transiente.

5.1 CAMPOS DE PRESSÃO E VELOCIDADE PARA $Re = 100$, REGIME PERMANENTE

As figuras 13 a 18 mostram a distribuição de pressão e velocidade dos três casos de objeto de estudo deste trabalho, simulação realizada em regime permanente com a metodologia RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), considerando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão.

Ressalta-se aqui que a utilização de modelos RANS não é recomendada para a simulação do escoamento externo sobre corpos rombudos. Somando-se a isto, temos o fato de que, segundo Williamson (1996) para números de Reynolds maiores do que aproximadamente 190 - considerando o escoamento sobre um único cilindro - a esteira se torna tridimensional, ou seja, ao simular tal escoamento em um domínio bidimensional, estamos desprezando o modo no qual a esteira se degenera em turbulência (o que ocorre para Re aproximadamente igual a 250, novamente considerando o escoamento sobre um único cilindro).

Em todos os casos analisados neste subitem a velocidade prescrita na entrada do domínio foi de 10 m/s.

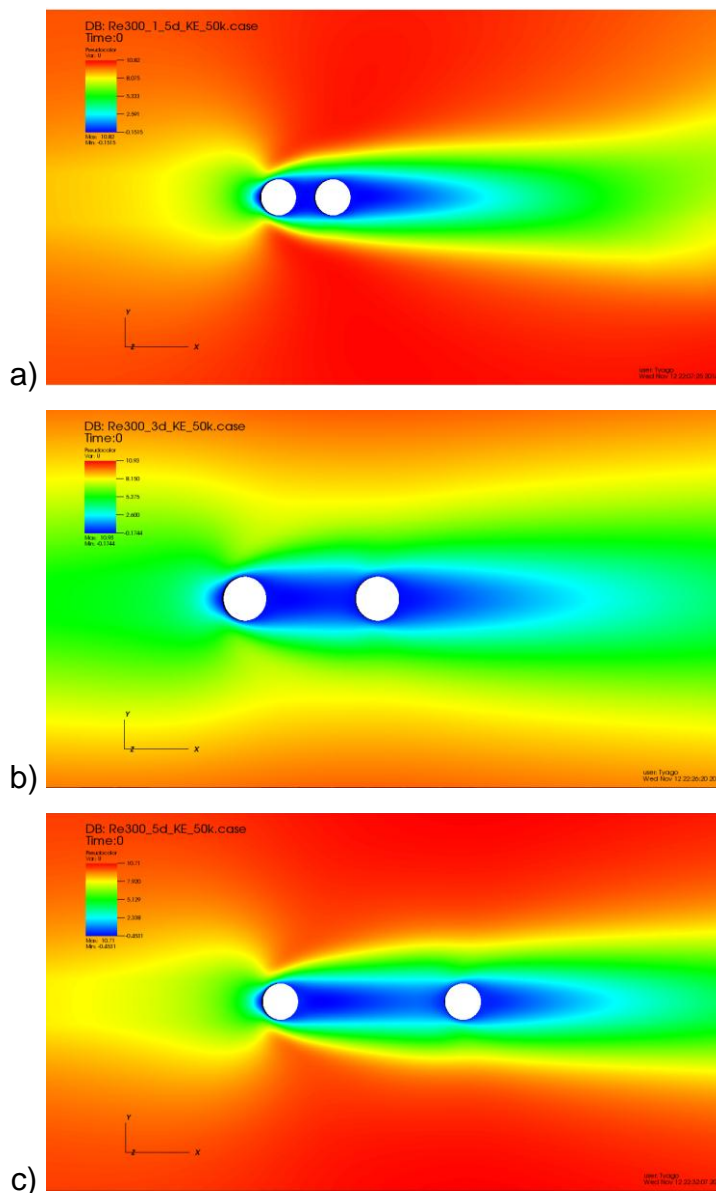


Figura 12: Distribuição da componente u do vetor velocidade. a) para o caso 1.5 D. b) para o caso 3 D. c) para o caso 5 D.

Como a simulação foi realizada em regime permanente, e para isso adotou-se um modelo de turbulência RANS, o que se observa é o campo médio resultante. É possível notar no campo acima a existência de uma zona de recirculação, a qual é caracterizada pelos valores negativos da componente u de velocidade. Também observa-se nos campos de velocidade o ponto de estagnação, ou seja, na região frontal dos cilindros. Aqui encontramos o maior valor de pressão presente no cilindro, como pode ser visto na Figura 14, devido a nulidade da velocidade, a qual, pela formulação de Bernoulli, implica num valor de pressão inversamente proporcional:

$V \rightarrow 0$ implica que $P \rightarrow \infty$

Observa-se uma tendência de aumento do campo de velocidade na região entre os cilindros conforme a distância entre centros aumenta. Como já visto, quando os dois cilindros estão muito próximos, o arrasto é contrário ao escoamento, logo a velocidade resultante neste campo será de mesmo sentido. O efeito inverso é observado quando l_{cc} aumenta, proporcionando velocidades positivas nas regiões próximas ao segundo cilindro.

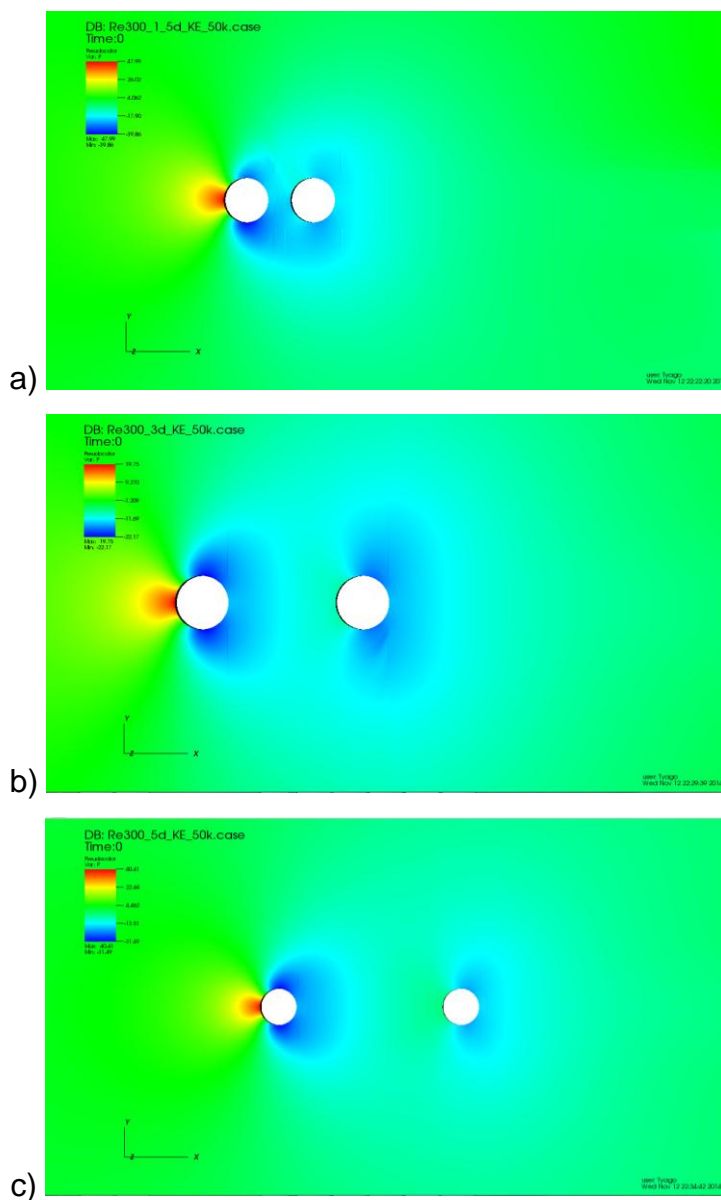


Figura 13: Distribuição de pressão. a) para o caso 1.5 D. b) para o caso 3 D. c) para o caso 5 D.

Outra característica importante destes campos demonstrados é explicada por Carmo (2005):

Quando fixamos Re e diminuimos o espaçamento, a pressão na região de formação aumenta e também o campo de velocidades é alterado, desacelerando o escoamento. Portanto, a presença de um corpo mais próximo ao primeiro cilindro tem dois efeitos: ela dificulta o desprendimento dos vórtices e força um encurtamento da região de formação. Desta forma, são observadas tendências diferentes nas duas situações em questão porque se tratam de fenômenos diferentes agindo sobre o escoamento. (CARMO, 2005, p.76)

Para o campo de pressão, nota-se que a pressão média aumenta com o espaçamento entre os cilindros. Para a situação de $1.5D$, toda formação e desprendimento de vórtices ocorrem após o segundo cilindro. Nos outros casos, já existe a presença de vórtices entre os corpos. Logo, a queda de pressão a jusante nesses casos é menor do que no primeiro.

5.2 COEFICIENTE DE ARRASTO

O Cálculo do coeficiente de arrasto médio C_d é dado pela seguinte relação abaixo:

$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho U^2 A} \quad (5.1)$$

Onde:

C_d : coeficiente de arrasto

ρ : densidade do fluido ($1,0 \text{ kg/m}^3$)

U : velocidade de escoamento (1 ou 10 m/s)

A : área da seção transversal (1 m^2)

F_d : Força de arrasto sobre o cilindro

Com exceção da viscosidade, a qual influencia diretamente a força de arrasto F_d , todas as demais propriedades acima são constantes para estudo dos três casos propostos. A força de arrasto é, portanto, variável e é obtida após o término

da simulação. Ressalta-se aqui que a denominação F_d neste trabalho refere-se à força de arrasto total sobre o cilindro, ou seja, inclui tanto o arrasto viscoso quanto aquele devido à variação de pressão ao longo do cilindro.

A partir deste ponto, vamos analisar o escoamento caso a caso, considerando o número de Reynolds e o espaçamento entre os cilindros. Apresentando o a força de arrasto obtida sobre o cilindro a montante e a jusante para as três distâncias entre centros

5.2.1 Cilindro a montante e a jusante $Re = 25$, regime transiente

Para este caso, a simulação foi realizada com $U = 1 \text{ m/s}$, $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$ e $A = 1 \text{ m}^2$. Com esses dados podemos determinar o coeficiente de arrasto médio como segue:

a) Cilindro a montante:

Para $l_{cc} = 1.5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,21 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,42$.

Para $l_{cc} = 3 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,25 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,50$.

Para $l_{cc} = 5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,64 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 1,28$.

b) Cilindro a Jusante

Para $l_{cc} = 1.5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,14 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,28$.

Para $l_{cc} = 3 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,17 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,34$.

Para $l_{cc} = 5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,27 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,54$.

5.2.2 Cilindro a montante e a jusante $Re = 40$, regime transiente

Para este caso os parâmetros foram os mesmos do caso anterior.

a) Cilindro a montante:

Para $l_{cc} = 1.5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,31 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,62$.

Para $l_{cc} = 3 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,45 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,90$.

Para $l_{cc} = 5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,64 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 1,28$.

b) Cilindro a Jusante

Para $l_{cc} = 1.5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,12 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,24$.

Para $l_{cc} = 3 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,18 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,36$.

Para $l_{cc} = 5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 0,22 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,44$.

5.2.3 Cilindro a montante $re=300$

Para $l_{cc} = 1.5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 67,65 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 1,35$.

Para $l_{cc} = 3 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 37,48 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 0,75$.

Para $l_{cc} = 5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 59,43 \text{ N}$. Logo, o $C_d = 1,19$.

5.2.4 Cilindro a jusante $Re=300$

Para $l_{cc} = 1.5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 67,65 N$. Logo, o $C_d = 1,35$.

Para $l_{cc} = 3 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 37,48 N$. Logo, o $C_d = 0,75$.

Para $l_{cc} = 5 D$, temos que a força total de arrasto $F_d = 59,43 N$. Logo, o $C_d = 1,19$.

5.2.5 Cilindro a montante e a jusante $Re= 100$, regime transiente

Campos de velocidade e vorticidade para este caso estão representados nas figuras 15 a 23, obtidos da simulação em regime transiente. Nestas simulações também se optou pela utilização do modelo de turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ padrão.

Nas figuras 15 a 17 o escoamento ao redor dos cilindros espaçados $1.5 D$ é mostrado, tem-se que a recirculação entre os dois cilindros ainda é modesta. Neste caso, o pouco espaço entre os dois corpos impede que vórtices sejam gerados. Observa-se, entretanto, uma tímida formação de recirculação após o cilindro a montante. O vórtice gerado pelo primeiro cilindro envolve o de trás.

Nas figuras 18 a 20, onde está representado o caso de espaçamento $3D$, já se observa uma recirculação na região entre os dois cilindros sendo processada. No caso da vorticidade, ainda o cilindro a jusante é envolvido pelos vórtices emitidos pelo cilindro da frente.

Por fim nas Figuras 21 a 23, no caso de maior espaçamento ($5D$), fica evidente a grande recirculação entre os dois cilindros além de que o segundo cilindro experimenta uma menor influencia da emissão de vórtices do primeiro cilindro. Isto evidencia o que fora discutido na revisão bibliográfica deste trabalho.

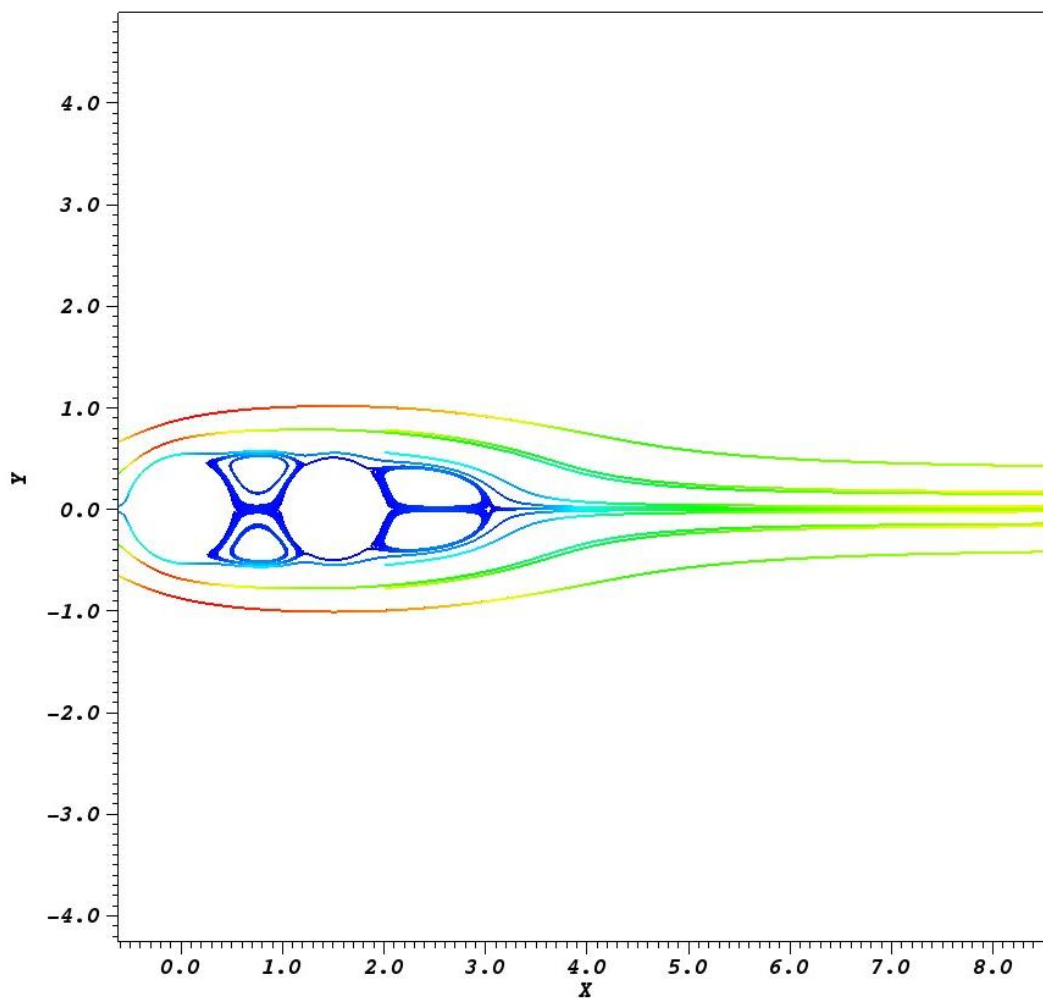


Figura 14:Linhas de corrente de velocidade para caso de 1.5D

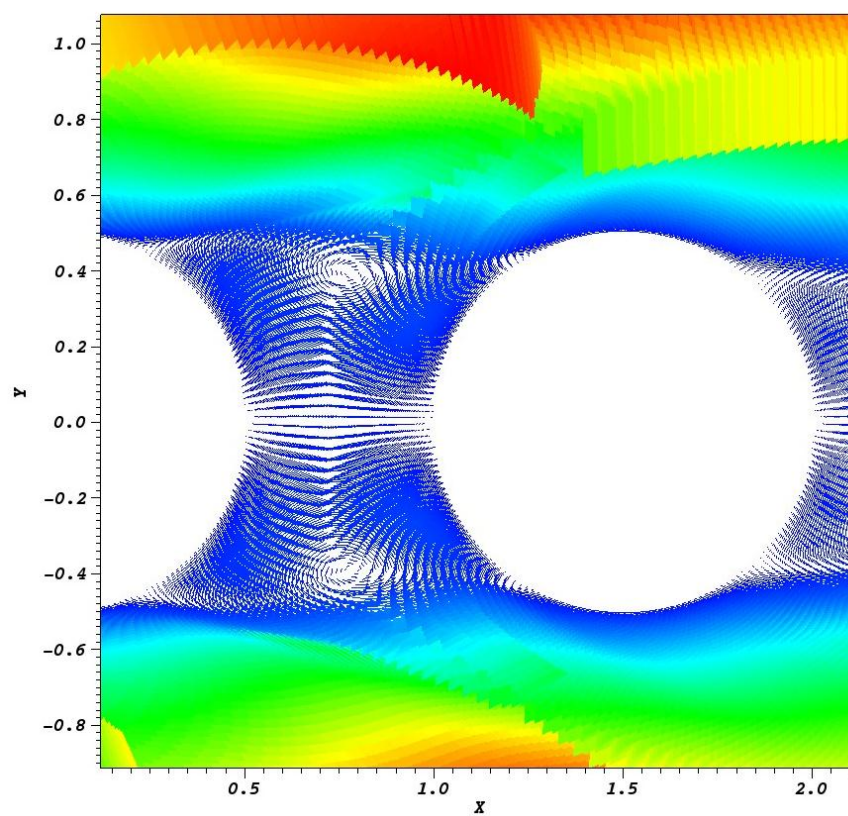


Figura 15: Detalhe da recirculação presente na região entre os dois cilindros, caso 1.5D

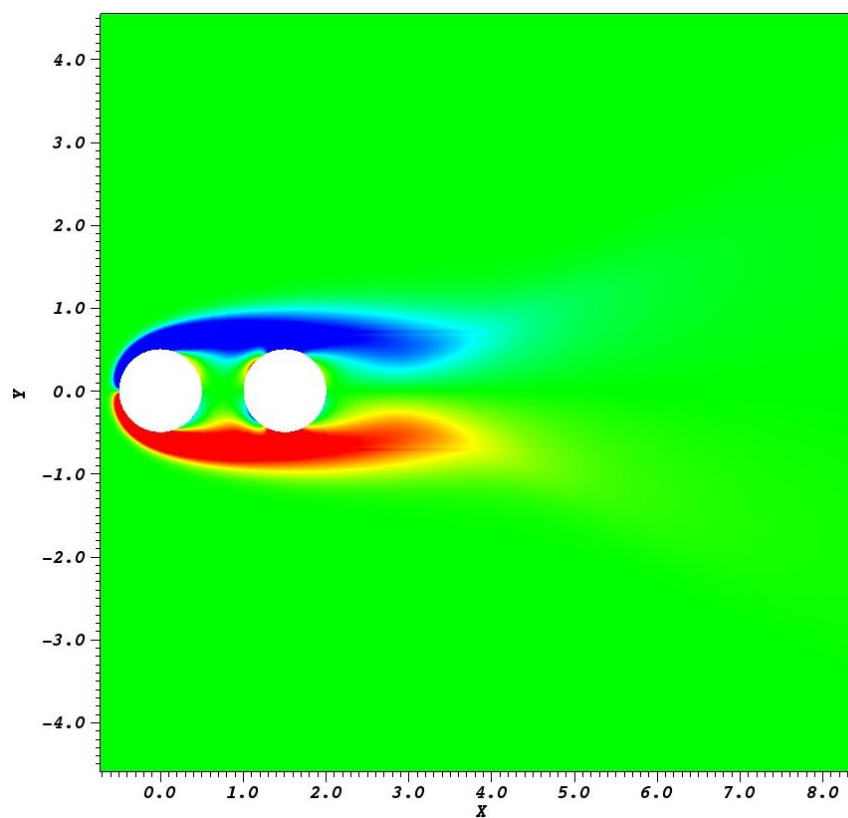


Figura 16: Campo de vorticidade, caso 1.5 D.

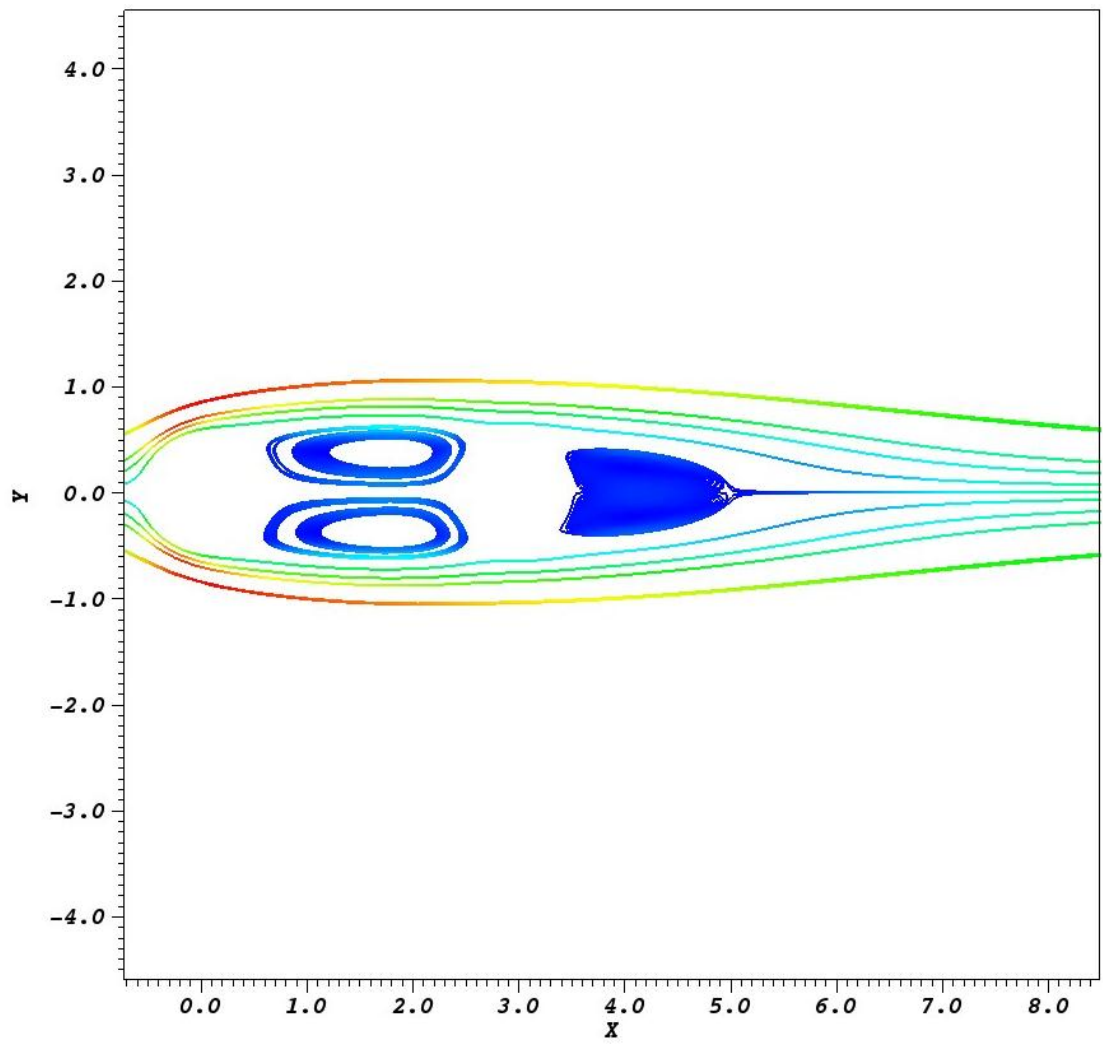


Figura 17: Linhas de corrente de velocidade para caso de 3D

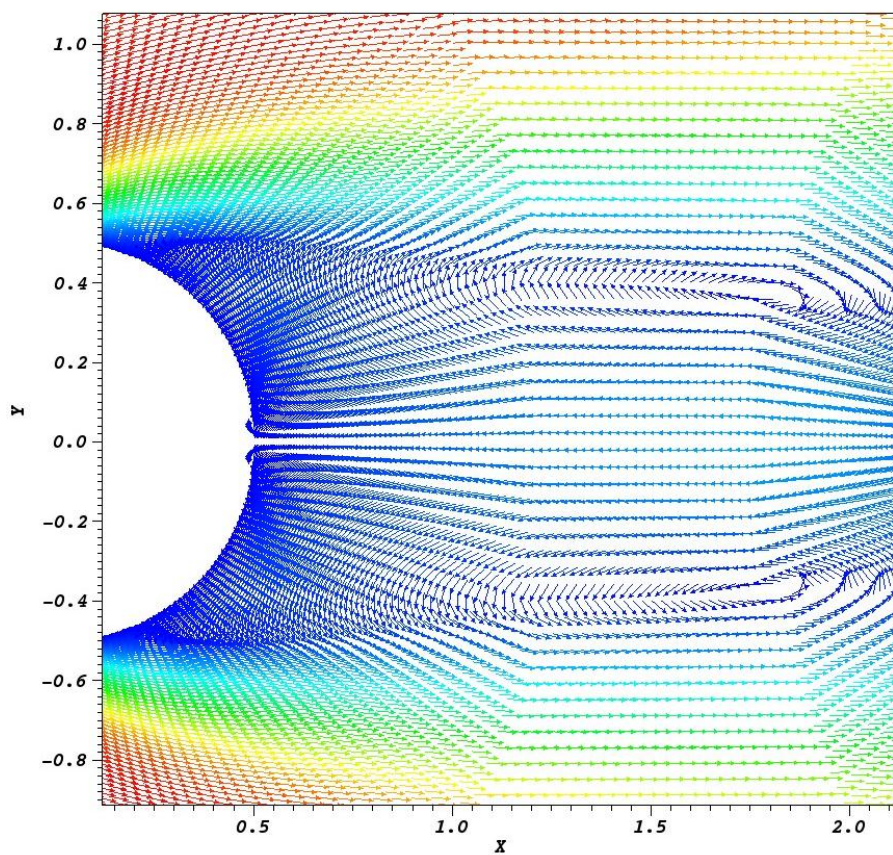


Figura 18: Detalhe da recirculação presente na região entre os dois cilindros, caso 3D.

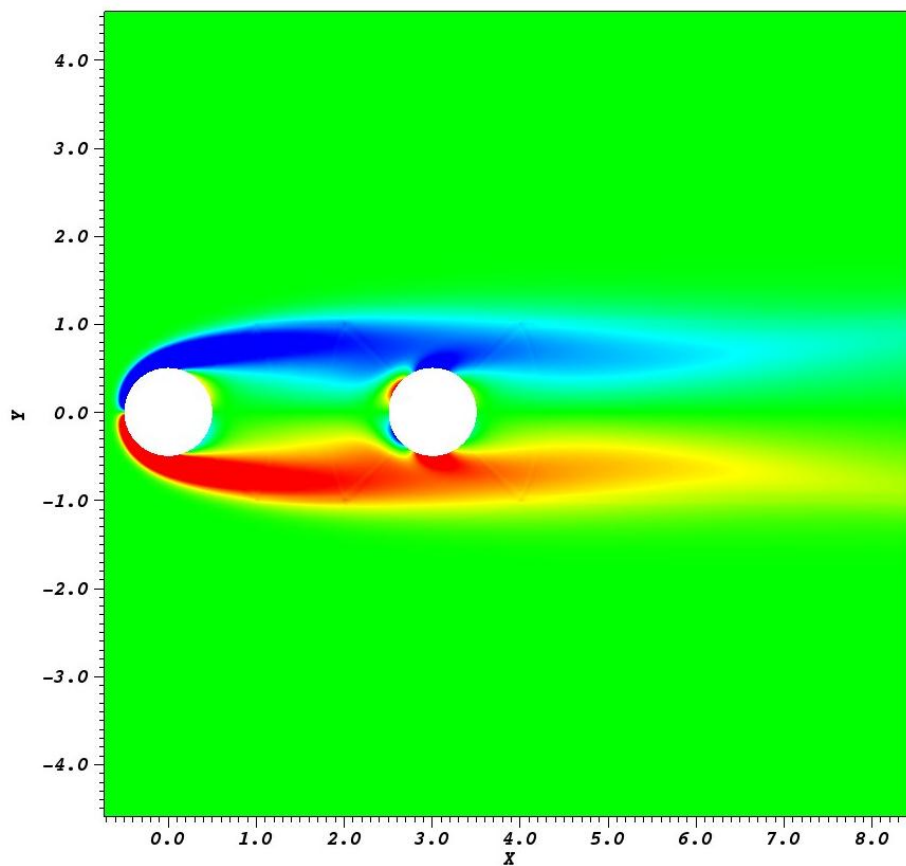


Figura 19: Campo de vorticidade, caso 3D.

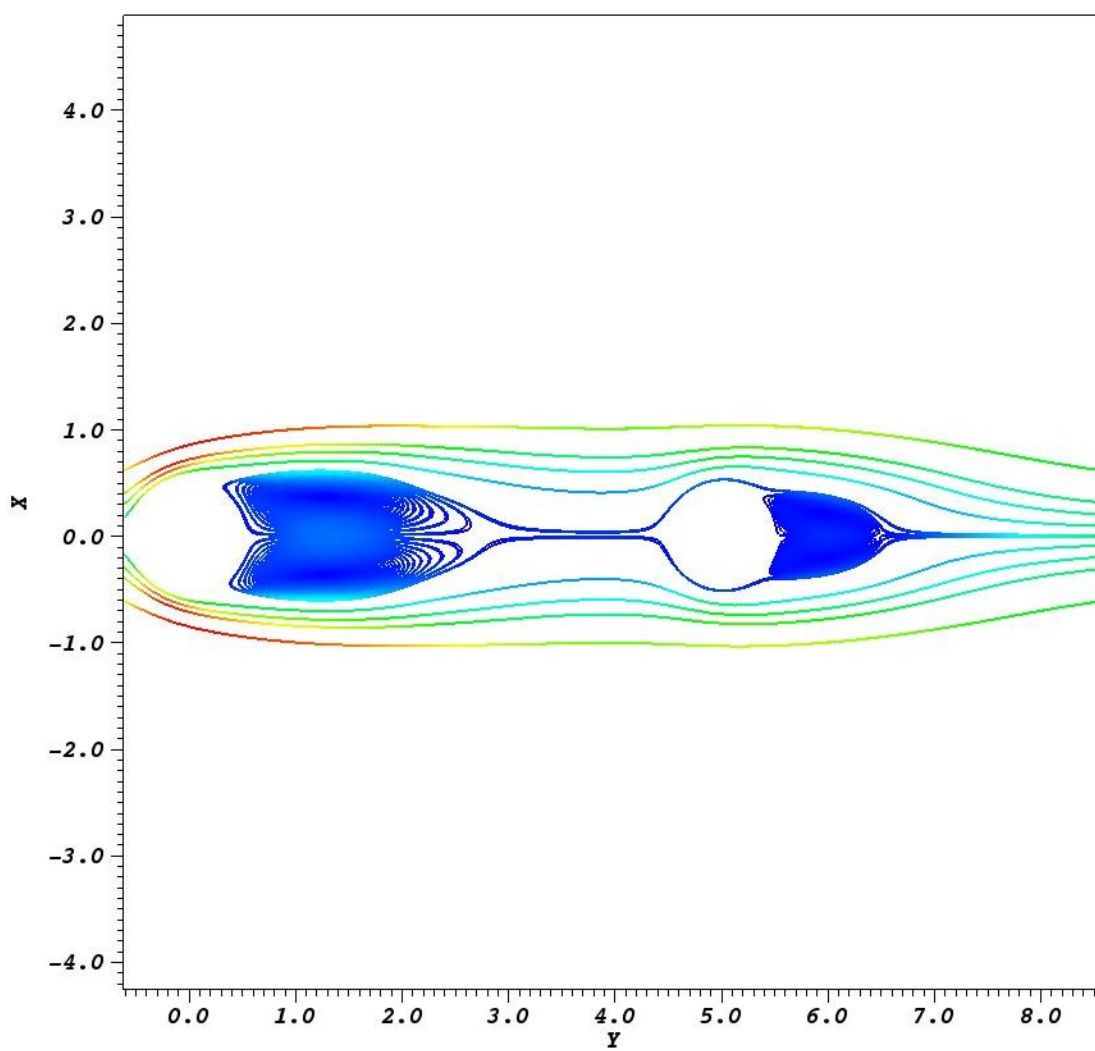


Figura 20: Linhas de corrente de velocidade para caso de 3D.

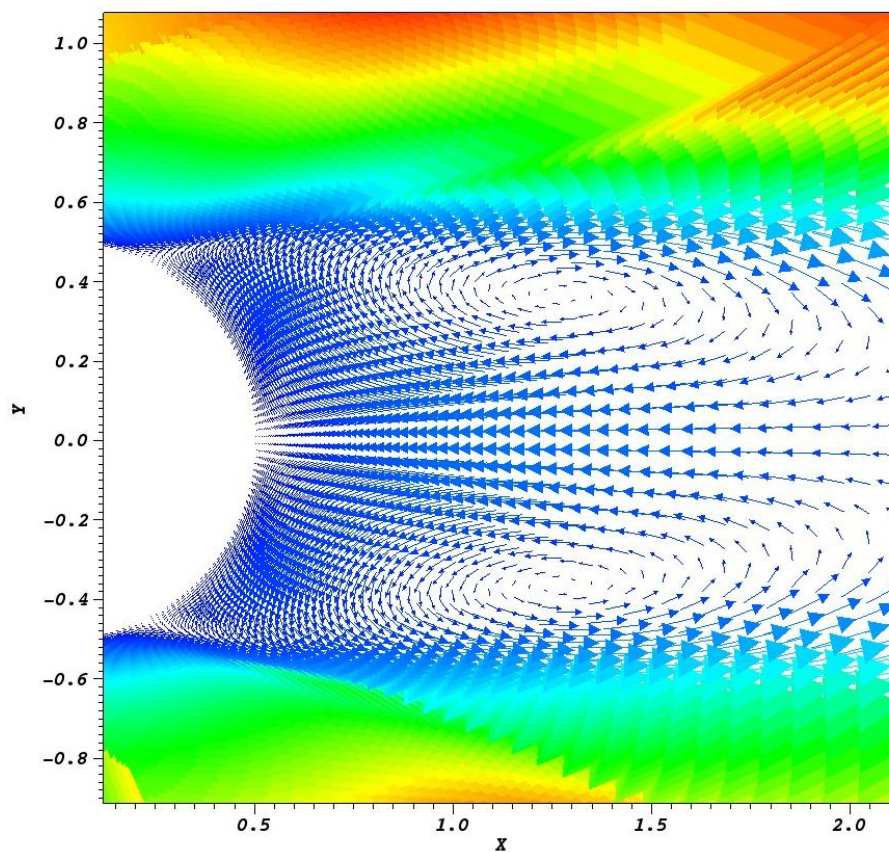


Figura 21: Detalhe da recirculação presente na região entre os dois cilindros, caso 5D

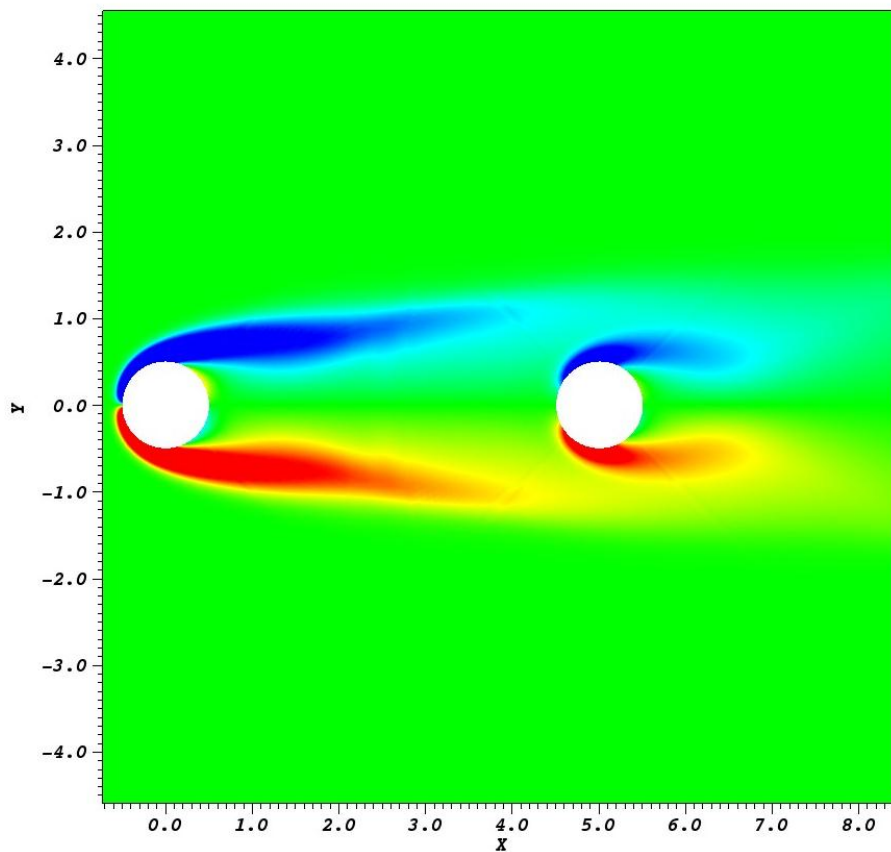


Figura 22: Campo de vorticidade, caso 5 D.

Para este caso os seguintes valores de C_D foram obtidos:

- a) Cilindro a montante:
- Para $L_{cc}=1.5D$, $C_D= 1.33$
 - Para $L_{cc}=3D$, $C_D= 1.38$
 - Para $L_{cc}=5D$, $C_D= 1.4$
- b) Cilindro a jusante:
- Para $L_{cc}=1.5D$, $C_D= 0,11$
 - Para $L_{cc}=3D$, $C_D= 0,22$
 - Para $L_{cc}=5D$, $C_D= 0,,42$

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Observa-se que o cilindro a jusante para $Re=100$ experimenta um aumento de C_d em função do aumento do espaçamento. Esse acréscimo da força de arrasto no segundo cilindro deve-se ao fato de que os vórtices do primeiro cilindro são formados antes do segundo, assim o arrasto varia significativamente.

Também, em todos os casos o coeficiente de arrasto para $Re=100$ no cilindro a jusante é consideravelmente menor que o do outro corpo. Isto pode ser entendido ao se notar que para estes casos o cilindro a jusante está dentro da esteira próxima formada pelo outro corpo, isto é, está imerso numa região de baixa pressão.

Comparativamente aos resultados obtidos por Carmo (2005), observamos certa razoabilidade da simulação numérica realizada. Abaixo segue um comparativo destes dados.

Lcc	C_d (Obtido)	C_d (Carmo, 2005)
1,5	1,35	1,05
3	0,75	1,2
5	1,19	1,25

Tabela 1: Comparações de resultados de C_D para o cilindro a montante, $Re=300$.

L_{cc}	C_d (Obtido)	C_d (Carmo, 2005)
1,5	0,18	-0.2
3	0,28	0.25
5	0,40	0.3

Tabela 2: Comparações de resultados de C_D para o cilindro a jusante, $Re=300$.

Analisando a Tabela 1 e Tabela 2, verificam-se disparidades e convergência de alguns resultados. Entretanto, apenas os dois últimos casos que não houve uma discrepância tão evidente. Quanto ao primeiro, durante as simulações numéricas há de se salientar que necessitava de um refinamento mais minucioso da malha, que permitisse um resultado mais apropriado para o cilindro à jusante. O modelo de turbulência adotado foi o $K\epsilon$, o qual proporcionou resultados mais razoáveis.

Para fins de analogia, o coeficiente de arrasto médio para um cilindro isolado é aproximadamente 1,40 segundo Carmo (2005). Isso demonstra que, nas configurações de objeto, independente de qual, o cilindro a montante também é favorecido ao experimentar um arrasto menor.

No caso de $Re=25$, $Re=40$ e $Re=100$ observamos o fenômeno descrito na literatura: o coeficiente de arrasto médio C_d experimenta um acréscimo conforme se aumenta a distância entre centros dos dois cilindros, tanto para o primeiro cilindro como o segundo cilindro, evidenciando a interferência de um segundo corpo rombudo a jusante no escoamento. Nesses casos foi assumido escoamento transiente, numa segunda simulação a fim de atingir resultados mais plausíveis comparativamente aquele com $Re=300$ (Regime permanente). Também se verifica um perfil de escoamento para o caso de $Re=100$ mais comportado. Além das observâncias para os campos de velocidade do primeiro experimento (Ponto de estagnação) e variação dos campos de pressão, ficou claro nesse regime as regiões de recirculação do ar a jusante dos dois cilindros e também o início de desprendimentos de vórtices presente no escoamento. Os vetores velocidades do caso mais particular (1.5 D) demonstram a tendência de arrasto negativo no segundo corpo.

Quanto à comparação dos valores de C_D com a literatura, para o caso de $Re=25$ a validação ocorreu ao se comparar o coeficiente de arrasto médio da

simulação ($C_D=1,57$) feita com um único cilindro com valores tabelados (C_D variando de 1,4 a 1,9).

Para os outros dois casos ($Re=40$ e $Re=100$), segue a tabela comparativa abaixo:

Lcc	C_d (Obtido)	C_d (Patil, 2008)
1,5	0,62	1,35
3	0,90	1,4
5	1,28	1,45

Tabela 3: Comparações de resultados de C_D para o cilindro a montante, $Re=40$.

Lcc	C_d (Obtido)	C_d (Patil, 2008)
1,5	0,24	0,15
3	0,36	0,2
5	0,44	0,38

Tabela 4: Comparações de resultados de C_D para o cilindro a jusante, $Re=40$.

Lcc	C_d (Obtido)	C_d (Sharman, 2004)
1,5	1,33	1,2
3	1,38	1,1
5	1,4	1,3

Tabela 5: Comparações de resultados de C_D para o cilindro a montante, $Re=100$

Lcc	C_d (Obtido)	C_d (Sharman, 2004)
1,5	0,11	-0,1
3	0,22	0,1
5	0,42	0,6

Tabela 6: Comparações de resultados de C_D para o cilindro a jusante, $Re=100$

Verifica-se para esse segundo modelo de simulação resultados numéricos e visuais menos sensíveis ao compará-los com o respaldo literário deste trabalho. Os primeiros resultados em regime permanente foram obtidos através da metodologia RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations), a qual se trata de método de

baixo custo computacional. Após a observância de disparidade de alguns resultados, foi utilizado, então, a segunda metodologia com regime transiente (URANS), fornecendo resultados mais plausíveis.

A recorrência das simulações com regime transiente se deve ao fato de que a partir de $Re=49$ (aproximadamente), ocorre o início da liberação de vórtices (esteira de Von Kármán), e neste caso este tipo de simulação é mais propício. Além do mais, a partir de $Re=189$ a esteira se torna tridimensional, o que prejudica os resultados representados num plano bidimensional.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os resultados de cálculos computacionais do escoamento ao redor de dois cilindros alinhados. O efeito da interferência e demais fenômenos presentes nos casos analisados, foram explicitados e, de certa forma, verificados por meio das simulações computacionais. A seguir estão explicitadas algumas conclusões.

Primeiramente, vimos que a presença de um segundo corpo interfere consideravelmente no escoamento. Seja na análise visual ou de parâmetros com a força de arrasto.

Foi observado um acréscimo do coeficiente arrasto médio do cilindro a montante, o que ratifica o pressuposto da teoria. Isso ocorre devido a componente da força viscosa, haja visto que a componente de pressão permaneça praticamente constante. No cilindro a jusante, as zonas de recirculação estão mais próximas, isso acaba proporcionando velocidades e arrasto negativo nesse corpo.

Também observamos um acréscimo do coeficiente de arrasto no cilindro à jusante, evidenciando que o aumento da pressão entre os corpos interfere positivamente nesse fato.

Foi verificada a disparidade dos resultados obtidos com a simulação feita em regime permanente e transiente. Evidenciando qual metodologia é mais viável na representação de um fenômeno com a liberação de vórtices (esteira de Von Kármán).

Como sugestão de trabalho futuro, o estudo similar a este com configurações distintas, como por exemplo, cilindros dispostos lado a lado, ou então uma alinhamento com mais de dois cilindros.

REFERÊNCIAS

ARIE, M. et al. Pressure fluctuation on the surface of two circular cylinders in tandem arrangement. **Journal of Fluids Engineering**, v.105, p.161-167, 1983.

ÁSSI, Gustavo Roque da Silva. **Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados.**

B. Sharman. **Numerical predictions of low Reynolds number flows over two tandem circular cylinders**, 2004.

CANALE, Chapra. **Métodos numéricos para engenharia.** São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2008.

CARMO, Bruno Souza. **Estudo numérico do escoamento ao redor de cilindros alinhados**, 2005.

ÇENGEL, Yunus A. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2007.

FOX, Robert W. **Introdução à mecânica dos fluidos.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006.

IGARASHI, T. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem. **Bulletin of JSME**, v.24, n.188, p.323-331, 1981.

LIN, J. C.; YANG, Y.; ROCKWELL, D. Flow past two cylinders in tandem: instantaneous and averaged flow structure. **Journal of Fluids and Structures**, v.16, n.8, p.1059-1071, 2002.

MAHBUB ALAM, Md. et al. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.91, p.139-154, 2003.

MENEGHINI, J. R. et al. Numerical Simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements. **Journal of Fluids and Structures**, v.15, p.327-350, 2001.

MITTAL, S.; KUMAR, V.; RAGHUVANSHI, A. Unsteady incompressible flows past two cylinders in tandem and staggered arrangements. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v.25, p.1315-1344, 1997.

MORAES, Paulo Guimarães de. **Efeitos de interferência entre dois corpos idênticos alinhados com o escoamento.**

PATIL, Rahul C. **Steady Flow of Power Law Fluids over a Pair of Cylinders in Tandem Arrangement**, 2008.

SLAOUTI, A.; STANSBY, P. K. Flow around two circular cylinders by the random-vortex method. **Journal of Fluids and Structures**, v.6, n.6, p.641-670, 1992.

TAVARES, Renato Normandia. **Análise do desprendimento de vórtices em um escoamento externo ao redor de um cilindro circular reto.**

THOMAS, D. G.; KRAUS, K. A. Interaction of vortex streets. **Journal of Applied Physics**, v.35, n.12, p.3458-3459, 1964.

WU, J. et al. Spanwise wake structures of a circular cylinder and two circular cylinders in tandem. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.9, p.299-308, 1994.

ZDRAVKOVICH, M. M. Smoke observations of wakes of tandem cylinders at low Reynolds numbers. **Aeronautical Journal**, v.76, p.108-114, 1972.

ZDRAVKOVICH, M. M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow **Journal of Fluids and Structures**, v.1, p.239-261, 1987.