

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

TOBIAS LUIZ MARCHIORO TOASSI

**ANÁLISE DE ESFORÇOS DE VENTO EM ESTRUTURAS DE
BARRAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2013

TOBIAS LUIZ MARCHIORO TOASSI

**ANÁLISE DE ESFORÇOS DE VENTO EM ESTRUTURAS DE
BARRAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus
Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Carrazedo

**PATO BRANCO
2013**



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE ESFORÇOS DE VENTO EM ESTRUTURAS DE BARRAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

TOBIAS LUIZ MARCHIORO TOASSI

Aos 15 dias do mês de março do ano de 2013, às 15:30 horas, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 13-TCC/2013.

Orientador: Prof. Dr. ROGÉRIO CARRAZEDO (COECI / UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. RODOLFO ANDRÉ KUCHE SANCHES (COECI / UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. GUSTAVO LACERDA DIAS (COECI / UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

A estes, os meus mais puros e sinceros agradecimentos:

A Deus, Autor da vida e força suprema que me moveu desde o início, por me dar toda a força e coragem que me sustentaram ao longo de toda esta caminhada, por estar ao meu lado sempre e que nos momentos mais difíceis me deu forças para continuar.

Aos meus pais, Lauri e Maria Ivoly por toda a força, amor, pelos dons desenvolvidos, pela cobrança nos estudos e por despertar em mim a paixão pelo conhecimento e pelo saber, onde sem seu apoio não seria possível a realização deste.

À minha namorada Cleidiane, por todo o amor, carinho, companheirismo, apoio e compreensão.

Ao professor orientador Rogério Carrazedo pela oportunidade concedida, pelos sábios conselhos, pelos conhecimentos valiosos e pela experiência repassada não somente durante o trabalho, mas ao longo de todas as disciplinas ministradas.

A todos os professores com quem tive aulas da coordenação de engenharia civil, por todo o conhecimento teórico e prático repassados em aula e incentivo.

Aos meus colegas de faculdade, tão importantes nas minhas relações sociais e profissionais tanto no presente momento quanto futuramente, me atenho a citar todos os nomes, mas pelo auxílio, companheirismo, amizade e pelos momentos extra-classe tão divertidos e proveitosos.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização do presente trabalho.

Novamente, o meu Muito Obrigado.

*Você pode se render sem uma oração,
mas nunca pode realmente orar sem
uma rendição.*

*Você pode lutar sem nunca vencer, mas
você nunca vencerá sem antes lutar.*

Neil Peart

RESUMO

TOASSI, Tobias L. M. Análise de esforços de vento em estruturas de barras via método dos volumes finitos. Trabalho de conclusão de curso (grau de bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

Este trabalho apresenta uma metodologia de análise para obtenção dos esforços devidos ao vento por meio de uma simulação numérica transiente de escoamento de fluido em diferentes números de Reynolds, utilizando o recurso da fluidodinâmica computacional. Foi realizada a validação do presente estudo fazendo-se uma comparação entre estudos presentes na literatura que tratam sobre escoamento de fluidos em regimes turbulentos e com os resultados obtidos no software de simulação numérica AnSYS™. Com o presente estudo validado, fez-se a simulação do escoamento de vento sobre uma seção de um perfil metálico, obtendo-se resultados como coeficientes de sustentação e arrasto em função do tempo e em função do número de Reynolds, podendo assim estabelecer uma comparação com os valores de coeficiente de força presentes na NBR 6123/1988.

Palavras-chave: Simulação numérica. Dinâmica dos fluidos computacional. NBR 6123:1988.

ABSTRACT

TOASSI, Tobias L. M. Analysis of wind forces in reticulated structures through the finite volume method. Completion of course work (bachelor's degree in Civil Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

This monograph presents a methodology to obtain the forces due to wind by a transient numerical simulation of fluid flow at different Reynolds numbers, employing computational fluid dynamics. The present study was validated by comparing among studies presented in literature about fluid flow in turbulent regimes and the results of the numerical simulation, in which software ANSYS™ has been used. Once validated, it was simulated the wind flow over a section of a metal profile, obtaining the lift and drag coefficients as a function of time and the Reynolds number, and it can therefore establish a comparison with the force coefficient present in NBR 6123/1988.

Keywords: Numerical simulation. Computational fluid dynamics. NBR 6123:1988.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Regimes de escoamento em função no número de Reynolds.	20
Figura 2: Frequência de desprendimento de vórtices e modo de vibração da estrutura.	27
Figura 3: $Re < 1$	28
Figura 4: $1 < Re < 50$	28
Figura 5: $50 < Re < 5000$	28
Figura 6: $10^4 < Re < 5 \times 10^5$	28
Figura 7: $Re > 5 \times 10^5$	28
Figura 8: escoamento laminar em placa em comprimento L: $Re = 0.3$	29
Figura 9: Início do desprendimento de vórtices: $Re = 10$	30
Figura 10: vórtices em um plano simétrico: $Re = 250$	30
Figura 11: Fluxo supercrítico: $Re > 1000$	30
Figura 12: Formação do <i>wake-galloping</i>	33
Figura 13: Across-wind galloping	34
Figura 14: indicação em planta dos coeficientes de pressão e forma externos para paredes de edificações de planta retangular.....	37
Figura 15: Modelo de análise.	41
Figura 16: Domínio utilizado.....	42
Figura 17: Dimensões do domínio.....	42
Figura 18: Discretização do domínio do estudo de referência.....	43
Figura 19: Malha utilizada.	43
Figura 20: Detalhe do refinamento da malha.	44
Figura 21: Indicação das condições de fronteira.	46
Figura 22: Linhas de corrente do estudo comparado em $Re=100$ (2012).	47
Figura 23: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 100$	47
Figura 24: Ampliação das linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 100$	48
Figura 25: Comparação das linhas de pressão em $Re = 100$	48
Figura 26: Linhas de corrente do estudo comparado em $Re=150$ (2012).	48
Figura 27: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 150$	49
Figura 28: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 150$	49
Figura 29: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 150$	49

Figura 30: Linhas de corrente do estudo comparado em $Re=200$ (2012).	50
Figura 31: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 200$.	50
Figura 32: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 200$.	50
Figura 33: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 200$.	51
Figura 34: Coeficiente de arrasto em função do tempo, em $Re=100$.	52
Figura 35: Comparação dos coeficientes de arrasto em função do tempo, em $Re=100$.	52
Figura 36: Comparação dos coeficientes de sustentação em função do tempo, em $Re=100$.	52
Figura 37: Comparação dos coeficientes de arrasto em função do tempo, em $Re=150$.	53
Figura 38: Comparação dos coeficientes de sustentação em função do tempo, em $Re=150$.	53
Figura 39: Comparação dos coeficientes de arrasto em função do tempo, em $Re=200$.	53
Figura 40: Comparação dos coeficientes de sustentação em função do tempo, em $Re=200$.	54
Figura 41: Dimensões do domínio da simulação.	56
Figura 42: Dimensões do perfil estudado.	57
Figura 43: Domínio utilizado.	57
Figura 44: Malha utilizada.	58
Figura 45: Ampliação da malha: refinamento próximo ao perfil.	58
Figura 46: Condições de contorno do domínio.	60
Figura 47: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 100$.	61
Figura 48: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 150$.	61
Figura 49: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 200$.	62
Figura 50: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 100$.	62
Figura 51: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 150$.	63
Figura 52: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 200$.	63
Figura 53: Coeficiente de arrasto em função do tempo em $Re = 100$.	64
Figura 54: Coeficiente de sustentação em função do tempo em $Re = 100$.	64
Figura 55: Coeficiente de arrasto em função do tempo em $Re = 150$.	65
Figura 56: Coeficiente de sustentação em função do tempo em $Re = 150$.	65

Figura 57: Coeficiente de arrasto em função do tempo em $Re = 200$	65
Figura 58: Coeficiente de sustentação em função do tempo em $Re = 200$	66
Figura 59: Envoltória dos coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds.	67
Figura 60: Envoltória dos coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constantes presentes nas equações do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	23
Tabela 2: coeficientes de pressão e forma externos para paredes de edificações de planta retangular	36
Tabela 3: Propriedades do fluido.....	44
Tabela 4: Tipo de análise	45
Tabela 5: Descrição das condições de contorno	46
Tabela 6: Coeficientes de sustentação (C_l) e arrasto (C_d) obtidos nas análises.	54
Tabela 7: Resultados obtidos no artigo de referência.	54
Tabela 8: propriedades do fluido do experimento.	59
Tabela 9: velocidades equivalentes para o escoamento do ar	59
Tabela 10: Condições de contorno do experimento.	60
Tabela 11: Coeficientes C_x e C_y para barras prismáticas de faces planas de comprimento infinito	66
Tabela 12: Coeficientes de arrasto e sustentação obtidos.....	67

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	12
1.1.	Objetivos	12
1.1.1.	Objetivos Específicos	13
1.2.	Justificativa.....	13
2.	Dinâmica dos Fluidos	15
2.1.	Condições de Contorno.....	15
2.2.	Escoamento do Vento	16
2.3.	Dinâmica Dos Fluidos Computacional.....	17
2.3.1.	Tipos De Escoamento	18
2.3.2.	Propriedades Do Escoamento Turbulento.....	21
3.	Interação Fluido-Estrutura	26
3.1.	Efeitos Do Vento Em Estruturas.....	26
3.1.1.	Desprendimento de Vórtices	27
3.1.2.	Flutter	31
3.1.3.	Galloping	32
3.1.4.	Buffeting	34
3.2.	Forças Devidas Ao Vento Em Edificações	34
3.2.1.	Pressão Dinâmica	35
3.2.2.	Coeficientes de Pressão.....	35
3.2.3.	Velocidade Característica.....	37
4.	Materiais e Métodos	38
4.1.	Análise Numérica – Método Dos Volumes Finitos.....	38
4.2.	Recursos e Metodologia.....	38
5.	Validação do Estudo: Simulação de um Escoamento Através de um Cilindro.....	41
5.1.	Geometria.....	41

5.2.	Malha.....	43
5.3.	Pré-Processamento.....	44
5.3.1.	Material Utilizado.....	44
5.3.2.	Tipo de Análise.....	45
5.3.3.	Condições de Contorno e Inicialização	45
5.4.	Resultados	47
5.4.1.	Linhas de Fluxo e Velocidade	47
5.4.2.	Coeficientes de Arrasto e Sustentação	51
5.4.3.	Envoltória dos Coeficientes de Arrasto e Sustentação.....	54
5.4.4.	Discussão dos Resultados	55
6.	Experimento: Simulação de Escoamento em um Perfil Metálico.....	56
6.1.	Geometria.....	56
6.2.	Malha.....	58
6.3.	Pré-Processamento.....	59
6.3.1.	Material Utilizado.....	59
6.3.2.	Tipo de Análise.....	59
6.3.3.	Condições de Contorno e Inicialização	60
6.4.	Resultados	61
6.4.1.	Linhas de Pressão e Velocidade.....	61
6.4.2.	Coeficientes de Arrasto e Sustentação	64
6.4.3.	Envoltória dos Coeficientes de Arrasto e Sustentação.....	66
6.4.4.	Discussão dos Resultados	68
7.	Conclusão.....	69
	Referências	70

1. INTRODUÇÃO

Problemas de dinâmica dos fluidos são muito comuns em aplicações da engenharia moderna nas mais diversas áreas como: engenharia mecânica, aeronáutica, naval e até mesmo biomecânica (SANCHES, 2011). Problemas relacionados a esse tema são encontrados em diversas situações, tais como: controle de ruídos em automóveis, durabilidade de fuselagem de aeronaves, vasos de pressão, cálculo de estruturas marítimas e exploração de petróleo, entre outros (DUTRA, 2006). Dentro da engenharia civil esse fenômeno ocorre principalmente em escoamento em canais, na ação do vento em edifícios, pontes, entre outros (SANCHES, 2011).

Diversos problemas encontrados na engenharia podem ser resolvidos por meio de equações diferenciais ordinárias e parciais, com geometrias e condições de contorno particulares. Porém a aplicação de algumas dessas geometrias e condições de contorno torna inexecutável a resolução dos problemas propostos e impossibilitam a formulação de uma solução analítica exata.

Para o presente trabalho, o método de análise foi o método dos volumes finitos, utilizado por grande parte dos softwares comerciais de simulação de fluidodinâmica computacional – *Computer Fluid Dynamics*.

O presente trabalho tem como finalidade a análise da ação do vento sobre um perfil normatizado, e para tal primeiramente estudou-se conceitos sobre mecânica dos fluidos, abordando tópicos como a dinâmica dos fluidos e escoamento do vento com o auxílio do método dos volumes finitos. Portanto, este trabalho estima de forma numérica os esforços de vento em uma estrutura de barras.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é determinar os esforços sobre uma estrutura de barra decorrente do escoamento do vento empregando o método dos volumes finitos.

1.1.1. *Objetivos Específicos*

-definir o tipo de escoamento (regime de escoamento laminar ou turbulento), compressibilidade do fluido e direção do escoamento;

-definir a geometria da estrutura, adotando, por exemplo, a seção transversal de um perfil metálico normatizado;

-determinar as ações decorrentes do escoamento, ou seja, as forças na estrutura decorrentes do escoamento.

1.2. **JUSTIFICATIVA**

A mudança do comportamento climatológico nas últimas décadas tem desafiado o engenheiro estrutural a buscar soluções mais realistas para a consideração das forças de vento no projeto e cálculo de estruturas. Durante o projeto de estruturas reticuladas como torres e antenas, o engenheiro dispõe de diversas normas brasileiras para servir de parâmetro para o projeto e o cálculo (CHÁVEZ, 2006).

Estas normas consideram a carga de vento geralmente como uma carga estática (SAVORY, PARKE, *et al.*, 2000), uma vez que a ação do vento em estruturas é um fenômeno instável, que apresenta rajadas aleatórias sequenciais e de curta duração, o que dificulta sua determinação de forma precisa (CHÁVEZ, 2006). Dessa forma, a norma brasileira trata essas rajadas como majorações da velocidade do vento na forma de coeficientes estatísticos de acordo com o entorno (NBR 6123, 1988).

Na necessidade de uma análise dinâmica, a norma brasileira para determinação da ação do vento NBR 6123:1988 aproxima estas ações em cargas estáticas discretas, uma vez que esta não fornece um modelo específico para o cálculo da resposta dinâmica (CARRIL, 2000).

Oliveira (2006) comenta que a ocorrência rara de terremotos no Brasil e o baixo peso próprio de estruturas metálicas tornam o vento a principal ação a ser considerada em seu dimensionamento, devendo assim ter uma estimativa confiável do carregamento gerado, pois conforme relata Hatashita (2007) a ação do vento é uma das principais causas da ruína de torres de transmissão. Mesmo fenômenos

extremos como ventos de alta intensidade estudados por Savory, Parke, et al. (2000) e tornados reportados por Marcelino (2004) estão ocorrendo com mais frequência nestes últimos anos, sendo registrados de forma sistemática principalmente na região Sul e Sudeste (PECIN, 2006).

Ainda com a experiência adquirida dos projetistas de estruturas de aço devido a crescente demanda e desenvolvimento do sistema brasileiro de telecomunicações, alguns colapsos associados ao carregamento do vento ocorreram, como por exemplo, o acidente envolvendo a ruína de 10 (dez) torres de transmissão entre as cidades de Foz do Iguaçu e Ivaiporã, em novembro de 1997 com ventos de 130 km/h (OLIVEIRA, 2006).

Sendo assim, o presente trabalho visa contribuir para a melhor compreensão do comportamento e modelagem das estruturas reticuladas sob a ação do vento, e justifica-se a realização deste trabalho em virtude dos inúmeros acidentes envolvendo estruturas reticuladas sob a ação do vento, como reportado por diversos autores como Pecin (2006), Hatashita (2007), Argenta (2007), Savory (2000).

2. DINÂMICA DOS FLUIDOS

A dinâmica dos fluidos computacional é um assunto recente, mas o movimento dos fluidos vem sendo estudado há séculos. A civilização egípcia dispunha de relógios de água, Aristóteles descreveu o princípio da continuidade, os romanos construíram aquedutos para o abastecimento de suas cidades, o gênio Leonardo da Vinci criou formas de embarcações que reduziam o efeito do arrasto, em 1856 Simon Stevin publicou o seu tratado matemático da mecânica dos fluidos *Estática e Hidrostática* (FORTUNA, 2000).

A dinâmica dos fluidos trata da interação existente entre um fluido e um corpo sólido imerso quando existe o movimento relativo entre ambos (o fluido se movimenta ou o corpo sólido se movimenta) (BRUNETTI, 2008).

Para descrever o movimento do fluido, os problemas mecânicos são descritos ou na forma Lagrangeana ou na forma Euleriana (SCHIOZER, 1996). A descrição Lagrangeana trata as trajetórias de determinadas partículas identificando-as por um vetor de posição inicial r_0 em um instante t_0 , descrevendo o movimento em todas as posições das partículas a qualquer instante, conforme descreve a equação 1:

$$\vec{r} = r(\vec{r}_0, t) \quad (1)$$

A descrição Euleriana trata a trajetória das partículas do contínuo em uma posição fixa do escoamento, sem seguir cada partícula individualmente. Qualquer variável é descrita em função do tempo e do vetor de posição no espaço, conforme a equação 2.

$$\vec{V} = V(\vec{r}, t) \quad (2)$$

2.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Os problemas de dinâmica dos fluidos podem ter um domínio cuja extensão real seja infinita ou considerada infinita, como a atmosfera; ou ter um domínio bem definido em todo o contorno de uma tubulação ou de um tanque, por exemplo.

Dessa forma, é possível dividir as condições de contorno em condições reais e condições fictícias.

- Condições reais: são devidas aos limites fisicamente impostos no domínio do fluido. Na região de fronteira com um sólido, a velocidade normal é igual à componente de velocidade do sólido na mesma direção, válido também para a velocidade tangencial no caso de um escoamento viscoso com condição de aderência. Porém a tensão tangencial é nula caso o escoamento seja invíscido e a velocidade é livre.
- Condições Fictícias: ocorre em escoamentos em domínios abertos, onde é necessário criar um contorno com características consideradas no infinito, sendo somente uma delimitação da área de computação do problema. O escoamento tende ao escoamento não perturbado (escoamento no infinito) na entrada e nos lados, mas na saída os efeitos causados por um contorno impermeável podem continuar por uma longa distância.

Para o escoamento subsônico, a especificação das propriedades (exceto a densidade) pode ser feita na entrada, nos lados e na saída do contorno, sendo que na saída existem as seguintes possibilidades de imposição das condições de contorno:

- Aplicação das suposições quanto à força de superfície e velocidades;
- Condição de gradiente de força de superfície nulo e tensões existentes.

Para o escoamento supersônico, não é feita nenhuma atribuição de condições de contorno nas saídas, pois as perturbações devido às condições de contorno não viajam tão rápido quanto à velocidade do som.

2.2. ESCOAMENTO DO VENTO

O escoamento do vento e a sua ação em estruturas tem representado um fator condicionante das realizações da humanidade. Essa manifestação ambiental deu origem a grandes áreas científicas como a Meteorologia, a Micrometeorologia e a Climatologia, destinadas a descrever e compreender os comportamentos

atmosféricos, e também, em especial, a aerodinâmica, ramo da mecânica dos fluidos que estuda o comportamento do escoamento do ar (LOPES, 2011).

De maneira geral, o escoamento de um fluido contornando um corpo faz com que o campo de velocidades do escoamento dê origem a campos de tensões em toda a superfície do objeto, que por sua vez produz alterações nas condições de escoamento em função da forma geométrica do objeto (LOPES, 2011).

As forças aerodinâmicas sobre uma estrutura podem ser determinadas por ensaios experimentais, à partir dos quais são determinados os coeficientes aerodinâmicos (arrasto, momento e sustentação) que permitem estimar a variação das forças que atuam sobre a estrutura em decorrência de diferentes condições de escoamento. Ensaios assim são largamente empregados na análise aerodinâmica de automóveis, aviões e também em determinadas estruturas civis (BRAUN, 2007).

A caracterização ideal do comportamento de sistemas estruturais ante o escoamento do vento, onde estruturas civis são um caso particular, depende além de uma adequada idealização das ações atuantes no modelo, do desenvolvimento de um modelo matemático da estrutura e de suas relações excitação-resposta (LOPES, 2011). No entanto para a maior parte das obras civis considera-se a estrutura rígida para a determinação dos esforços.

2.3. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A simulação de escoamento de fluidos via métodos computacionais, ou *Computational Fluid Dynamics* é uma ferramenta usada para prever e analisar o comportamento de problemas envolvendo fenômenos dos transportes, desde a análise das forças atuantes em um modelo de aeronave até soluções em conforto ambiental de edificações (SOUZA, 2009). A dinâmica dos fluidos computacional permite a elaboração de modelos que representam o escoamento de fluidos, mudança de fase de fluidos, reações químicas através da representação da dinâmica do fluido (MALISKA, 1995).

A possibilidade de obtenção de medidas mais precisas e confiáveis do que as obtidas em medições experimentais, simulação de situações de risco como explosões, colapsos, ruínas e falhas em geral e a simplificação de projetos de equipamentos evitando transtornos operacionais tornam a dinâmica dos fluidos

computacional uma ferramenta importante na obtenção das mais variadas possibilidades problemáticas (SOUZA, 2009).

As principais equações que descrevem os fluidos em movimento são as de Continuidade, a de Navier-Stokes e de energia, onde combinadas formam um sistema de Equações Diferenciais Parciais. Essas equações não lineares podem ser aproximadas por equações algébricas, visando obter soluções numéricas para problemas envolvendo o escoamento de fluidos utilizando meios computacionais, que atualmente com a alta capacidade de processamento e memória solucionam problemas compressíveis e incompressíveis, laminares ou turbulentos, não reagentes, com uma ou mais fases, entre outros (POTTER e WIGGERT, 2004).

Contudo é necessário compreender algumas limitações impostas pela utilização de computadores na resolução das equações e obtenção das soluções. Computadores não operam com derivadas e integrais, somente operadores aritméticos (soma, divisão, subtração e multiplicação) e lógicos (verdadeiro e falso), tendo assim ter de ser representados por essas operações; erros de truncamento de dígitos são inevitáveis; é impossível resolver o problema numericamente em um espaço infinito, devido à limitação da memória de armazenamento; e a realização de um número finito de cálculos em uma determinada quantidade de tempo, necessitando assim da utilização plena dos processadores disponíveis (POTTER e WIGGERT, 2004).

2.3.1. Tipos De Escoamento

Ao realizar uma análise de modelagem de um escoamento, opta-se pelas seguintes classificações de escoamento de fluidos (WHITE, 2002):

- Escoamento permanente ou não permanente;
- Viscoso ou não Viscoso;
- Compressível ou Incompressível;
- Laminar ou Turbulento.

Um escoamento permanente é definido pela invariabilidade das quantidades de escoamento com o tempo, as propriedades não variam com o tempo em um ponto fixo, ou seja:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

em que \mathbf{V} é a componente vetorial da velocidade, p é a pressão, ρ é a densidade do fluido e t é o tempo.

Nos escoamentos viscosos são considerados os efeitos oriundos da propriedade de viscosidade do fluido, que influenciam significativamente no escoamento; escoamentos não viscosos desconsideram a viscosidade do fluido. Em situações experimentais torna-se difícil atribuir a um escoamento o regime não viscoso, uma vez que todos os fluidos de interesse possuem viscosidade; mas pode-se considerar a não viscosidade se no escoamento houver tensões de cisalhamento tão pequenas e em áreas tão pequenas que sejam desprezíveis (POTTER e WIGGERT, 2004).

Em escoamentos externos – escoamentos fora de um corpo e uma classe primária de escoamentos – pode-se optar pela análise não viscosa, como por exemplo, em aerofólios ou hidrofólios que são basicamente escoamentos em torno de corpos com linhas de corrente ao redor; porém todos os efeitos não viscosos são válidos fora de uma camada anexa ao contorno do corpo em estudo chamada camada limite. Esta camada concentra os efeitos da viscosidade, onde a velocidade do fluido junto à estrutura é igual à da estrutura (POTTER e WIGGERT, 2004).

Sobre escoamentos compressíveis e incompressíveis, a compressibilidade de um fluido está ligada à sua capacidade de mover-se a velocidades comparáveis à sua velocidade do som e sofrer variações em sua massa específica. Um escoamento incompressível existe se a massa específica de cada partícula permanece constante no seu movimento através do campo de escoamento (WHITE, 2002).

O parâmetro que rege a condição de compressibilidade dos fluidos é o *número de Mach* M , em que valores de $M > 0,3$, o fluido varia de massa específica de forma a ser considerada na análise, enquanto $M \leq 0,3$ indicam variações de massa específica menor que 3%, atribuindo-se assim a condição de fluido incompressível. O número de Mach é definido por:

$$M = V/c \quad (4)$$

em que V é a velocidade do fluido e $c = \sqrt{kRT}$ é a velocidade da onda (POTTER e WIGGERT, 2004).

O escoamento também pode apresentar uma mudança no padrão do fluxo do fluido, classificando assim o escoamento em laminar, transitório ou turbulento. De um fluxo suave e permanente (laminar), com o aumento do número de Reynolds o fluxo em regime de transição apresenta uma instabilidade no escoamento laminar e a um número de Reynolds alto o bastante ele torna-se agitado (turbulento), conforme a Figura 1.

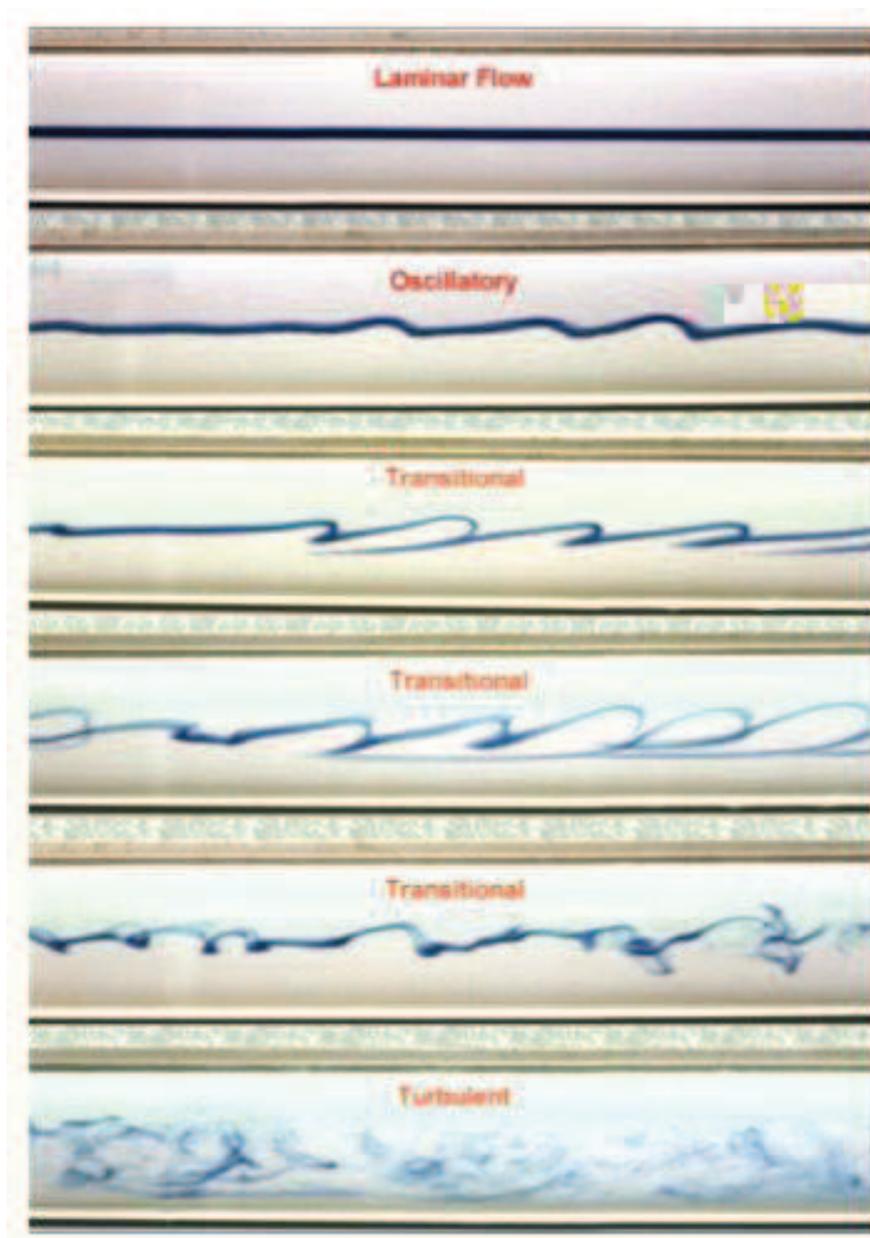


Figura 1: Regimes de escoamento em função no número de Reynolds.

Fonte: (RODRIGUES, 2009)

O regime de escoamento laminar é caracterizado pela velocidade das partículas do fluido em movimento, e por não se misturarem com partículas vizinhas durante o fluxo. Nesse regime as tensões de cisalhamento viscosas tem proporções importantes. No escoamento turbulento as partículas se movem aleatoriamente, assim como o comportamento temporal e espacial da velocidade e da pressão. Se no regime laminar as partículas não se misturam, o regime turbulento (ou turbulência) tem como característica a rápida e aleatória mistura das partículas, tomando como exemplo a injeção de um corante em um escoamento turbulento rapidamente misturado ao fluido (POTTER e WIGGERT, 2004).

2.3.2. *Propriedades Do Escoamento Turbulento*

2.3.2.1. Número de Reynolds

Famoso e importante parâmetro da mecânica dos fluidos, tem como papel distinguir por meio de um número adimensional o regime laminar do turbulento, cuja fórmula é (POTTER e WIGGERT, 2004):

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (5)$$

em que ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e ν é a velocidade cinemática do fluido, L é o comprimento característico (diâmetro da tubulação, por exemplo) e V é a velocidade característica.

A concepção do número de Reynolds vem da razão entre as forças inerciais do fluido e os efeitos viscosos do fluido. Alguns casos específicos podem ser observados, como desconsiderar as forças inerciais se o numero de Reynolds for muito próximo de zero e analogamente desconsiderar as forças viscosas se o número de Reynolds for alto (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 1997).

2.3.2.2. Equações Regentes

As equações que definem o fluxo de um fluido viscoso e compressível são as equações tridimensionais de Navier-Stokes para fluxos transientes, que

descrevem o escoamento conforme a lei de conservação da massa e das propriedades do fluido. Para escoamentos de fluidos incompressíveis, as equações de Navier-Stokes para coordenadas cartesianas resultam em:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

A lei de conservação da massa e energia podem ser descritas nas equações 9 e 10 (BIRD, STEWART e LIGHTFOOT, 2002).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial}{\partial x}(v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z) \right) = 0 \quad (9)$$

$$\rho \hat{C}_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (10)$$

em que v_x , v_y e v_z são as velocidades nas direções x , y e z , respectivamente, ρ é a densidade, p é a pressão, ν é a viscosidade cinemática, k é a condutividade térmica, C_p é a capacidade calorífica à pressão constante e T é a temperatura absoluta.

Em escoamentos incompressíveis e isotérmicos, a equação de energia fica desacoplada e os valores de pressão podem ser obtidos numericamente através de métodos implícitos ou por intermédio das equações de conservação da massa e momento utilizando métodos de compressibilidade artificial.

2.3.2.3. Modelo De Turbulência k- ε

Dentre os modelos de turbulência conhecidos, como Omega Reynolds Stress, LRR Reynolds Stress, Shear Stress Transport, K Omega, entre outros, o modelo mais conhecido e utilizado nos problemas de escoamento de fluidos – além de apresentar maior proximidade com dados experimentais – é o modelo de turbulência k-epsilon, ou referenciado algumas vezes como *standard k- ε model*. Este modelo de turbulência foi concebido inicialmente para modelar problemas de comprimento de mistura, buscando evitar a solução pelo modelo algébrico de turbulência em escoamentos complexos (BARDINA, HUANG e COAKLEY, 1997).

O modelo $k-\varepsilon$ produz resultados satisfatórios quando aplicados à escoamentos com valores de gradientes de pressão nulos ou pequenos, independente da condição de viscosidade (escoamento viscoso ou não viscoso), porém perde precisão ao aplicar maiores valores de gradientes de pressão, além de requerer uma malha mais refinada em torno das superfícies do sólido imerso (se for o caso) ou funções de amortecimento nas paredes (BARDINA, HUANG e COAKLEY, 1997).

As equações deste modelo são definidas por funções que descrevem a energia cinética da turbulência e sua taxa de dissipação. Suas propriedades escalares são: k , que modela a equação de transporte da energia cinética turbulenta conforme equação 11 e ε , que modela a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, conforme a equação 12 (HEUERT e KHATCHATOURIAN, 2007). Os índices i, j indicam a dimensionalidade do fluxo considerado: 1 a 2 para 2D e 1 a 3 para 3D (Notação de Einstein).

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b + \rho \varepsilon + Y_m \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

em que G_k é a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média, G_b geração de energia cinética turbulenta devido às variações de velocidade, Y_m representa a parcela na taxa de dissipação total em função da variação volumétrica de escoamentos compressíveis, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes e σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente. As constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_k e σ_ε assumem os valores numéricos presentes na Tabela 1:

Tabela 1: Constantes presentes nas equações do modelo de turbulência $k-\varepsilon$

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
1,44	1,92	0,09	1,0	1,3

Fonte: SOUSA (2011)

2.3.2.4. Viscosidade

Parâmetro físico essencial na formação da turbulência, a viscosidade permite ser entendida como o atrito interno do fluido e a aderência à superfície do escoamento. Além disso, a turbulência é responsável também pelas perdas de energia no fluxo em tubulações, dutos, encanamentos e canais (POTTER e WIGGERT, 2004), também pela rotação e deformação das partículas em decorrência desta (SCHIOZER, 1996).

A viscosidade está atrelada à taxa de deformação do fluido por cisalhamento no elemento de fluido, e esta tensão de cisalhamento decorre em um movimento do elemento a uma taxa de deformação inversamente proporcional ao coeficiente de viscosidade μ , respeitando a seguinte relação (WHITE, 2002):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (13)$$

O estudo da viscosidade, porém, não visa avaliar a deformação decorrente desta, mas seu efeito na velocidade de escoamento, determinando assim o perfil de velocidade em função da posição de uma partícula e em função do tempo - de forma mais genérica, $V(x, y, z, t)$ (WHITE, 2002).

É comum nas equações correntes em mecânica dos fluidos dividir a viscosidade μ pela massa específica ρ , obtendo assim a *viscosidade cinemática* ν . Em escoamentos compressíveis (gases, por exemplo) a densidade (logo, a viscosidade cinemática) varia conforme a pressão (POTTER e WIGGERT, 2004).

Além da formação da turbulência, perda de energia e rotação das partículas, a viscosidade também é aplicável em outros fenômenos presentes no escoamento de fluidos, em especial ligados à existência de fronteiras sólidas, tais como (SCHIOZER, 1996):

- Escoamento de deformação e camada limite: Em números de Reynolds próximos de zero, a viscosidade se torna preponderante no escoamento, a pressão e a velocidade em uma partícula dependem somente das tensões de cisalhamento no fluido. Por exemplo, uma esfera deslocando-se em um óleo viscoso é um caso de escoamento de deformação. Em fluidos com baixa viscosidade e, como consequência o número de Reynolds poder assumir valores mais altos, o gradiente de velocidade é alto e fora da camada limite o escoamento é tratado como potencial, podendo assim denominar como escoamento de camada limite.

- Descolamento ou separação: Supondo um escoamento em torno de um corpo qualquer (cilindro, por exemplo), na parte posterior ao escoamento ocorre uma distribuição de pressões adversa o suficiente para que o escoamento se afaste da superfície e o fluido se movimente no sentido contrário ao escoamento (separação da camada limite do contorno da superfície). Este fenômeno é claramente desfavorável, uma vez que as pressões na parte anterior do corpo geram uma resistência ao escoamento.
- Esteira: o fenômeno de descolamento gera uma região entre as linhas de escoamento potencial chamada esteira, onde ocorre a formação de vórtices. Estes merecem atenção especial no estudo de um escoamento viscoso, pois o despreendimento de vórtices aplica uma força cíclica sobre o corpo, podendo gerar vibrações, possibilitando a ocorrência da ressonância.
- Arrasto e sustentação: um fluido em movimento em contato com a superfície de um corpo sólido exerce uma força sobre esta superfície, não somente pelas partículas em contato, mas de todas as partículas do fluido. Esta força varia conforme vários parâmetros, como formato do corpo, rugosidade, viscosidade do fluido, gradiente de pressão e velocidade, massa específica, dentre outros, que atuam com maior ou menor importância na determinação desta força. Comumente, esta força é decomposta em direções ortogonais, em geral uma das direções na direção do vetor paralelo à direção do escoamento, gerando-se assim a resistência de arrasto F_d (sendo este paralelo à direção do escoamento) e a resistência de sustentação F_l , obtidos da seguinte forma:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V_0^2 \quad (14)$$

$$F_l = \frac{1}{2} C_l \rho A V_0^2 \quad (15)$$

em que ρ é a densidade do fluido, A é a área da seção transversal, V_0 é a velocidade relativa de escoamento, C_d e C_l são os coeficientes de arrasto e sustentação, respectivamente, podendo ser calculados através de experimentos, por meios analíticos ou por meios numéricos, conforme foi realizado neste trabalho.

3. INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

Dentre as áreas que estudam a interação fluido-estrutura, a que merece maior destaque é a disciplina da aeroelasticidade, que estuda a interação entre as forças aerodinâmicas e corpos deformáveis com ênfase ao projeto e desenvolvimento de aeronaves e veículos espaciais (BIS PLINGHOFF, 1996 apud SANCHES, 2011). Destaca-se também aplicação da interação fluido-estrutura em outros problemas da engenharia como estruturas navais, estruturas de represas, dutos flexíveis com escoamento interno (hemodinâmica, por exemplo), entre outros (TEIXEIRA, 2001).

Antes do desenvolvimento das técnicas numéricas para a resolução de problemas envolvendo a interação fluido-estrutura, os estudos relativos a este tema eram feitos de forma totalmente desacoplada, onde a interface sólido-líquido modelada era considerada rígida, resultando em uma distribuição de pressões ao longo da interface e tomada para a análise da estrutura (BRAUN, 2007).

Atualmente muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de produzir algoritmos eficientes para a análise acoplada de interação fluido-estrutura tais como Sanches (2010a), Sanches (2010b), Sanches (2011), Bathe e Zhang (2004), Bazilevs *et al.*, (2010), Khurram e Masud (2006), Masud, Bhanabhagvanwala e Khurram (2007), Cirak e Radovitzky (2005), Teixeira e Awruch (2005). Busca-se simular fluidos compressíveis e incompressíveis, newtonianos ou não, viscosos ou não, é uma necessidade desses modelos de interação fluido-estrutura, assim como considerar o comportamento elástico e elastoplástico das estruturas, não linearidade geométrica e efeitos termodinâmicos, e todas essas características atreladas à confecção de um código eficiente e preciso (TEIXEIRA, 2001).

3.1. EFEITOS DO VENTO EM ESTRUTURAS

O escoamento de vento promove efeitos estáticos e dinâmicos sobre uma estrutura. Se a estrutura responde se deformando à ação do vento, os efeitos dinâmicos devem ser adicionados à análise estática do vento. Estruturas mais suscetíveis aos efeitos dinâmicos e aerodinâmicos são em geral altas e delgadas, especialmente as que se enquadram nos seguintes aspectos:

a) Edifícios e estruturas fechadas com proporção entre altura e menor dimensão lateral próxima ou superior a 5,0;

b) Edifícios e estruturas fechadas cuja frequência natural do primeiro modo é inferior a 1,0 Hz (ADHIKARI, 2010).

3.1.1. Desprendimento de Vórtices

Um objeto submetido ao fluxo do vento pode causar uma pressão positiva à barlavento e pressão negativa à sotavento do objeto. Esse gradiente de pressões pode provocar a formação da esteira de vórtices. Em estruturas, a maneira de como estas agem ante ao escoamento de vento é em função da frequência do desprendimento de vórtices. Se a frequência do desprendimento de vórtices não é próxima ao modo de vibração da estrutura, esta se comporta como se fosse totalmente rígido. Mas quando estas frequências coincidem ocorre o *lock-in*, condição caracterizada pela oscilação da estrutura com maiores amplitudes (SIMIU e SCANLAN, 1996 apud SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001). O *lock-in* é ilustrado na Figura 2:

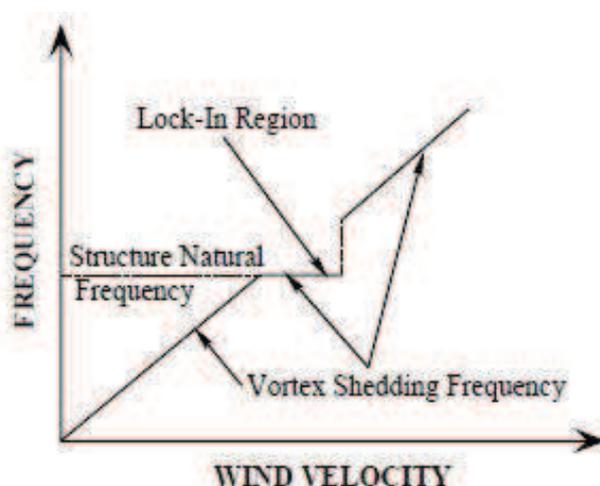


Figura 2: Frequência de desprendimento de vórtices e modo de vibração da estrutura.

Fonte: (SIMIU e SCANLAN, 1996)

Nota-se que as frequências são iguais em uma determinada faixa de velocidades de vento, e ao aumentar esta velocidade a frequência do

desprendimento de vórtices se desprende do modo de vibração da estrutura. A extensão desta faixa de *lock-in* depende do número de Reynolds (Equação 5).

A variação do número de Reynolds, como foi descrito, altera o regime de escoamento e com isso o aspecto do comportamento do fluido ao passar por um corpo submerso. Toma-se como exemplo o escoamento em torno de um cilindro, conforme as figuras que se seguem (SCHIOZER, 1996):

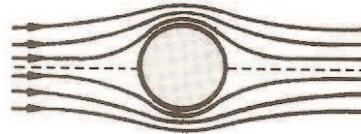


Figura 3: $Re < 1$

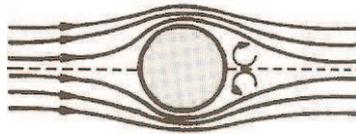


Figura 4: $1 < Re < 50$

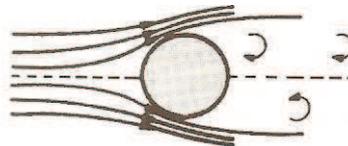


Figura 5: $50 < Re < 5000$

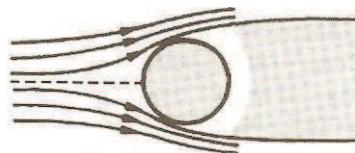


Figura 6: $10^4 < Re < 5 \times 10^5$

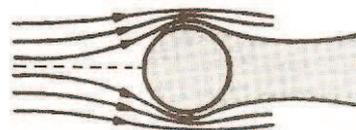


Figura 7: $Re > 5 \times 10^5$

Fonte: (SCHIOZER, 1996)

Na Figura 3 o escoamento é de deformação, permitindo traçar um plano de simetria vertical no centro do cilindro. Conforme o número de Reynolds se eleva, na

Figura 4 nota-se o desprendimento da camada-limite e o aparecimento de dois vórtices simétricos na parte posterior ao escoamento. Na Figura 5 surge uma configuração de escoamento denominada Esteira de vórtices de Kármán, que possui como características sentidos de rotação opostas e a longa distância do corpo até a dissipação dos vórtices formados. Na Figura 6 observa-se o regime subcrítico: o fluxo na região da esteira é irregular e caótica, com a separação da camada limite a 80° do ponto de estagnação frontal. Finalmente a Figura 7 ilustra o regime supercrítico, com o descolamento da camada-limite a 130° , a esteira torna-se mais delgada e assume uma configuração mínima de espessura.

Nas figuras 8 a 11 são ilustradas as linhas de fluxo passando por uma placa, aumentando-se o número de Reynolds é possível visualizar o comportamento do desprendimento de vórtices: Para um número de Reynolds muito baixo o fluido somente contorna a superfície do corpo, e a um maior número de Reynolds, o fluxo começa a separar em torno das bordas e vórtices aparecem logo após o corpo. O aumento no número de Reynolds causa a criação de vórtices cíclicos alternados ao longo do fluxo. A partir daí, os efeitos inerciais se tornam dominante sobre os efeitos viscosos (SIMIU e SCANLAN, 1996 apud SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001).

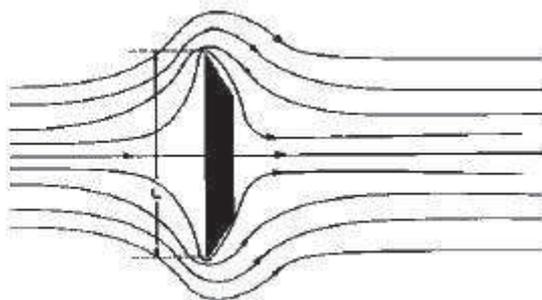


Figura 8: escoamento laminar em placa em comprimento L: $Re = 0.3$

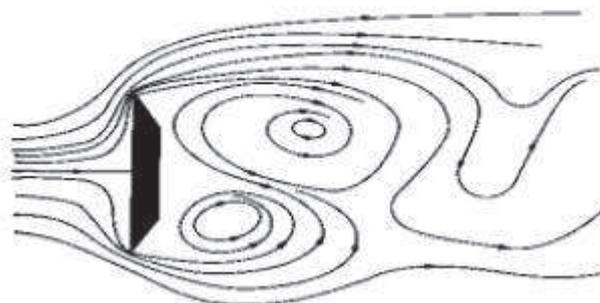


Figura 9: Início do desprendimento de vórtices: $Re = 10$

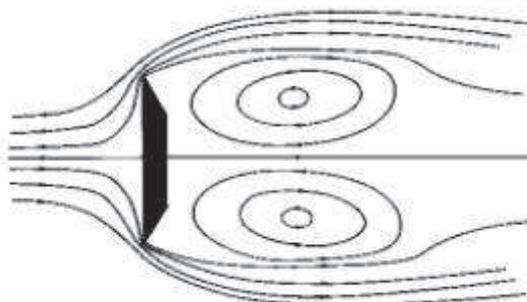


Figura 10: vórtices em um plano simétrico: $Re = 250$

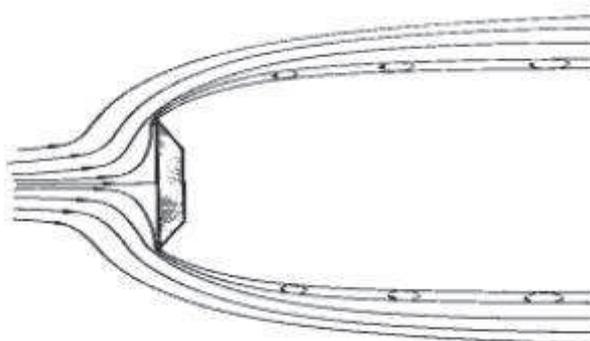


Figura 11: Fluxo supercrítico: $Re > 1000$

Fonte: SIMIU e SCANLAN, 1996 apud SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001.

Como foi possível observar, em outros formatos de corpos submersos a sequência de ocorrências é a mesma, porém assumindo diferentes números de

Reynolds. O desprendimento de vórtices pode ser descrito pelo Número De Strouhal St , que em mecânica dos fluidos é um adimensional utilizado para descrever problemas transitórios que apresentam oscilações e cuja equação é dada por:

$$St = \frac{\omega l}{U} \quad (16)$$

em que ω é a frequência de oscilações, l é o comprimento de referência e U , a velocidade do fluido (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 1997).

A NBR 6123/1988 prescreve que a sincronização de uma das frequências naturais da estrutura ou um elemento estrutural com a frequência de desprendimento de vórtices resulta em movimentos transversais à direção do vento, onde a energia dos vórtices são influenciadas pela oscilação da estrutura (ASSOCIAÇÃO... 1988).

3.1.2. Flutter

O fenômeno de *flutter* é uma preocupação importante no projeto de aerofólios e pontes, onde a mais famosa ponte a sucumbir a este fenômeno foi a *Tacoma Narrows Bridge*. Este fenômeno pode ser definido como uma condição de amortecimento aerodinâmico negativo, em que a deformação da estrutura aumenta até falhar - conhecida como *flutter* clássico. Existem outros tipos de *flutter*, sendo eles (SIMIU e SCANLAN, 1996 apud SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001):

- *Stall flutter*: é caracterizado pela oscilação com um grau de liberdade de aerofólios em torção devido às características não lineares da sustentação. Pode também ocorrer com estruturas com superfícies largas, dependendo do ângulo de incidência do vento. A oscilação de torção de um sinal de parada de tráfego sobre o seu poste é um exemplo desse fenômeno.
- *Panel flutter*: oscilação causada em painéis de foguetes de grande porte, causada pela passagem de alta velocidade de ar ao longo do painel. Os casos mais proeminentes têm estado em regime de fluxo supersônico, sem muito interesse para escoamento de vento em estruturas.

O movimento provocado pelo fluxo do vento ou será amortecido ou vai crescer indefinidamente até a falha. A linha divisória teórica entre esses dois estados é a condição crítica de vibração, e a velocidade do vento nesta condição é chamada

de velocidade do vento crítico. Quando a velocidade do vento crítico para a vibração é excedido, a estrutura se torna instável e experimenta deformações excessivas. Por isso, é um fator importante a ser considerado no projeto. Os métodos disponíveis para estudar a instabilidade são o método de oscilação livre e o método de oscilações forçadas (SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001).

3.1.2.1. Método de Oscilação Livre

Neste método, a estrutura é suspensa elasticamente e é dada uma perturbação inicial, deixando-a oscilar livremente. A sustentação, arrasto e momento gerado devido ao deslocamento é então medida, gerando um histórico temporal de dados.

3.1.2.2. Método de Oscilações Forçadas

Neste método, a estrutura é forçada num movimento de torção em relação ao fluxo, com uma frequência e amplitude prescrita. A sustentação e momento gerado devido a esta força aplicada é medida e usada para o cálculo das derivadas aerodinâmicas. Estas são calculadas em seguida, utilizadas para o cálculo da velocidade crítica do *flutter*.

3.1.3. *Galloping*

Galloping é uma instabilidade típica de estruturas delgadas. Ocorre em frequências de oscilação relativamente baixas, em estruturas alongadas e paredes rugosas. A frequência natural da estrutura de resposta ao *galloping* é muito mais baixa do que a frequência de formação de vórtices, e pode ser considerado como um fenômeno de baixa frequência. Existem dois tipos de *galloping*: *Wake* e *Across-wind* (SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001). A NBR 6213/1988 aponta estruturas com seção retangular ou triangular, como seções vazadas de pilares altos mais propensos a este fenômeno.

3.1.3.1. Wake Galloping

Toma-se como exemplo dois cilindros sujeitos a uma velocidade de vento: um a barlavento, produzindo uma esteira, e um a sotavento, separados a uma distância não maior que alguns diâmetros do cilindro. O cilindro a jusante é sujeito a oscilações induzidas pela esteira turbulenta do cilindro a montante. Devido a isto, o cilindro situado à frente do escoamento tende a girar no sentido horário, e o outro cilindro no sentido contrário, gerando assim nos corpos uma tendência a torção. A Figura 12 ilustra este fenômeno.

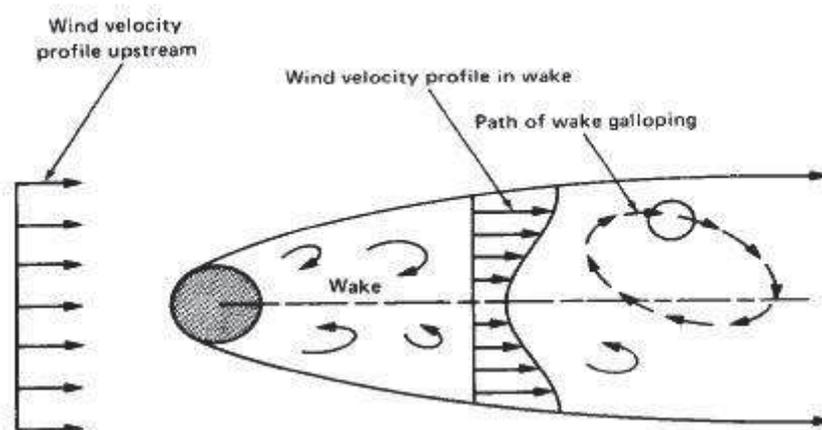


Figura 12: Formação do *wake-galloping*

Fonte: (SIMIU e SCANLAN, 1996 apud SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001)

3.1.3.2. Across-Wind Galloping

Em pontes, trata-se de uma instabilidade iniciada por um vento turbulento soprando-se transversalmente através do tabuleiro, gerando neste uma vibração transversal (SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001 *apud* LIU, 1991). Ao grau que a seção vibra transversalmente em uma velocidade de vento constante, a velocidade relativa varia, alterando assim o ângulo de ataque α . Em virtude da alteração em α , um aumento ou diminuição da força de sustentação do corpo ocorre. Se um aumento de α provoca um aumento na força de sustentação da direção oposta ao fluxo, a situação é estável. Mas, por outro lado, se o contrário ocorre, isto é, um aumento de α provoca uma diminuição da força de sustentação, então a situação é instável e ocorre o *Galloping*. A Figura 13 fornece uma ilustração deste processo.

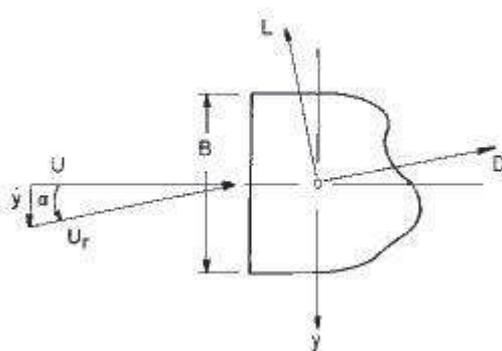


Figura 13: Across-wind galloping

Fonte: (SIMIU e SCANLAN, 1996 apud SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001).

3.1.4. Buffeting

É um fenômeno causado por alterações na velocidade do vento em regimes de escoamento turbulentos, provocando carregamentos não estáticos. Podem ser subdivididos quanto à ocorrência em aerofólios e em estruturas ou obstáculos. Na ocorrência em aerofólios (facilmente comparável a pontes) surgem forças verticais e de torção consideráveis e que levam a grandes amplitudes de oscilação, mesmo a baixas velocidades. Pode ocorrer também com edifícios altos e próximos, onde a esteira da turbulência afeta outros edifícios, fazendo-os experimentar velocidades de vento irregulares e instáveis (SELVAM e GOVINDASWAMY, 2001). Edifícios com seções que se assemelham a um aerofólio (altos, e com a menor dimensão da seção não próxima à maior dimensão) (ASSOCIAÇÃO..., 1988).

3.2. FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES

A NBR 6123/1988, que trata das forças atuantes em uma estrutura devido a ação do vento, tem por objetivo estabelecer as condições para o cálculo das ações dinâmicas e estáticas do vento, para determinar as cargas atuantes no cálculo estrutural de edificações.

Possui uma metodologia sistemática para determinar as cargas atuantes, sendo possível apresentar uma sequência resumida para a determinação das forças estáticas devidas ao vento:

- i. Determinação da velocidade básica do vento V_0 , conforme a localização definida conforme o mapa de isopletas presente na norma;
- ii. Cálculo da velocidade característica, levando-se em conta fatores como rugosidade do terreno, altura da edificação e grau de segurança requerido;
- iii. Com a velocidade característica, calcula-se a pressão dinâmica;
- iv. Determinação dos coeficientes de pressão em função das características da geometria da estrutura
- v. Cálculo das forças atuantes.

As forças devidas ao vento devem ser consideradas separadamente para elementos de vedação, partes da estrutura e a estrutura como um todo.

A NBR 6123/1988 abrange o cálculo da ação do vento em barras prismáticas, fios, cabos, torres reticuladas, muros, placas, coberturas, cúpulas, abóbadas e telhados curvos, abrange os efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica, efeitos de vizinhança e efeitos do vento em edificações esbeltas.

3.2.1. Pressão Dinâmica

É um dos parâmetros que a NBR 6123/1988 estipula para a determinação das forças em uma estrutura devido à ação do vento. Esta corresponde à Velocidade V_k em condições normais de pressão (1 atm = 1013,2 mbar = 101320 Pa, a 15° C). É dado por:

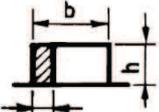
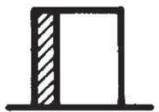
$$q = 0,613 V_k^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (17)$$

3.2.2. Coeficientes de Pressão

A ação do vento provoca pressões ou sucções na estrutura, e a NBR 6123/1988 trata desses gradientes de pressão por meio dos coeficientes de pressão. Estes dependem da geometria da construção, da relação entre as dimensões laterais, da altura e também da existência de aberturas e permeabilidade da edificação. Possui valores definidos para edifícios retangulares, telhados com uma ou mais águas ou em arco e entre outros. Em outros casos que não são descritos na

Norma recomenda-se o ensaio experimental em túnel de vento (ASSOCIAÇÃO... 1988). Pode-se tomar como exemplo o tipo de edificação com planta retangular, conforme a Tabela 2 e a Figura 14:

Tabela 2: coeficientes de pressão e forma externos para paredes de edificações de planta retangular

Altura Relativa	Valores de C_e para								 C_{pe} médio	
	$\alpha=0^\circ$				$\alpha=90^\circ$					
	A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2		
 $0,2 b$ ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	0,7	-0,4	0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	0,7	-0,3	0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1
 $\frac{1}{2} \leq \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	0,7	-0,5	0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,9	-0,4	0,7	-0,3	0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
 $\frac{1}{2} \leq \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1	-0,6	0,8	-0,6	0,8	-0,6	-1	-0,6	-1,2
	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1	-0,5	0,8	-0,3	0,8	-0,6	-1	-0,6	-1,2

Fonte: ASSOCIAÇÃO... (1988).

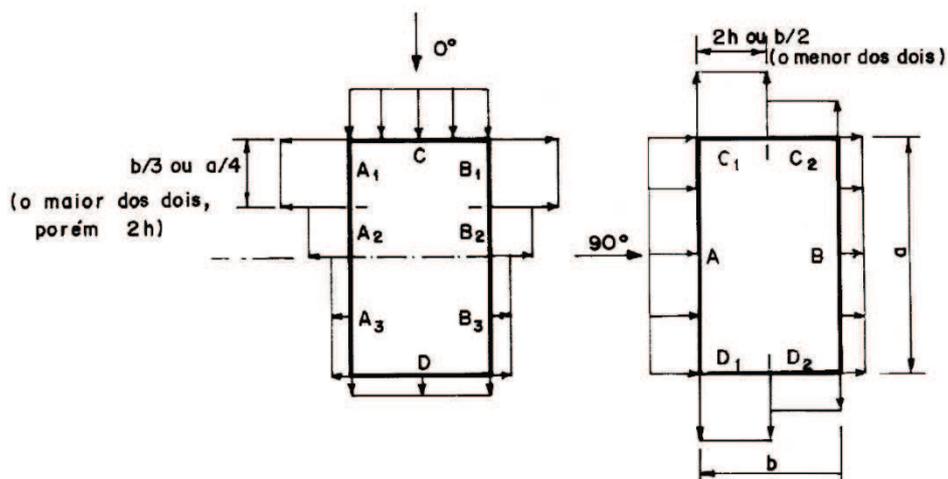


Figura 14: indicação em planta dos coeficientes de pressão e forma externos para paredes de edificações de planta retangular.

Fonte: ASSOCIAÇÃO... (1988).

3.2.3. Velocidade Característica

A velocidade característica do vento é dada por:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (18)$$

em que V_k é a velocidade básica do vento, S_1 é um fator topográfico, S_3 é um fator estatístico (ambos obtidos em tabelas) e S_2 é definida pela expressão:

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p$$

em que z é a altura do centro de gravidade do módulo em metros, F_r é o fator de rajada, b e p são fatores meteorológicos incluídas na NBR 6123/1988.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ANÁLISE NUMÉRICA – MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método de resolução das equações de conservação da massa, energia e momento adotado pelo AnSYS™ CFX é um método híbrido que combina o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Elementos Finitos. O Método dos Volumes Finitos é utilizado na conservação local de movimento em cada nó satisfazendo a conservação global do movimento, e o Método dos Elemento Finitos é utilizado para descrever a variação da solução entre cada elemento (ANSYS, 2005). Este método discretiza as equações de Navier Stokes do domínio, transformando as equações diferenciais em um sistema de equações algébricas resolvido de forma iterativa (SOUSA, 2011).

O método se baseia na subdivisão do domínio em volumes menores (volumes de controle), e então integra-se as equações diferenciais sobre todos os volumes discretizados do domínio (FRANCO, 1993). Este método é muito semelhante ao método das diferenças finitas, já que as equações utilizadas na discretização são iguais, mas possuem formulações distintas. O método das diferenças finitas aproxima as derivadas com séries de Taylor, o método dos volumes finitos tem uma formulação puramente física (SILVA, 2008).

4.2. RECURSOS E METODOLOGIA

Criado em 1970, o AnSYS™ é um aplicativo de simulação virtual destinado a resolução de problemas de engenharia baseado, principalmente, no Método dos Elementos Finitos. O programa consiste em três itens principais: pré-processamento, solução e pós-processamento. No pré-processamento são definidos o tipo de análise, constrói-se a geometria do modelo e do domínio de análise, são inseridas as propriedades do material como módulo de Young, coeficiente de Poisson, densidade etc., constrói-se modelo a ser estudado e seu respectivo domínio de análise, regime de fluxo (laminar, turbulento, compressível, incompressível, adiabático, newtoniano, não newtoniano, entre outros), criação da malha do modelo,

onde são gerados os elementos e nós a partir do modelo e definição das condições de contorno (ANSYS™, 1994).

Este software oferece uma gama de ferramentas facilmente compreensíveis para a análise de escoamento de fluidos em ambientes bidimensionais e tridimensionais, tais como:

- Forças aerodinâmicas atuando em um aerofólio;
- Fluxo supersônico em fuselagens;
- Mistura de fluidos entrando em choque térmico;
- Convecção do ar em cápsulas eletrônicas;
- Estudo de fluxo de calor.

Na solução são definidos os parâmetros de análise (estática, harmônica, transiente, etc.) e suas opções, impostos os graus de liberdade, carregamentos, passos de carga, e realizada a resolução do sistema de equações. No pós-processamento é feita a leitura dos resultados, como tensões, deslocamentos nodais, forças axiais, tensão de Von Mises, entre outros. (ANSYS™, 1994)

O AnSYS™ Workbench é um ambiente desenvolvido para a criação de simulações de vários tipos, abrangendo dentre eles o problema proposto para resolução. Dispõe de recursos como o CFD (*Computational Fluid Dynamics*), otimização de design, desenho da geometria, geração da malha, criação das condições de contorno, solução do problema e criar resultados de fácil visualização e interpretação, como animações e imagens (QUEIROZ, 2008).

A Instituição dispõe de recursos computacionais suficientes para a realização da análise, como computadores com 4 (quatro) núcleos físicos de processamento, 14 (quatorze) GB (gigabytes) de RAM (Random Access Memory), garantindo-se assim o suporte computacional e sua continuidade em posteriores trabalhos de pesquisa.

A metodologia para a realização das simulações se divide em pré-processamento, onde se incluem a criação da geometria e do domínio de análise e da geração da malha, resolução do problema (solve) e pós-processamento.

O pré-processamento é definido primeiramente pelas atribuições de algumas informações pertinentes à análise que se deseja realizar, tais como:

- i. Seleção dos fenômenos que serão modelados e simulados;

- ii. Definição das propriedades dos fluidos, como densidade, viscosidade, condutividade térmica, etc.;
- iii. Determinação das condições de contorno apropriadas aos elementos da malha associados ao contorno do domínio.

Ainda no pré-processamento está a criação das geometrias, onde com o auxílio de um programa de CAD apropriado desenha-se o modelo (sólido) e o domínio fluido onde estará inserido. Para esta etapa, aplicativos como o SolidWorks® e CATIA® são amplamente empregados, mas optou-se por fazer esta etapa com o próprio AnSYS™ Workbench que também dispõe de recursos para tal fim.

Em seguida, deve-se gerar a malha, ou seja, subdividir o domínio em elementos, uma vez que a solução do problema está na resolução das equações de transporte pelos métodos numéricos sobre esses elementos. A precisão da análise depende do número de elementos gerados e da sua distribuição ao longo da malha, onde de maneira geral a precisão melhora com o aumento do número de elementos (ANSYS™, 1994).

Na resolução do problema (solve) é onde se aplicam as técnicas numéricas para solução das equações diferenciais, levando a um sistema de equações lineares de grandes proporções, fazendo-se assim necessária a abordagem numérica (QUEIROZ, 2008).

O pós-processamento é a etapa de visualização e análise dos resultados, onde se permite visualizar campos escalares e vetoriais, gráficos de contorno, visualizações de linhas de velocidade e trajetória das partículas, animações dos fenômenos simulados, etc. (ANSYS™, 1994).

5. VALIDAÇÃO DO ESTUDO: SIMULAÇÃO DE UM ESCOAMENTO ATRAVÉS DE UM CILINDRO

Para que o presente trabalho apresente resultados condizentes com a literatura tomou-se como exemplo inicial o estudo do fluxo de um fluido através de um cilindro.

5.1. GEOMETRIA

Foi utilizado o modelo de domínio apresentado nos estudos de Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012), ilustrado na Figura 15, onde são mostradas também as condições de contorno, adiante explicadas. A criação da geometria buscou repetir as propriedades geométricas do domínio (Figura 16) e a Figura 17 ilustra as dimensões do domínio.

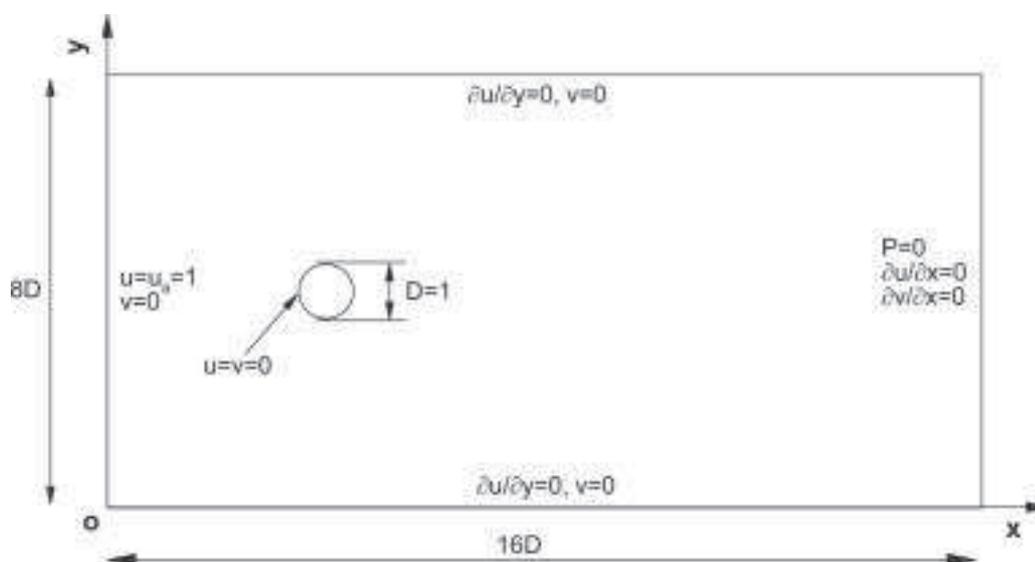


Figura 15: Modelo de análise.

Fonte: Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012)

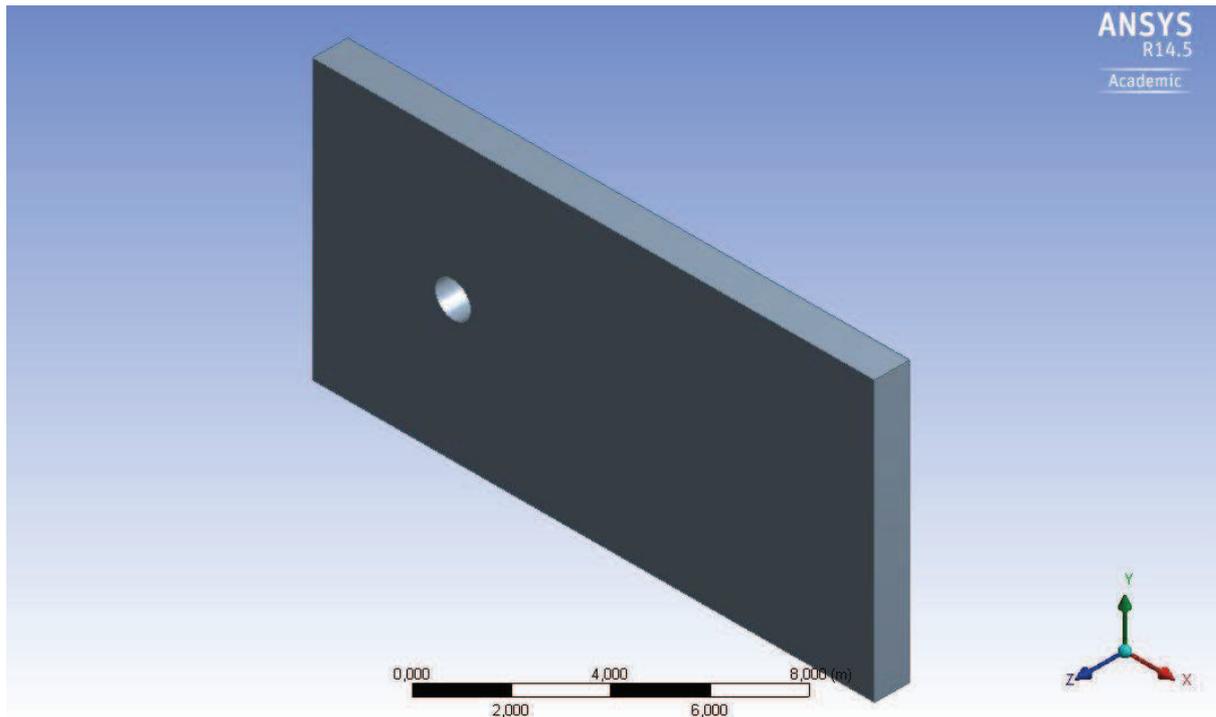


Figura 16: Domínio utilizado.

Fonte: Autoria Própria

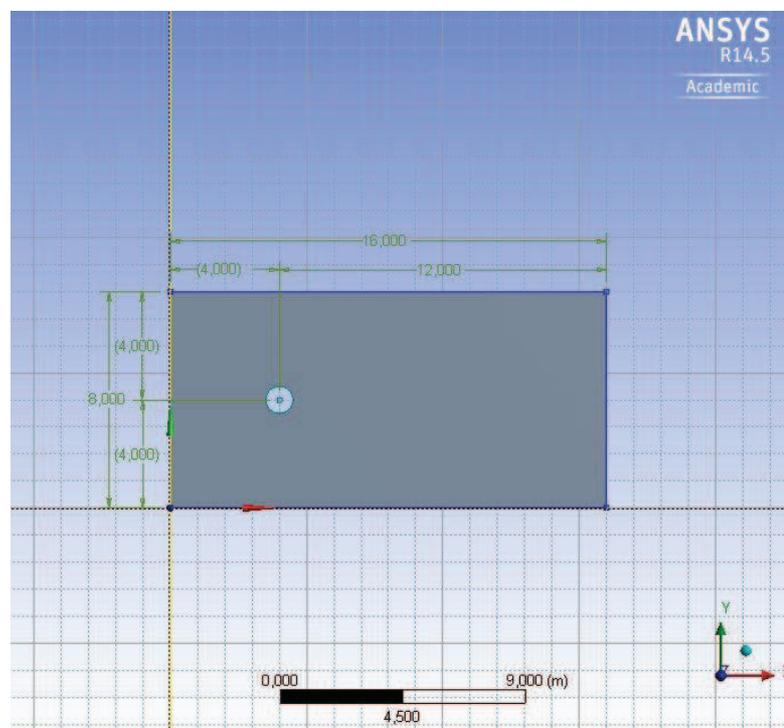


Figura 17: Dimensões do domínio.

Fonte: Autoria Própria

5.2. MALHA

Após a criação do domínio, tem-se o processo de geração da malha. É necessário um maior refinamento na região próxima ao contorno da superfície por onde passa o fluido e na região de formação da turbulência. A Figura 18 ilustra a malha no modelo utilizado como referência (NAJAFIA, AREFMANESHB e ENJILELAA, 2012)

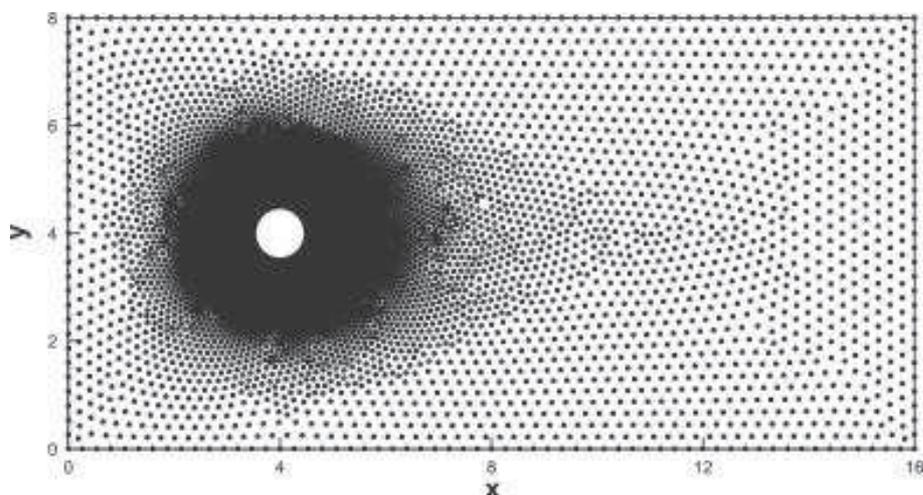


Figura 18: Discretização do domínio do estudo de referência.

Fonte: Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012)

As figuras Figura 19 e o detalhe na Figura 20 ilustram a malha gerada.

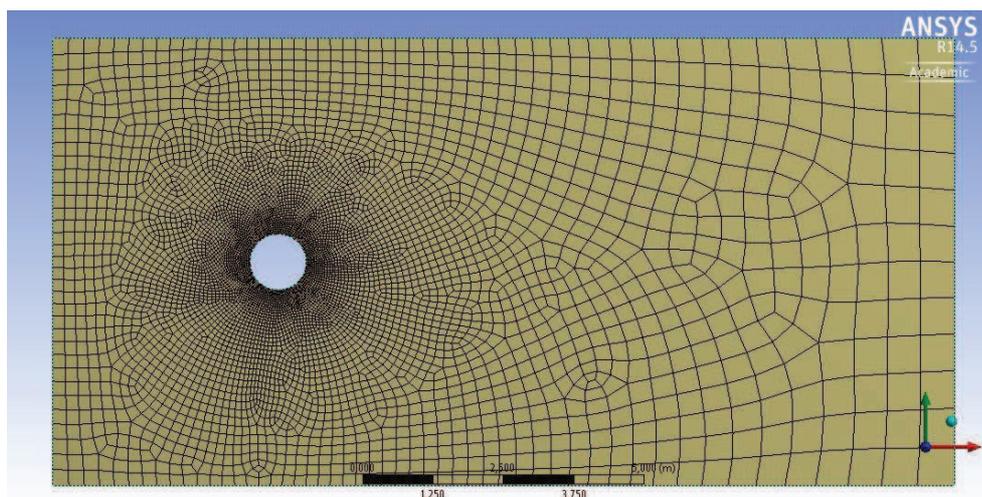


Figura 19: Malha utilizada.

Fonte: Autoria Própria

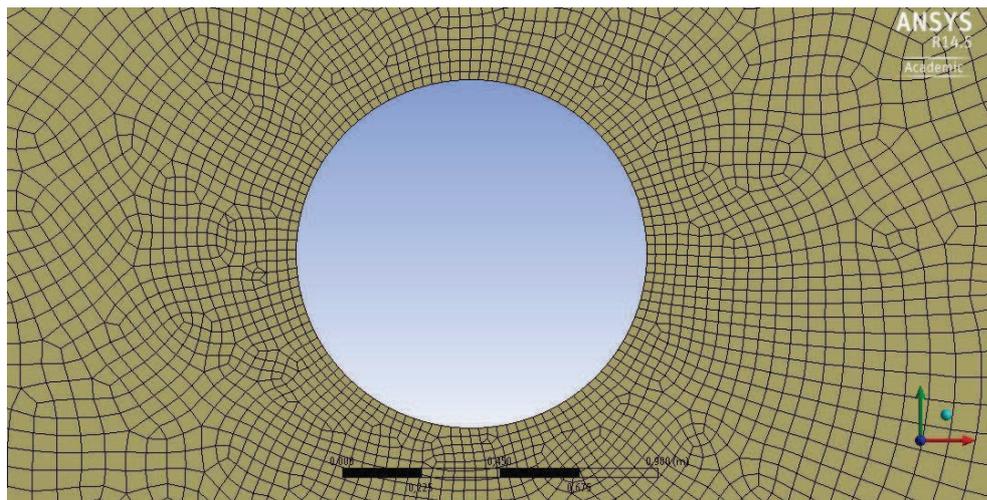


Figura 20: Detalhe do refinamento da malha.

Fonte: Autoria Própria

5.3. PRÉ-PROCESSAMENTO

5.3.1. Material Utilizado

Na simulação realizada foi criado um material genérico, de forma que o número de Reynolds fosse calculado em função da velocidade. As propriedades referentes ao fluido e os números de Reynolds aplicados estão relacionados na Tabela 3:

Tabela 3: Propriedades do fluido.

MATERIAL	
Densidade = 1 [kg/m ³]	
Viscosidade Dinâmica = 1 [kg/(m.s)]	
No. Reynolds	Velocidade [m/s]
100	100
150	150
200	200

Fonte: Autoria Própria

5.3.2. Tipo de Análise

A análise em questão é transiente, com o tempo inicial, tempo total de análise e intervalo de tempo definidos na Tabela 4:

Tabela 4: Tipo de análise

TIPO DE ANÁLISE:
Opção = Transiente
TEMPO INICIAL: 0 [s]
DURAÇÃO DA ANÁLISE: 5 [s]
PASSO DE TEMPO = 0.001 [s]

Fonte: Autoria Própria

Assim, totalizam-se 5000 passos de tempo.

5.3.3. Condições de Contorno e Inicialização

Na Tabela 5 são descritas as condições de contorno utilizadas, sendo indicadas na Figura 21. Cabe salientar que são idênticas às condições apresentadas no trabalho de Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012). A entrada, a superfície delimitada pelo cilindro e a saída foram nomeadas genericamente como “in”, “cilindro” e “out”, respectivamente. Na entrada é aplicada uma velocidade que varia linearmente em função do tempo, aumentando gradativamente até a velocidade selecionada, o contorno do cilindro possui um domínio próprio para a posterior obtenção de resultados no contorno, sem maior importância para a solução do problema e uma abertura com pressão relativa nula. O escoamento desconsidera a modelagem de combustão, transferência de calor e radiação térmica.

Tabela 5: Descrição das condições de contorno

Domínio	Condições de contorno	
Domínio Padrão	in	
	Tipo	ENTRADA
	Velocidade Normal	função(t)
	out	
	Tipo	ABERTURA
	Pressão Relativa	0.0000e+00 [Bar]
	cilindro	
	Tipo	PAREDE
	Massa e Momento	Parede Fixa
Rugosidade	Parede Lisa	

Fonte: Autoria Própria

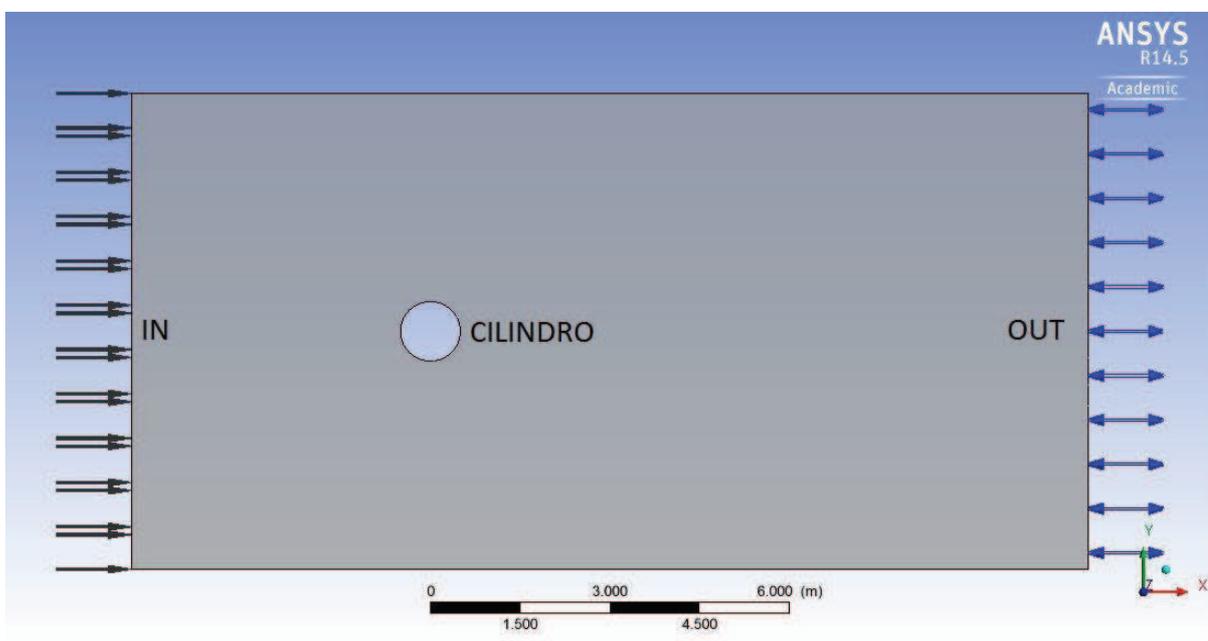


Figura 21: Indicação das condições de fronteira.

Fonte: Autoria Própria

A função(t) aplicada é uma variável da velocidade que a faz variar linearmente com o tempo, para que não ocorra a súbita aplicação da velocidade que geram efeitos de compressibilidade no escoamento e que seja aplicada de forma gradativa. Entre 0 e 2 segundos a velocidade varia até atingir a velocidade esperada, e depois mantém-se constante.

5.4. RESULTADOS

5.4.1. Linhas de Pressão e Velocidade

Para se validar o presente estudo, foi feita uma comparação com os resultados apresentados pela referência com o realizado. Pode ser feita uma comparação das linhas de fluxo do estudo de referência (Figura 22, Figura 26 e Figura 30) em diferentes números de Reynolds, conforme ilustram a Figura 23 e Figura 24 para um número de Reynolds de 100, Figura 27 e Figura 28 para um número de Reynolds de 150 e Figura 31 e Figura 32 para um número de Reynolds de 200. As linhas de pressão são comparadas na Figura 25, Figura 29 e Figura 33.

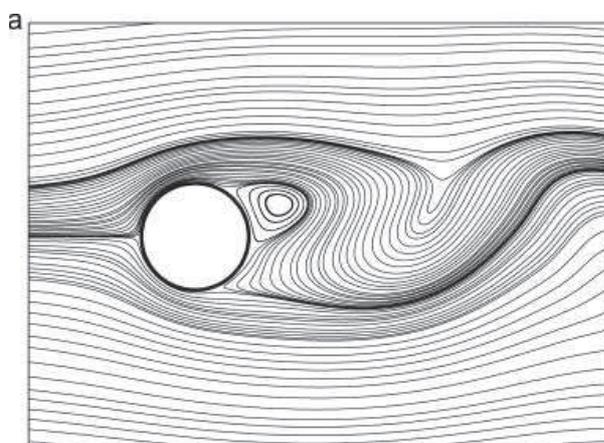


Figura 22: Linhas de corrente do estudo comparado em $Re=100$ (2012).

Fonte: Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012)

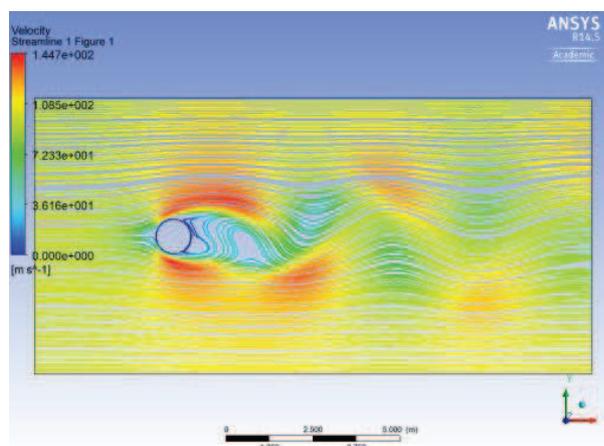


Figura 23: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 100$.

Fonte: Autoria Própria

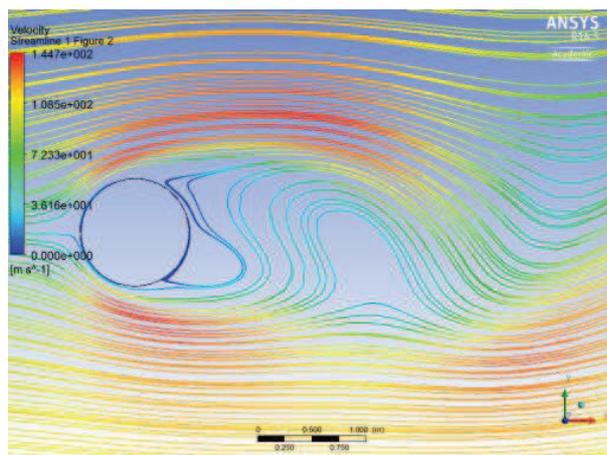


Figura 24: Ampliação das linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 100$.

Fonte: Autoria Própria

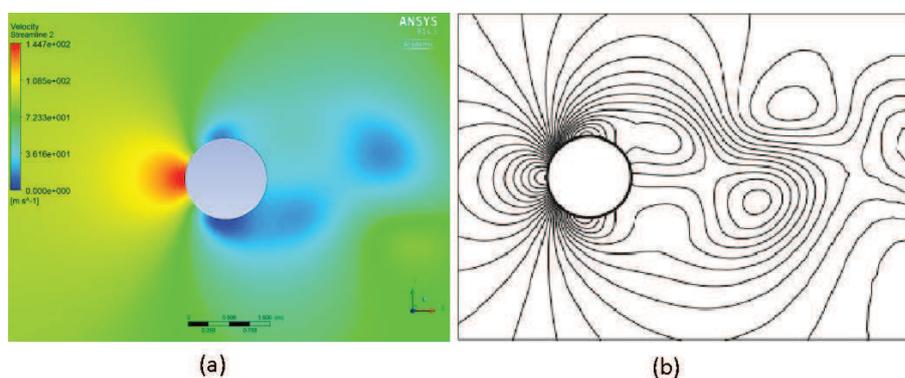


Figura 25: Comparação das linhas de pressão em $Re = 100$

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

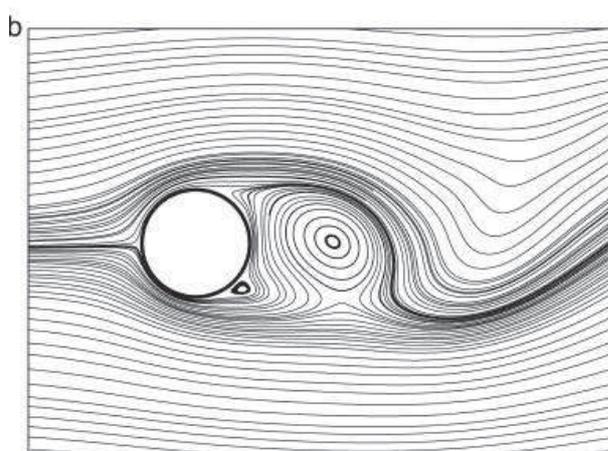


Figura 26: Linhas de corrente do estudo comparado em $Re=150$ (2012).

Fonte: Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012)

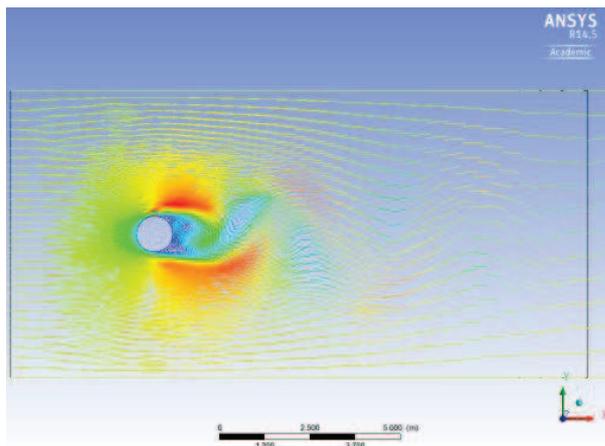


Figura 27: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 150$.

Fonte: Autoria Própria

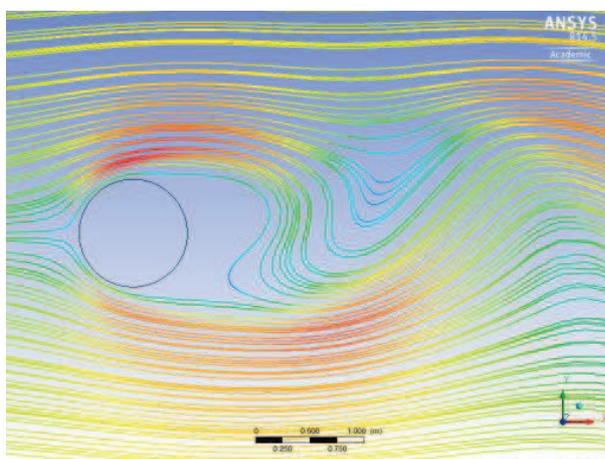


Figura 28: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 150$.

Fonte: Autoria Própria

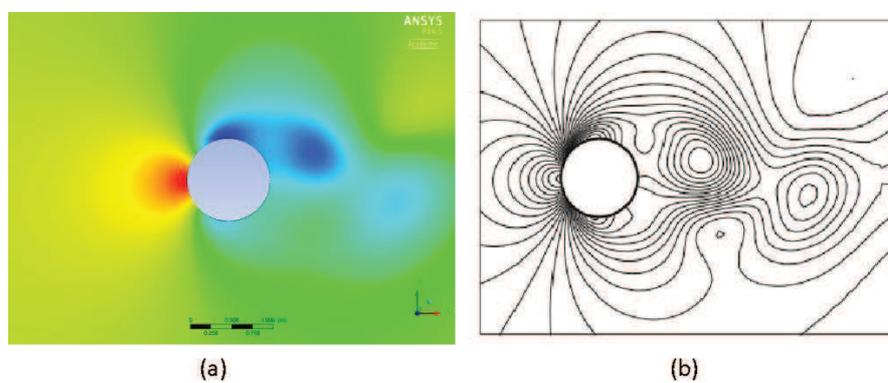


Figura 29: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 150$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

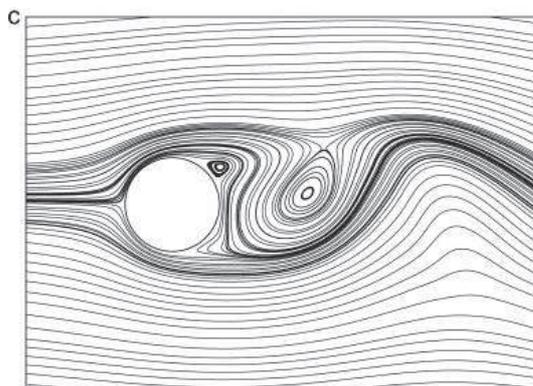


Figura 30: Linhas de corrente do estudo comparado em $Re=200$ (2012).

Fonte: Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012)

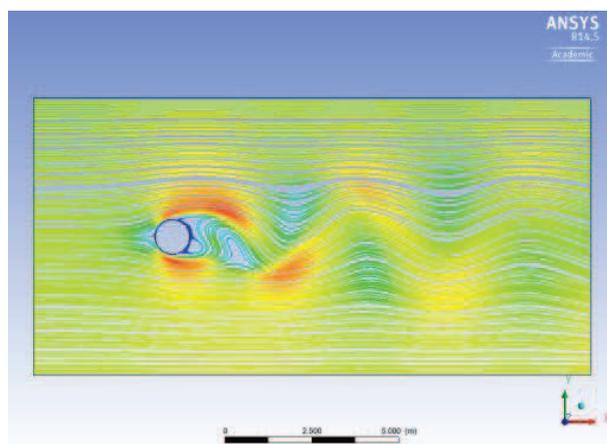


Figura 31: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 200$.

Fonte: Autoria Própria

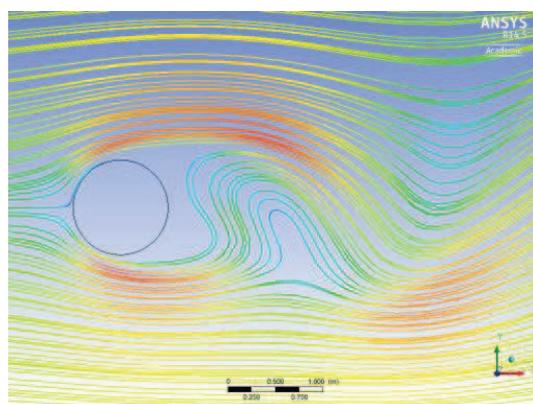


Figura 32: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 200$.

Fonte: Autoria Própria

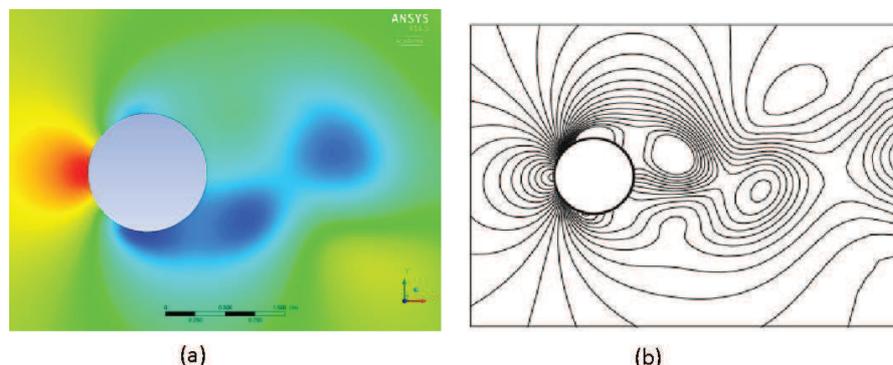


Figura 33: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 200$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

5.4.2. Coeficientes de Arrasto e Sustentação

É possível no pós-processamento elaborar gráficos selecionando-se as variáveis desejadas em X e em Y. Em uma análise transiente, interessam os resultados que variam em função do tempo, no caso, o coeficiente de arrasto e sustentação, definidos nas equações 15 e 16. Para tanto, elaborou-se uma expressão que calcula e armazena os coeficientes supracitados, podendo-se inserir a expressão variando em função do tempo. Desta forma, pode-se representar os gráficos de Coeficiente de Arrasto e Coeficiente de Sustentação em função do tempo, respectivamente; A Figura 34 até a Figura 40 ilustra os resultados obtidos para o coeficiente de arrasto e sustentação em diferentes números de Reynolds.

A Figura 35 até a Figura 40 foi recortada como mostra a Figura 34, mostrando somente as informações após $t = 2$ s, quando o fluxo assume velocidade constante.

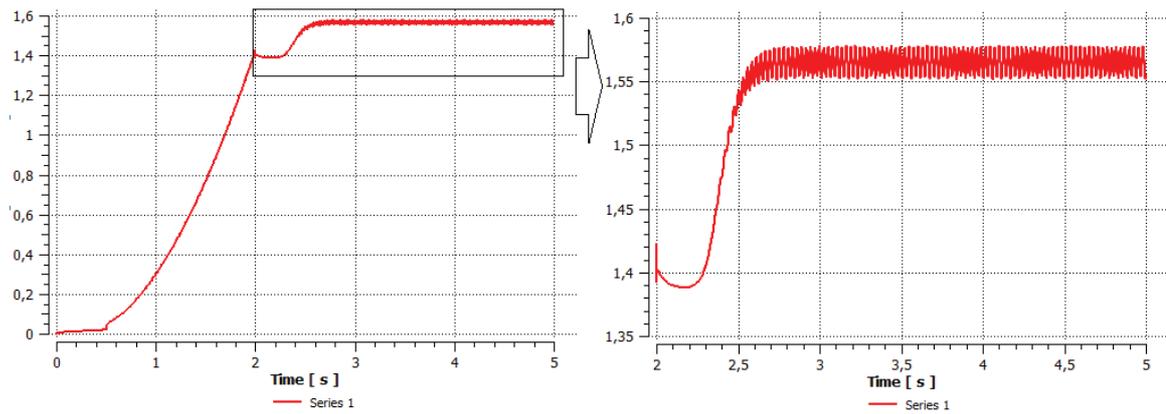


Figura 34: Coeficiente de arrasto em função do tempo, em $Re=100$.

Fonte: Autoria Própria

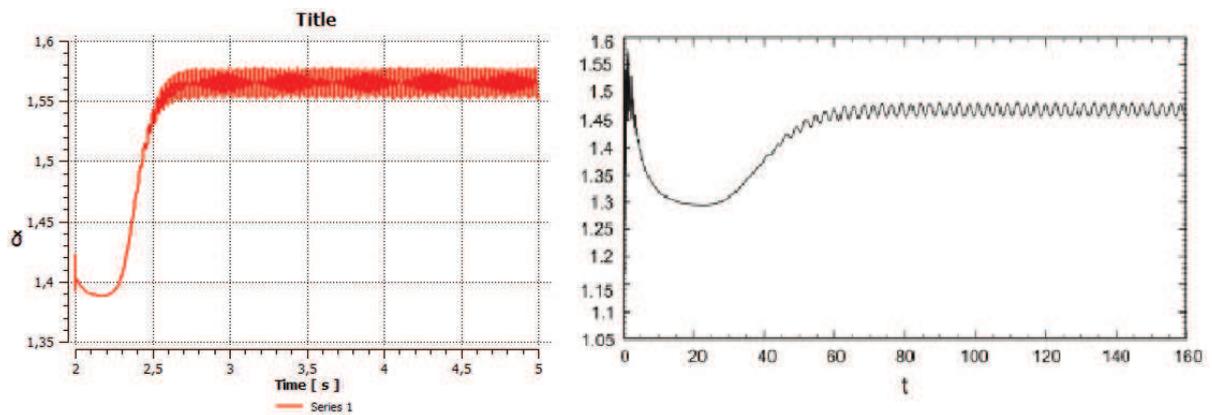


Figura 35: Comparação dos coeficientes de arrasto em função do tempo, em $Re=100$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

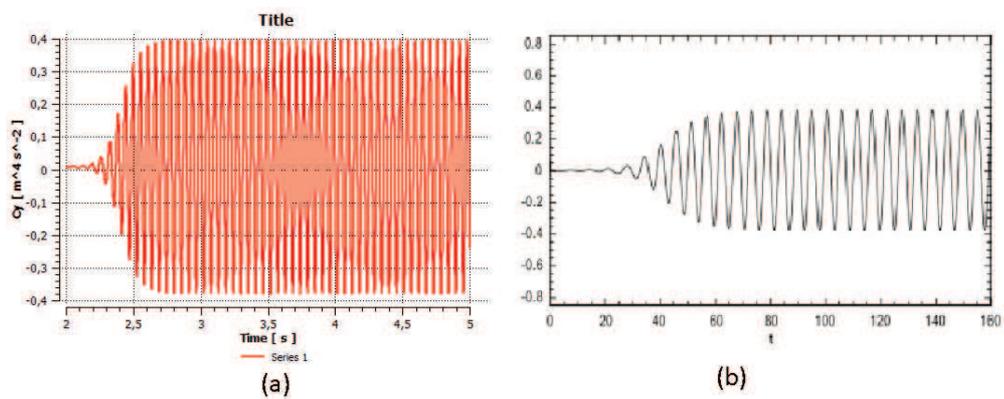


Figura 36: Comparação dos coeficientes de sustentação em função do tempo, em $Re=100$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

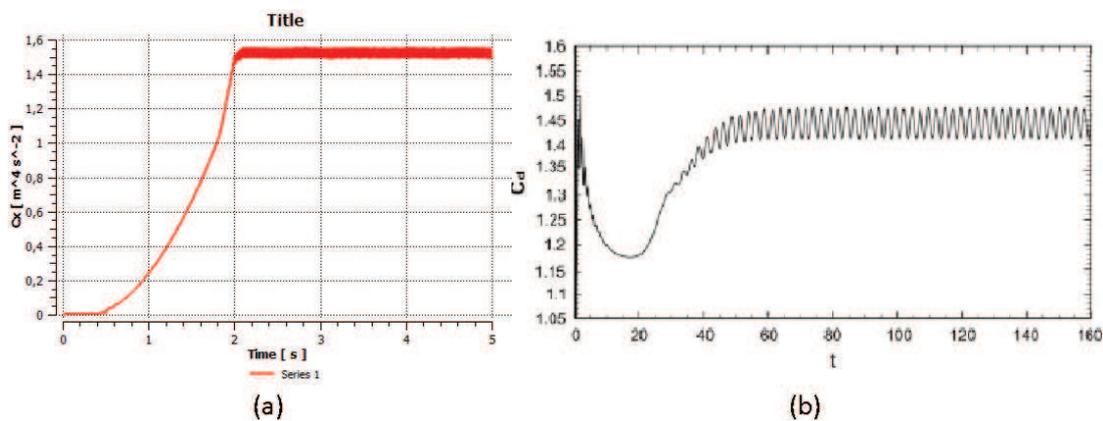


Figura 37: Comparação dos coeficientes de arrasto em função do tempo, em $Re=150$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

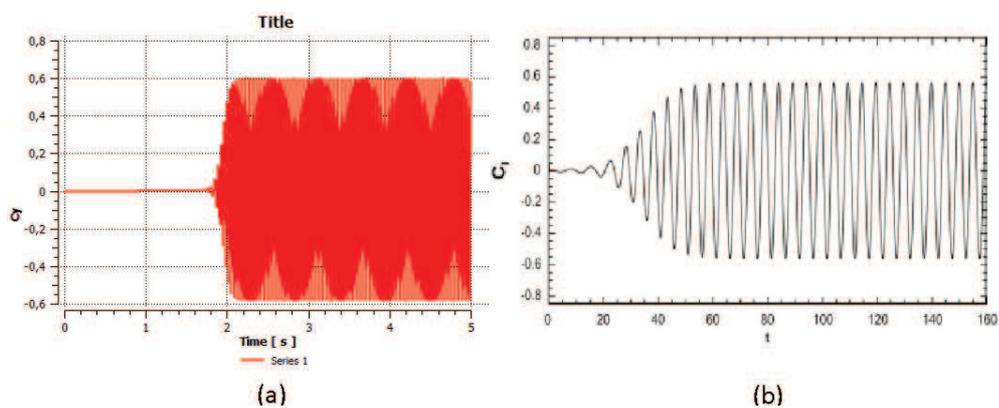


Figura 38: Comparação dos coeficientes de sustentação em função do tempo, em $Re=150$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

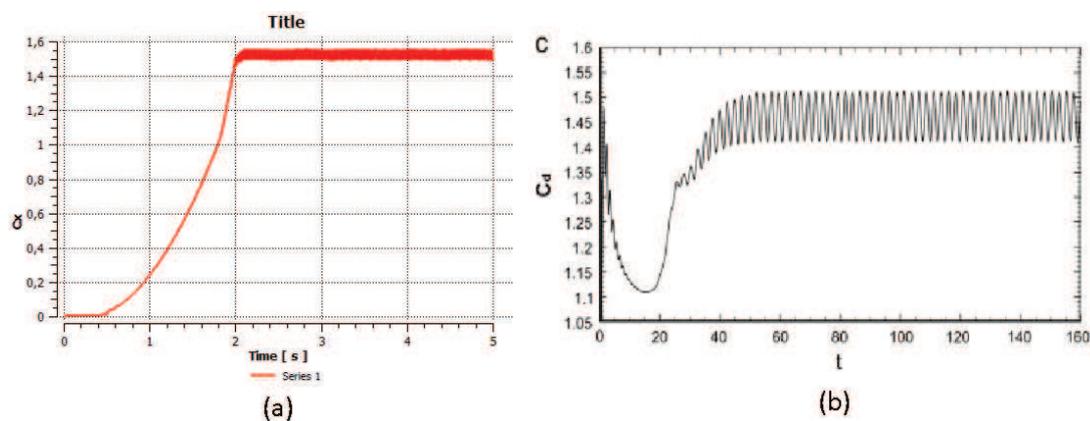


Figura 39: Comparação dos coeficientes de arrasto em função do tempo, em $Re=200$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

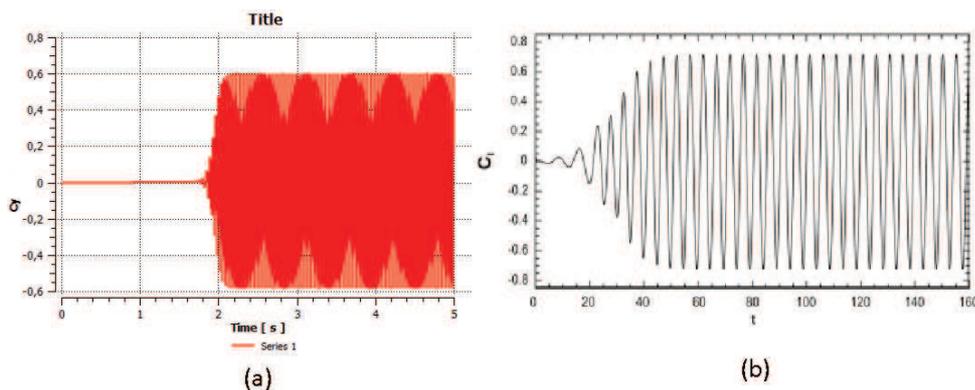


Figura 40: Comparação dos coeficientes de sustentação em função do tempo, em $Re=200$.

Fonte: Autoria Própria (a), Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012) (b)

5.4.3. Envoltória dos Coeficientes de Arrasto e Sustentação

Com os resultados obtidos, é possível resumi-los em tabelas que expressam a envoltória dos coeficientes de arrasto e sustentação em função do número de Reynolds e comparar os resultados obtidos (Tabela 6) com os expressos no artigo de referência (Tabela 7).

Tabela 6: Coeficientes de sustentação (C_l) e arrasto (C_d) obtidos nas análises.

Reynolds	C_l max	C_d med:
100	0,40	1,56
150	0,60	1,52
200	0,70	1,53

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7: Resultados obtidos no artigo de referência.

Reynolds	C_l max	C_d med:
100	0,38	1,47
150	0,56	1,45
200	0,72	1,46

Fonte: adaptado de Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012)

5.4.4. *Discussão dos Resultados*

As linhas de fluxo do artigo estudado se assemelham às linhas de velocidade da simulação de validação, as tabelas Tabela 6 e Tabela 7 indicam a proximidade dos valores numéricos dos coeficientes de arrasto e sustentação, e nota-se a semelhança no comportamento dos gráficos do artigo de Najafia, Arefmaneshb e Enjilelaa (2012). Também podem ser comparadas as linhas de corrente ilustradas na Figura 22, Figura 26 e Figura 30 com as linhas de velocidade obtidas com a Figura 27, Figura 28, Figura 31 e Figura 32. Nota-se que o tempo de início da vibração obtida foi menor que o apresentado na referência. No entanto, não há muitas informações na forma que a velocidade do fluxo foi imposta na referência

A obtenção de resultados que se assemelhassem ao artigo estudado não foi, de fato, imediata. Algumas tentativas foram estudadas para que se obtivesse um resultado satisfatório, como o maior refinamento da malha (foi estudada uma malha com 93.138 nós), discretização temporal maior (passos de tempo de 0,05 segundos) mas sem melhores resultados. O que fez com que a solução se aproximasse foi a melhor discretização temporal da solução. Mudando o passo de tempo de 0,01 para 0,001, ou seja, de 500 passos de tempo para 5000 o resultado foi muito mais preciso, os efeitos de oscilação foram captados com êxito para todas as três análises formando linhas de velocidade e pressão muito semelhantes aos que o artigo apresenta, conseqüentemente os valores numéricos de coeficientes de arrasto e sustentação também se aproximaram.

6. EXPERIMENTO: SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM UM PERFIL METÁLICO

6.1. GEOMETRIA

A geometria do domínio (Figura 41 e Figura 43) foi criada de forma a manter aproximadamente a proporção utilizada na análise da validação entre o tamanho do domínio e o corpo a ser estudado. Foi modelado o escoamento de vento em torno de um perfil com $a = 20$ mm, $r = 2$ mm e $h = 2$ mm (Figura 42).

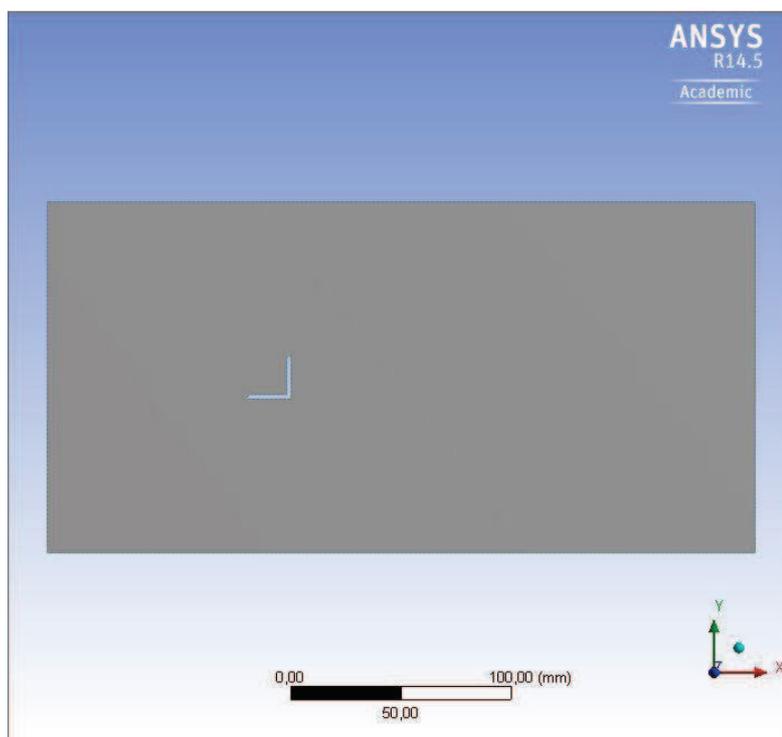


Figura 41: Dimensões do domínio da simulação.

Fonte: Autoria Própria

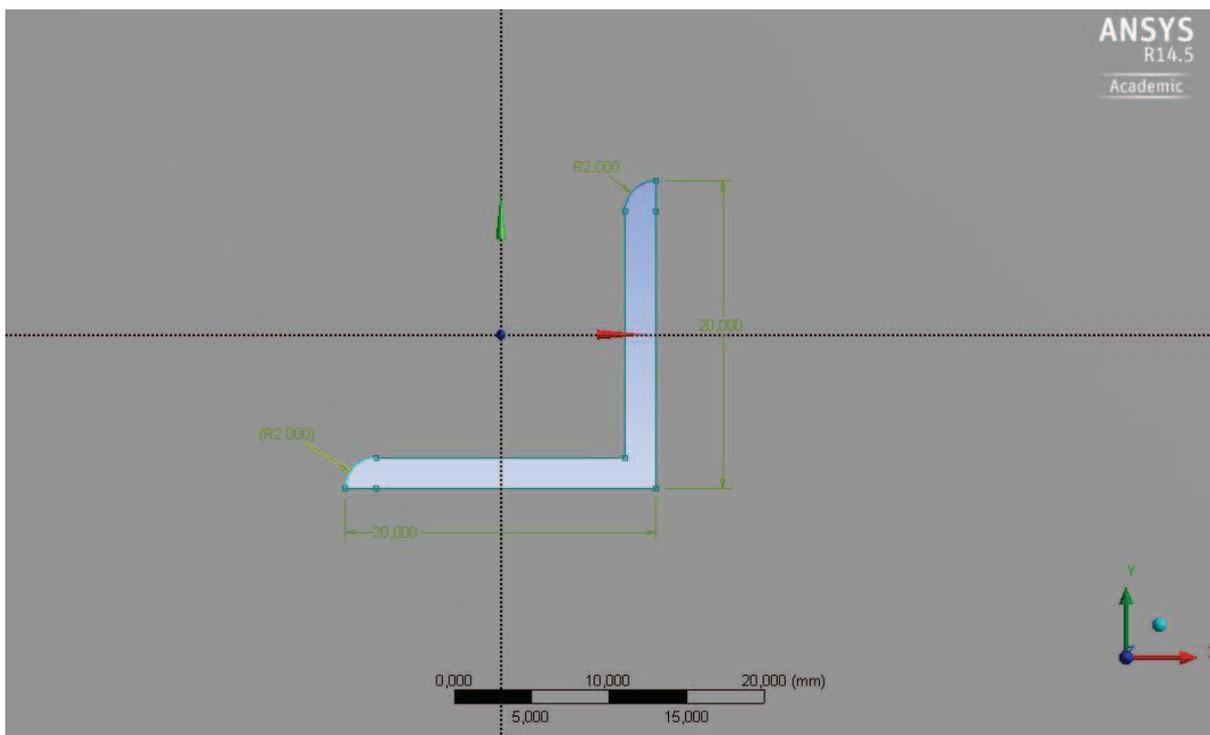


Figura 42: Dimensões do perfil estudado.

Fonte: Autoria Própria

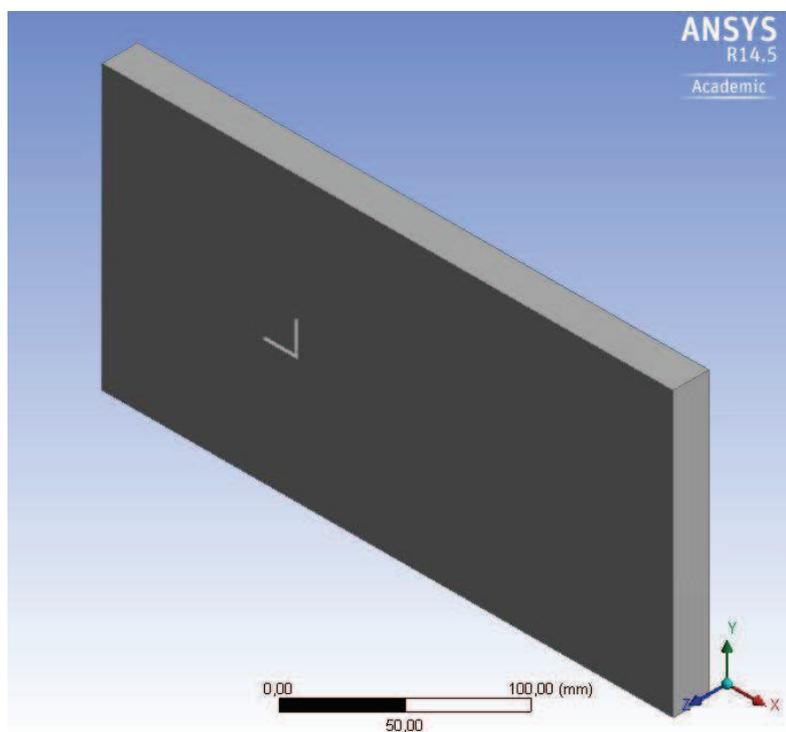


Figura 43: Domínio utilizado.

Fonte: Autoria Própria

6.2. MALHA

Com o domínio gerado, é possível gerar a malha que será utilizada na presente análise (Figura 44 e Figura 45), com um comprimento do elemento de $1,78E-2$ metros, na região de refinamento a sotavento (captação da turbulência) com $1,78E-4$ m e um ângulo normal de curvatura de 10° , somando ao total 28.184 nós e 20.763 elementos.

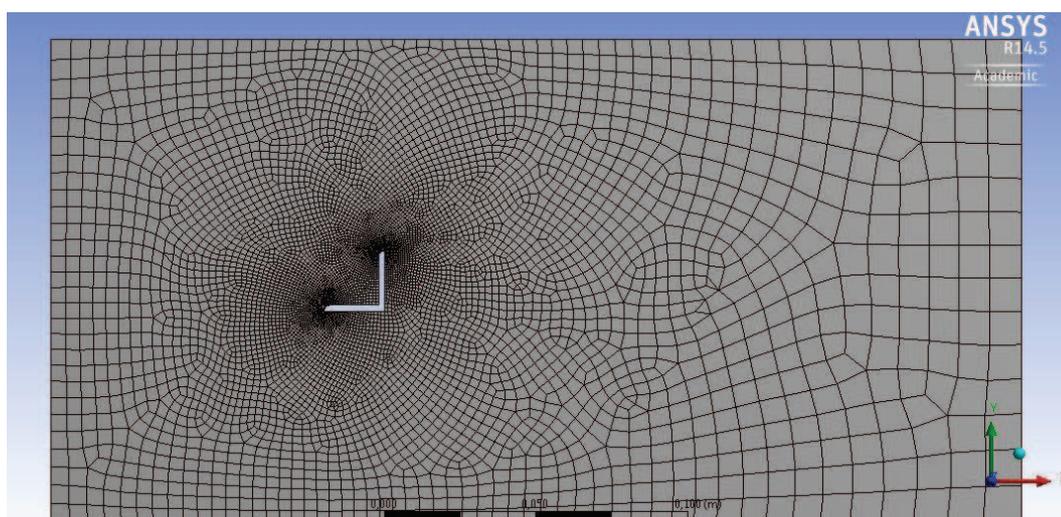


Figura 44: Malha utilizada.

Fonte: Autoria Própria

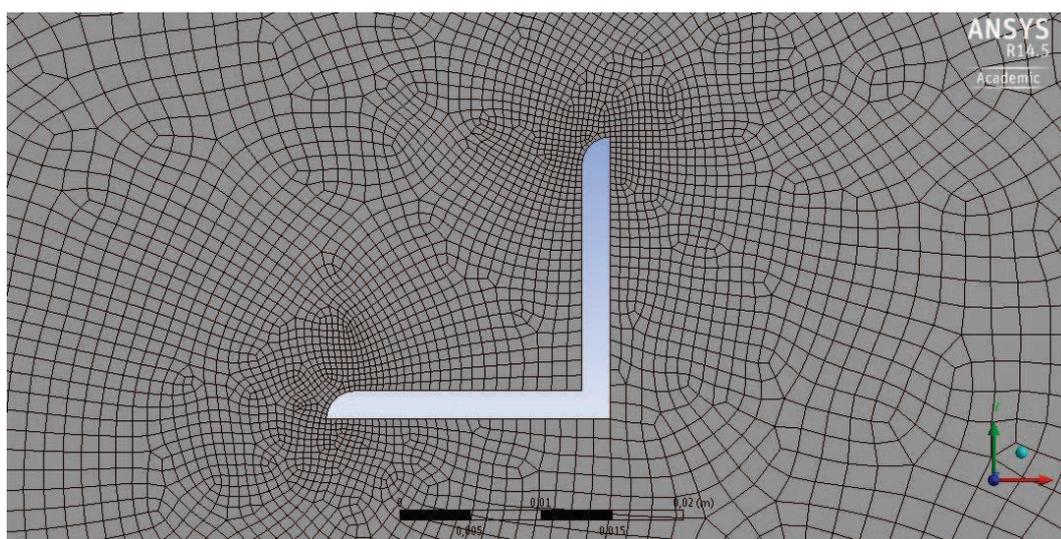


Figura 45: Ampliação da malha: refinamento próximo ao perfil.

Fonte: Autoria Própria

6.3. PRÉ-PROCESSAMENTO

6.3.1. Material Utilizado

Assim como na análise da validação, repetiu-se a densidade e a viscosidade, e o número de Reynolds varia em função da velocidade de passagem do fluido. A Tabela 8 indica as propriedades do fluido modelado para esta análise.

Tabela 8: propriedades do fluido do experimento.

MATERIAL	
Densidade = 1 [kg/m ³]	
Viscosidade Dinâmica = 0,02 [kg/(m.s)]	
No. Reynolds	Velocidade [m/s]
100	100
150	150
200	200

Fonte: Autoria própria

Pode-se fazer a equivalência das viscosidades aplicadas com a velocidade característica do escoamento, pois para a presente análise o parâmetro que varia é a viscosidade dinâmica. Aplicando-se um valor de viscosidade dinâmica do ar de $1,831 \times 10^{-5}$ kg/(m.s) e densidade do ar de $1,185$ kg/m³, obtém-se a correlação entre o número de Reynolds e a velocidade equivalente, exposto na Tabela 9:

Tabela 9: velocidades equivalentes para o escoamento do ar

No. Reynolds	Velocidade equivalente (m/s)
100	0,08
150	0,11
200	0,15

Fonte: Autoria própria

6.3.2. Tipo de Análise

A análise realizada segue os mesmos parâmetros indicados na Tabela 4: análise transiente, com 5 segundos de duração e passo de tempo com 0,001 segundo, totalizando 5000 passos de tempo.

6.3.3. Condições de Contorno e Inicialização

Foram repetidas as condições de contorno do experimento da validação, em que a Tabela 10 descreve as condições aplicadas e indicadas na Figura 46. Igualmente ao experimento da validação, foi desconsiderado os efeitos de transferência de calor, combustão e radiação térmica; a velocidade inicial é determinada pela mesma função de velocidade em função do tempo apresentada no capítulo 5 na entrada do domínio e não existe variação de pressão na saída.

Tabela 10: Condições de contorno do experimento.

Domínio	Condições de contorno	
Domínio Padrão	in	
	Tipo	ENTRADA
	Velocidade Normal	função(t)
	out	
	Tipo	ABERTURA
	Pressão Relativa	0.0000e+00 [Bar]
	perfil	
	Tipo	PAREDE
	Massa e Momento	Parede Fixa (No Slip Wall)
	Rugosidade	Parede Lisa

Fonte: Autoria própria

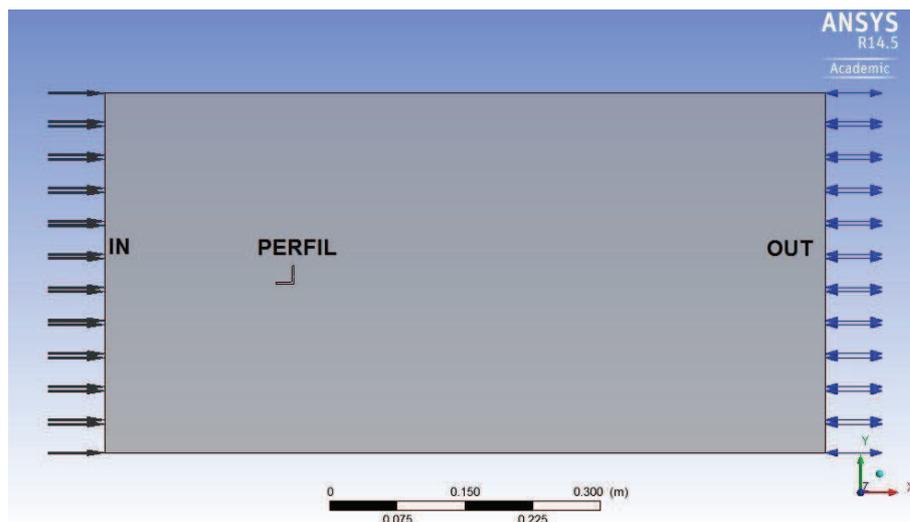


Figura 46: Condições de contorno do domínio.

Fonte: Autoria própria

6.4. RESULTADOS

6.4.1. Linhas de Pressão e Velocidade

A Figura 47, Figura 48 e Figura 49 ilustram as linhas de velocidade para números de Reynolds distintos, a Figura 50, Figura 51 e Figura 52 mostram as linhas de pressão do escoamento e a Figura 53 até a Figura 58 apresenta os gráficos de e coeficiente de arrasto (C_d) e coeficiente de sustentação (C_l) em função do tempo.

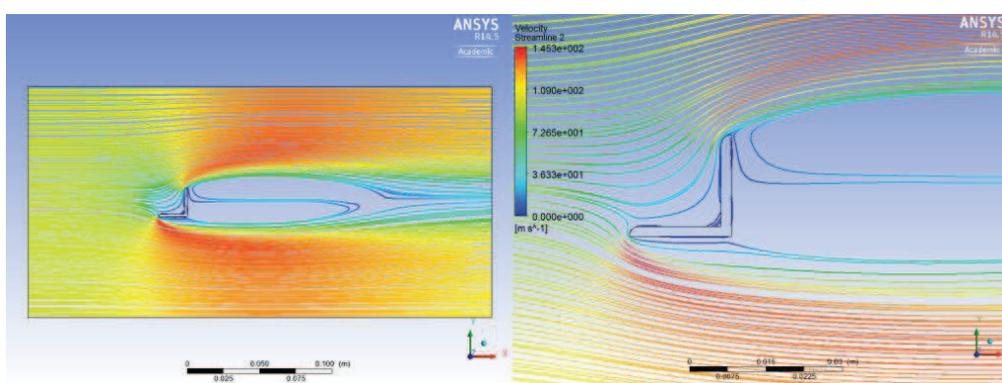


Figura 47: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 100$.

Fonte: Autoria Própria

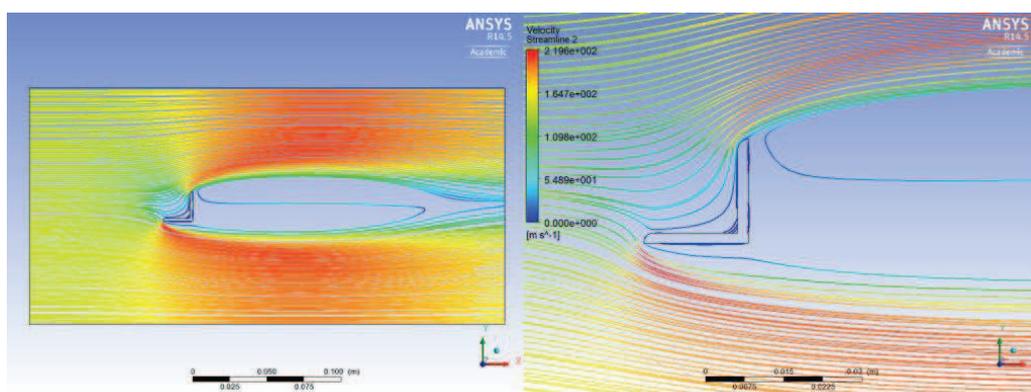


Figura 48: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 150$.

Fonte: Autoria Própria

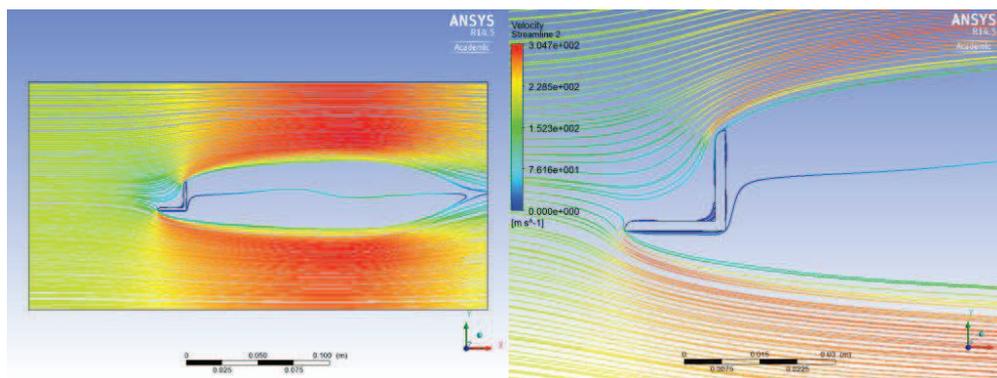


Figura 49: Linhas de velocidade em $t = 5$ s e $Re = 200$.

Fonte: Autoria Própria

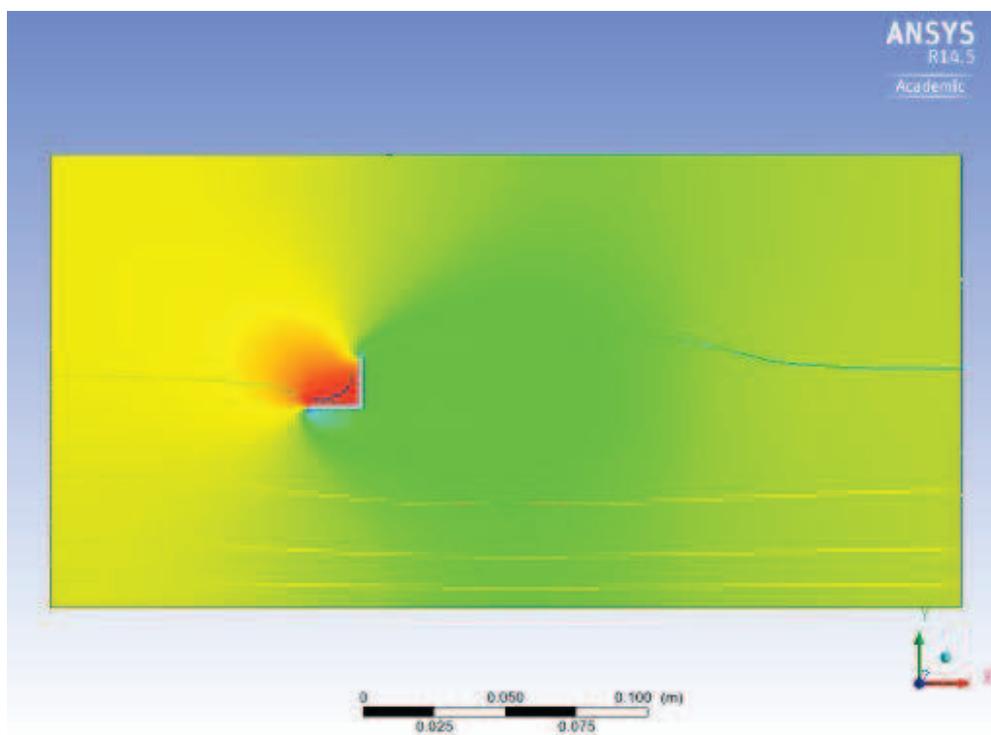


Figura 50: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 100$.

Fonte: Autoria Própria

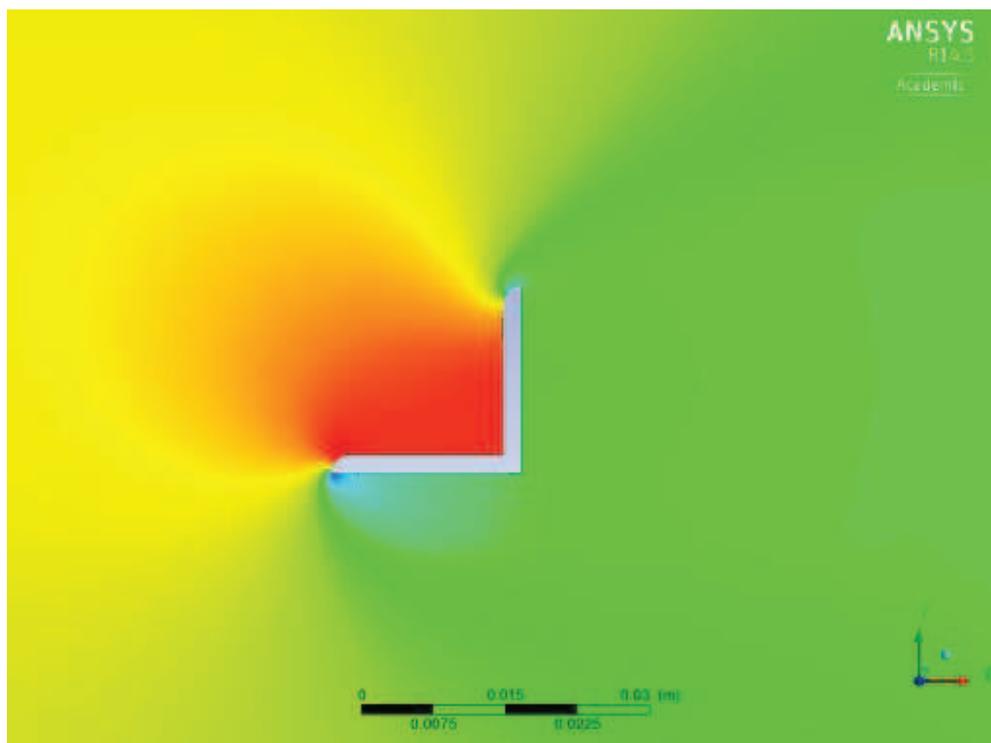


Figura 51: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 150$.

Fonte: Autoria Própria

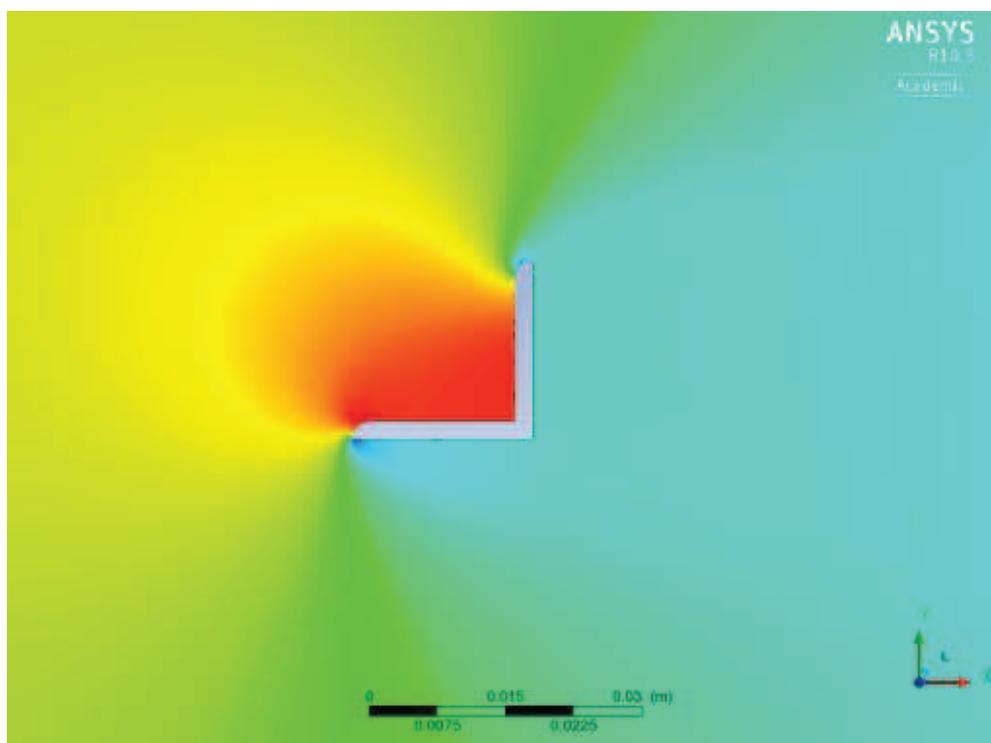


Figura 52: Linhas de pressão em $t = 5$ s e $Re = 200$.

Fonte: Autoria Própria

6.4.2. Coeficientes de Arrasto e Sustentação

A Figura 53 até a Figura 58 ilustra os coeficientes de arrasto e sustentação para números de Reynolds distintos.

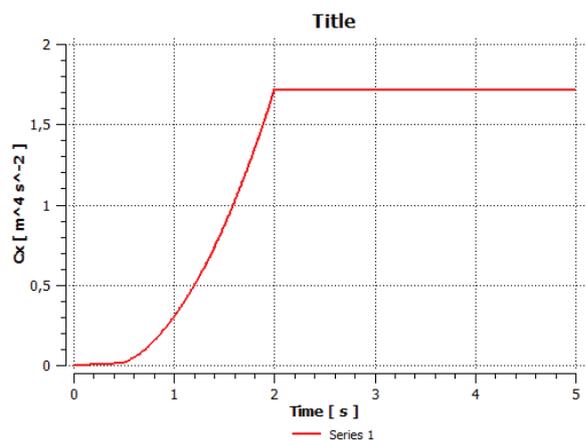


Figura 53: Coeficiente de arrasto em função do tempo em $Re = 100$.

Fonte: Autoria Própria

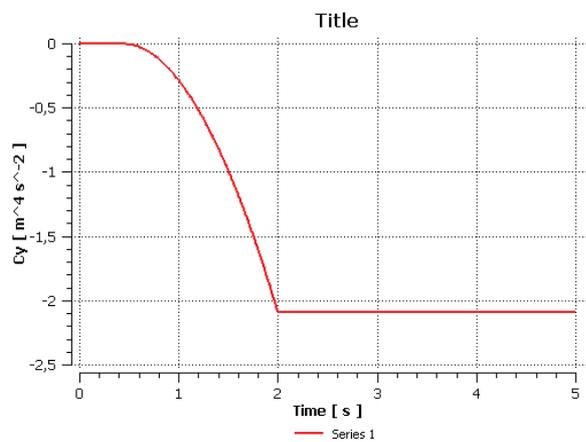


Figura 54: Coeficiente de sustentação em função do tempo em $Re = 100$.

Fonte: Autoria Própria

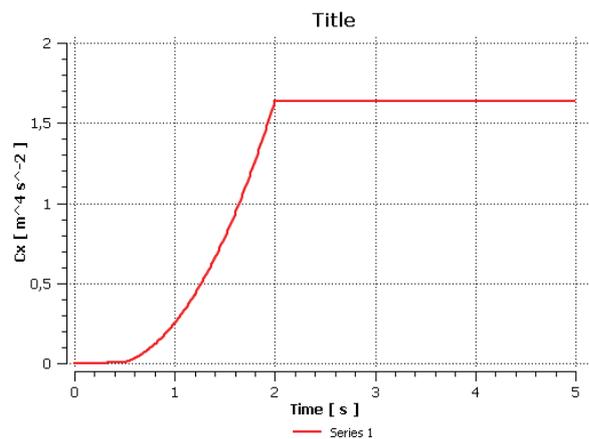


Figura 55: Coeficiente de arrasto em função do tempo em $Re = 150$.

Fonte: Autoria Própria

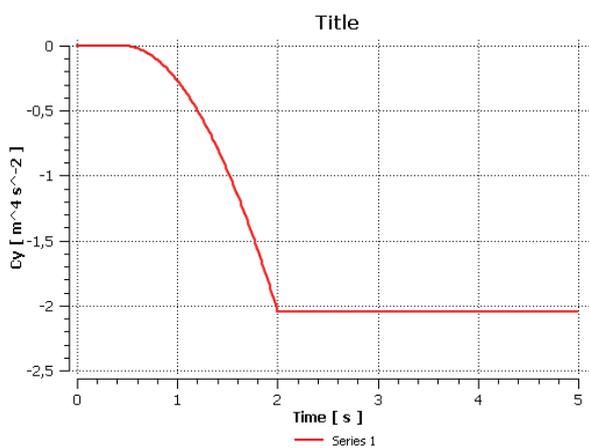


Figura 56: Coeficiente de sustentação em função do tempo em $Re = 150$.

Fonte: Autoria Própria

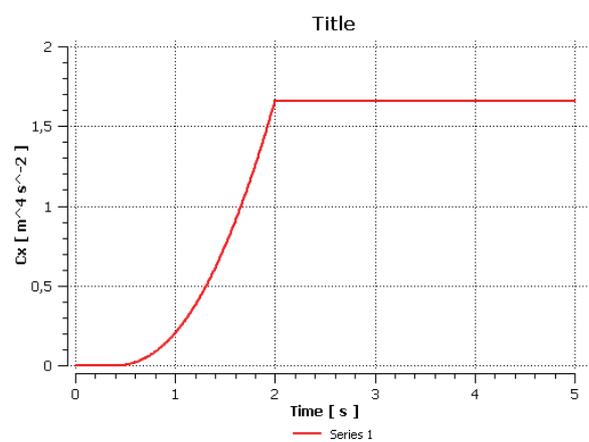


Figura 57: Coeficiente de arrasto em função do tempo em $Re = 200$.

Fonte: Autoria Própria

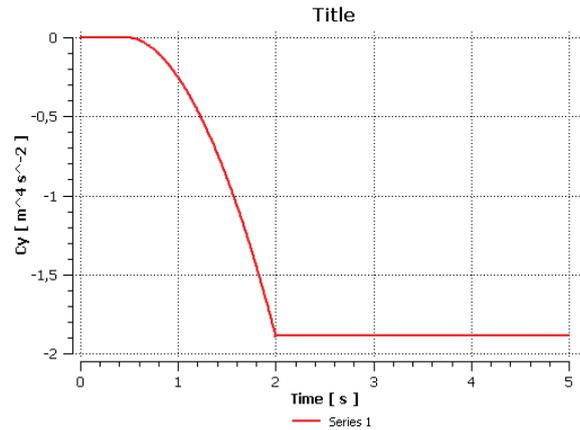


Figura 58: Coeficiente de sustentação em função do tempo em $Re = 200$.

Fonte: Autoria Própria

6.4.3. *Envoltória dos Coeficientes de Arrasto e Sustentação*

Reunindo-se os valores máximos, mínimos e médios dos coeficientes obtidos nos gráficos acima, monta-se um gráfico com a envoltória destes em função do número de Reynolds. Junto às envoltórias, está indicado o valor do coeficiente que a NBR 6123:1988 indica para o perfil estudado, em que os valores do coeficiente de sustentação e arrasto presentes na norma estão indicadas na Tabela 11, e a Tabela 12 indica os valores de coeficientes de arrasto e sustentação obtidos nas análises. A Figura 59 ilustra a envoltória dos coeficientes de arrasto e a Figura 60 ilustra a envoltória dos coeficientes de sustentação.

Tabela 11: Coeficientes C_x e C_y para barras prismáticas de faces planas de comprimento infinito

α	C_x	C_y
45°	2,1	1,8

Fonte: Adaptado de: ASSOCIAÇÃO... (1988).

Tabela 12: Coeficientes de arrasto e sustentação obtidos.

Reynolds	$C_{arrasto}$	$C_{sustentação}$
100	1.713	-2.090
150	1.637	-2.043
200	1.656	-1.889

Fonte: Autoria própria

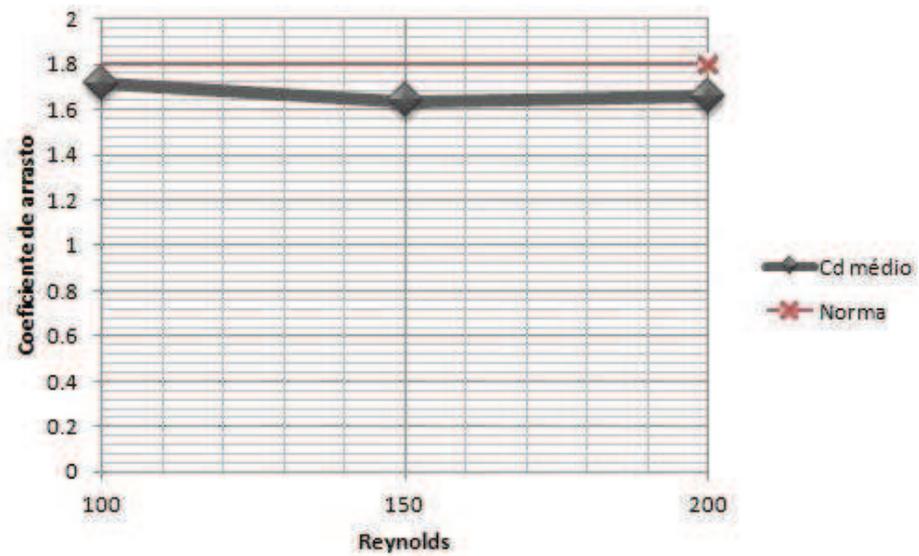


Figura 59: Envoltória dos coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds.

Fonte: Autoria Própria

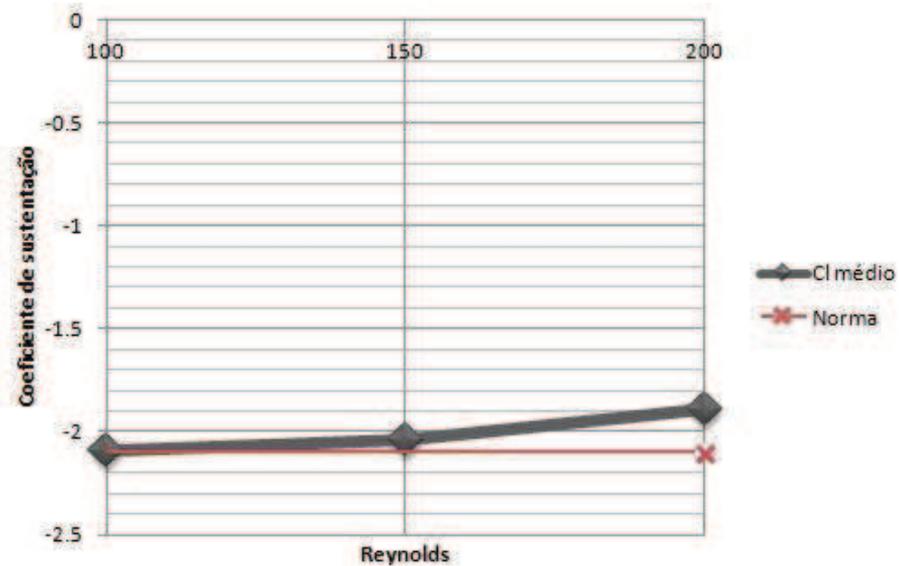


Figura 60: Envoltória dos coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds.

Fonte: Autoria Própria

6.4.4. Discussão dos Resultados

Os gráficos de coeficiente de arrasto e sustentação em função do tempo não apresentaram uma oscilação ao longo do tempo, ocorrência esperada em escoamentos com regime laminar, pode-se perceber que o comportamento da envoltória do coeficiente de arrasto e sustentação em função do número de Reynolds tende a diminuir à medida que o número de Reynolds aumenta.

Mesmo com a diminuição dos coeficientes de arrasto e sustentação com o aumento do número de Reynolds, os coeficientes apresentados no experimento obtiveram uma boa aproximação dos mesmos presentes na norma, embora com valores em módulo menores, o que conduz a valores menos favoráveis à segurança.

7. CONCLUSÃO

Através do artigo utilizado para validação, foi possível realizar a análise de escoamento em torno de um cilindro em um regime turbulento, obtendo resultados semelhantes e validando o presente estudo de escoamento em torno de um perfil metálico, obtendo resultados menos críticos do que os prescritos na norma NBR 6123/1988. Para todas as etapas da análise foi empregado o software AnSYS™ Workbench e ferramenta de análise de fluidodinâmica computacional CFX.

Algumas dificuldades ao longo do presente trabalho puderam ser observadas. O artigo utilizado na validação não fornecia todos os parâmetros necessários ao cálculo do número de Reynolds, uma vez que apenas eram informados as condições de contorno como velocidade na entrada do domínio, variação de pressão na saída nula e números de Reynolds 100, 150 e 200. Ao aplicar-se as variáveis no domínio que resultam nesses números, o fluxo tornava-se laminar, fazendo-se necessário investigar para quais valores numéricos das variáveis o fluxo se assemelhava ao apresentado no artigo. Este foi solucionado através da atribuição de nenhum modelo de turbulência no pré-processamento e o aumento do número de passos de tempo. Também relativo ao número de Reynolds, o comprimento de referência que o software adotava era diferente do esperado, no caso o diâmetro do cilindro e a dimensão lateral do perfil, e não existe a opção de alterar este comprimento na fase de pré-processamento da estrutura.

Como sugestão de continuidade do presente trabalho, sugere-se a análise do experimento com outros ângulos que a NBR 6123/1988 trata e sua comparação com os valores tabelados, a análise com outras seções de perfis e a análise fluido-estrutura, visando obter os deslocamentos do perfil com o escoamento do fluido.

REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S. Effect of wind on structure. **Structural Engineering Forum of India**, Ranchi, 08 out. 2010.

ANSYS. **ANSYS CFX: Fast, Reliable, Robust, Accurate Numeric**. Boletim Técnico ANSYS Inc. Canonsburg. 2005.

ANSYS™. **ANSYS User's Manual: Theory**. [S.I.]: Swanson Analysis Systems Inc., v. IV, 1994.

ARGENTA, M. A. **Análise de torres de transmissão submetidas a cargas dinâmicas**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 - Forças Devidas Ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

BARDINA, J. E.; HUANG, P. G.; COAKLEY, T. J. **Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development**. Moffett Field: Ames Research Center, NASA Technical Memorandum, 1997.

BATHE, K. J.; ZHANG, H. Finite element developments for general fluid flows with structural interactions. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, p. 213-232, 2004.

BAZILEVS, Y. et al. A fully-coupled fluid-structure interaction simulation of cerebral aneurysms. **Comput Mech**, p. 3-16, 2010.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2002.

BRAUN, A. L. **Simulação numérica na engenharia do vento incluindo efeitos de interação fluido-estrutura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civi) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2007.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

CARRIL, C. F. J. **Análise Numérica e Experimental do Efeito Dinâmico do Vento em Torres Metálicas Treliçadas Para Telecomunicações**. 143 p. Tese (doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

CHÁVEZ, E. S. **Análise Estrutural de Edifício Alto Submetido às Pressões Flutuantes Induzidas Pela Ação do Vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.

CIRAK, F.; RADOVITZKY, R. A Lagrangian-Eulerian shell-fluid coupling algorithm based on level sets. **Computers & Structures**, p. 491-498, 2005.

DUTRA, D. L. Estudo De Problemas De Interação Fluido-Estrutura Em Domínios Limitados Utilizando O Método Dos Elementos Finitos. **Congresso Interno de Iniciação Científica - UNICAMP**, 2006. Disponível em: <<http://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xivcongresso/cdrom/pdfN/350.pdf>>. Acesso em: 26 junho 2012.

FORTUNA, A. D. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos - conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

FRANCO, A. T. **Aplicação do método dos volumes finitos para cavidade recirculante com transferência de calor**. 135p. Trabalho (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 1993.

HATASHITA, L. S. **Análise de Confiabilidade de Torres de Transmissão de Energia Elétrica Quando Sujeitas a Ventos Fortes Via Método Analítico Form**. 93 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 2007.

HEUERT, J.; KHATCHATOURIAN, O. Interação entre Jatos Transversais e Fluxo Principal: Simulação e Análise Comparativa de Modelos de Turbulência. **Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional**, Florianópolis, 3 a 6 setembro 2007.

KHURRAM, R.; MASUD, A. A multiscale/stabilized formulation of the incompressible Navier–Stokes equations for moving boundary flows and fluid–structure interaction. **Computational Mechanics**, p. 403–416, 2006.

LIU. **Wind Engineering: A Handbook for structural Engineers**. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

LOPES, A. V. **A Ação do Vento sobre Estruturas de Engenharia Civil**, 2011. Disponível em: <<http://www.engenhariacivil.com/accao-vento-estruturas-engenharia-civil>>. Acesso em: 29 junho 2012.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos de coordenadas generalizadas**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1995.

MARCELINO, I. P. V. D. O. **Análise de Episódios de Tornado em Santa Catarina: Caracterização Sinótica e Mineração de Dados**. 223 p. Dissertação (mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2004.

MASUD, A.; BHANABHAGVANWALA, M.; KHURRAM, R. A. An adaptive mesh rezoning scheme for moving boundary flows and fluid–structure interaction. **Journal of Computers and Fluids**, p. 77–91, 2007.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, v. 2, 1997.

NAJAFIA, M.; AREFMANESHB, A.; ENJILELAA, V. Meshless local Petrov–Galerkin method-higher Reynolds numbers fluid flow applications. **Engineering Analysis with Boundary Elements - Elsevier Journals**, Oxford, 2012. 1671–1685.

NBR 6123. **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

OLIVEIRA, M. I. R. **Análise Estrutural de Torres de Transmissão de Energia Submetidas aos Efeitos Dinâmicos Induzidos Pelo Vento**. 130 fl: il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

PECIN, T. G. **Avaliação das Ações Mecânicas de Tornados sobre Estruturas Aperticadas Flexíveis**. 179 fl: il. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos fluidos**. 3°. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2004. 688 p.

QUEIROZ, N. F. D. **Simulação com CFD de escoamento de fluxo ao redor de um edifício de 10 andares**. Laboratório de Conforto Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2008.

RODRIGUES, C. **Escoamento Laminar X Turbulento**. Faculdade de Ciência e Tecnologia de Montes Claros. Montes Claros. 2009. Notas de aula da disciplina Fenômenos de Transporte I.

SANCHES, R. A. K. Fluid-structure interaction using an arbitrary lagrangian-eulerian fluid solver coupled to a positional lagrangian shell solver. **Mecânica Computacional**, Santa Fe, v. XXIX, p. 1627-1647, novembro 2010.

SANCHES, R. A. K. **Sobre o acoplamento fluido-casca utilizando o método dos elementos finitos**. Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.

SAVORY, E. et al. **Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower**. Department of Civil Engineering, University of Surrey. Guildford. 2000.

SCHIOZER, D. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1996.

SELVAM, P.; GOVINDASWAMY, S. **Aeroelastic analysis of bridge girder section using computer modeling**. University of Arkansas. Fayetteville. 2001.

SILVA, L. F. Começando a entender o método dos volumes finitos. **Notas em CFD**, 2008. Disponível em: <<http://www.notasemcfd.com/2008/01/comeando-entender-o-mtodo-dos-volumes.html>>. Acesso em: 25 fevereiro 2013.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on Structures**. 3. ed. New York: Wiley Interscience, 1996.

SOUSA, I. C. **Simulação do escoamento de ar no do auditório da FEUP**. 58p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2011.

SOUZA, R. G. S. **Escoamento Bifásico Líquido-Gás: Previsão de Gradientes de Pressão com a Correlação de Lockhart & Martinelli e Fluidodinâmica Computacional**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 74. 2009.

TEIXEIRA, P. R. D. F. **Simulação Numérica da Interação de Escoamentos Tridimensionais de Fluidos Compressíveis e Incompressíveis e Estruturas Deformáveis Usando o Método dos Elementos Finitos**. 237p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

TEIXEIRA, P. R. F. E.; AWRUCH, A. M. Numerical Simulation of fluid-structure interaction using the finite element method. **Computers and Fluids**, p. 249-273, 2005.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 2002.