



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAUL CÉSAR DE ANDRADE SOARES

APLICAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL NA ANÁLISE AERODINÂMICA DE
EDIFICAÇÕES

CARUARU, Julho / 2015

RAUL CÉSAR DE ANDRADE SOARES

APLICAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL NA ANÁLISE AERODINÂMICA DE
EDIFICAÇÕES

Proposta de trabalho a ser apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco -
UFPE, como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Bono

CARUARU, Julho / 2015

Catálogo na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

S676a Soares, Raul César de Andrade.
Aplicação da dinâmica dos fluidos computacional na análise aerodinâmica de
edificações. / Raul César de Andrade Soares. - Caruaru: O Autor, 2015.
74f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Gustavo Bono.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de
Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2015.
Inclui referências bibliográficas

1. Fluidos. 2. Velocidade. 3. Edificações. 4. Pressão do vento. 5. Engenharia de
estruturas. I. Bono, Gustavo. (Orientador). II. Título

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2015-132)

RAUL CÉSAR DE ANDRADE SOARES

APLICAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL NA ANÁLISE AERODINÂMICA DE
EDIFICAÇÕES

Proposta de trabalho a ser apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Bono

Aprovado em: Caruaru, 10 de Julho de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gustavo Bono _____
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Alessandro Romário E. Antunes _____
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Avaliador)

Profª. Drª. Giuliana Furtado Franda Bono _____
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Avaliador)

Profª. Drª. Sylvana Melo dos Santos _____
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Coordenadora da disciplina)

Dedico este trabalho à Deus, Senhor dos Exércitos e Criador de Israel. Que por Sua misericórdia mudou minha vida e me tornou um homem melhor. Dedico também para aqueles que acreditam que todo ser humano é um indivíduo e não um coletivo, que possuem desejos, planos e anseios individuais e não coletivos, que devem ser tratados e respeitados como indivíduos e não como coletivos, dedico àqueles que respeitam as minorias, e a menor minoria de todas é o indivíduo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Gilberto Acioli Soares e Anilda Pereira de Andrade Soares pelo apoio, amor e compreensão que sempre me deram sem negar e medir, por me fazer acreditar na capacidade individual que o homem tem de mudar sua vida, fazer suas escolhas, arriscar e crer em si mesmo. Por me guiarem pelos caminhos certos, e me provarem que a fé em Deus não impede a busca pelo conhecimento científico.

À minha noiva Talita dos Santos Demétrio, por me apoiar em minhas decisões e compreender minhas faltas nos momentos em que o curso me levou à ausência.

Aos meus colegas de curso, que junto comigo batalharam diariamente para vencer as dificuldades inerentes a um curso de Engenharia, aos quais também compartilho a minha alegria em vê-los completar mais um ciclo em suas vidas.

Ao professor Gustavo Bono pela oportunidade concedida de aprender além do que a própria Universidade nos ensina, pela paciência, pelo exemplo de pesquisador e professor, pelo tempo dedicado e pelos valiosos conhecimentos repassados.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou
o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o
que era antes.”*

Marthin Luther King

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo modelar e simular através da Dinâmica de Fluidos Computacional modelos tridimensionais de geometrias típicas de edificações, analisando-se a topologia do escoamento e a variação dos principais coeficientes aerodinâmicos. Através da simulação numérica foi possível captar os principais fenômenos que ocorrem no escoamento, como formação de vórtices, variações de velocidade, gradientes de pressão, etc. Observou-se como os principais fenômenos variam em função do número de Reynolds e da geometria das edificações. Por fim, compararam-se como os modelos de turbulência de Smagorinsky clássico e dinâmico influenciam nas principais variáveis do problema.

Palavras Chave: Fluidos, Smagorinsky, velocidade, pressão, arrasto.

ABSTRACT

This work aims to model and simulate through Computational Fluid Dynamics three-dimensional models of typical geometries of buildings, analyzing the topology of the flow and the variation of the main aerodynamic coefficients. Through numerical simulation was possible to capture the main phenomena occurring in the flow, such as formation of vortices, speed variations, pressure gradients, etc. It was noted as the main phenomena vary depending on the Reynolds number and geometry of buildings. Finally, turbulent flows are simulated and compared employing Large Eddy Simulation with the classical and dynamic Smagorinsky subgrid-scale models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Erosão causada pela formação de vórtices de base em um modelo de plataforma de petróleo.....	17
Figura 2 - Erosão na base de um poste na neve causada pela formação de vórtices de base.....	17
Figura 3 - Telhado da quadra danificado pela ação do vento.	18
Figura 4 - Tensões atuantes no corpo imerso.....	20
Figura 5 - Pressão atuante no corpo imerso.	21
Figura 6 - Variações de Pressão em um corpo tridimensional.....	21
Figura 7 - Linhas de corrente segundo variação de turbulência.....	23
Figura 8 - Formação de vórtices em um corpo imerso.....	24
Figura 9 - Formação e desprendimento de vórtices em um cilindro circular bidimensional.....	25
Figura 10- Desenho esquemático dos principais fenômenos.	34
Figura 11 - Malha de elementos hexaédricos empregados na simulação.	34
Figura 12 - Domínio Computacional utilizado.	35
Figura 13 - Distribuição de pressões médias e linhas de corrente para $Re=100$ com Smag. Clássico e $Re=1000$ com Smag. Clássico e Dinâmico.	36
Figura 14 - Formação do vórtice de base para o caso de $Re=100$	36
Figura 15 - Ponto de estagnação para o caso de $Re=100$	37
Figura 16 - Distribuição da velocidade média (V_x) para $Re=100$ com Smag. Clássico e $Re=1000$, com Smag. Clássico e Dinâmico, para um corte em $z=1.5D$	38
Figura 17 - Localização do ponto - $x=0.75$, $y=0$ e $z=1.5$	39
Figura 18 - Velocidades médias para o ponto em $x=0.75$, $y=0$ e $z=1.5$	39
Figura 19 - Coeficientes de arrasto para o Cilindro Circular	40
Figura 20 - Disposições geométricas dos dois casos simuladas.	41
Figura 21 - Malha hexaédrica utilizada na simulação dos prédios 2H e H.....	41
Figura 22 - Domínio computacional utilizado na situação 2H e H.....	42
Figura 23 - Distribuição das velocidades médias (V_x) para $Re = 100$ e 1000 ($z = 0.75H$).	43
Figura 24 - Distribuição das pressões médias e linhas de corrente para $Re = 100$ e 1000	43

Figura 25 - Ponto de estagnação para $Re = 100$ e 1000 para o prédio com altura $2H$	44
Figura 26 - Vórtices de base para o caso de $Re = 1000$ no plano $y = 4,25$	45
Figura 27 - Distribuição das velocidades médias (V_x) e linhas de corrente ($z = 0.8H$) para $Re = 100$ e 1000	46
Figura 28 - Linhas de corrente para os casos de $Re = 100$ e 1000	46
Figura 29 - Formação de vórtices no topo da edificação de maior altura para $Re=100$ e $Re=1000$	47
Figura 30 - Distribuição das pressões médias para $Re = 100$ e 1000	48
Figura 31 - Distribuições de pressões obtidas por Braun (2007).	49
Figura 32 - Variação dos coeficientes de sustentação para o caso $2H/H$	49
Figura 33 - Região de recirculação na parte frontal da geometria menor.	50
Figura 34 - Variação dos coeficientes de arrasto para o caso $2H/H$	50
Figura 35 - Distribuição das velocidades médias para $Re=790000$	51
Figura 36 - Distribuição das velocidades médias para $Re=790000$	52
Figura 37 - Coeficientes de Arrasto para os dois prédios para $Re=790000$	52
Figura 38 - Coeficientes de Sustentação para os dois prédios para $Re=790000$	52
Figura 39 - Malha hexaédrica utilizada na simulação dos prédios H e H	54
Figura 40 - Distribuição das pressões médias e linhas de corrente para $Re = 100$ e 1000	54
Figura 41 - Distribuição das velocidades médias (V_x) para $Re = 100$ e 1000 no plano $z=0.5H$	54
Figura 42 - Ponto de estagnação para $Re = 100$ e 1000 para o caso H/H	55
Figura 43 - Formação do vórtice de base em análise experimental.	56
Figura 44 - Vórtices de base no plano $y = 4,25$ para $Re=1000$	56
Figura 45 - Distribuição das pressões médias para $Re = 100$ e 1000	57
Figura 46 - Coeficientes de arrasto para prédios de mesma altura - $Re= 100$ e 1000	58
Figura 47 - Coeficientes de Sustentação.	59
Figura 48 - Distribuição das pressões médias e linhas de corrente para $Re=790000$ com modelo de Smagorinsky clássico e dinâmico.....	60
Figura 49 - Distribuição de pressões médias ($z=0.5H$) para $Re=790.000$ com modelo de Smagorinsky clássico e dinâmico.	60
Figura 50 – Coeficientes de arrasto para os modelos de Smag. Clássico e Dinâmico....	61
Figura 51 - Distribuição da componente velocidade média (V_x) junto com as linhas de corrente para os modelos de Smag. Clássico e Dinâmico ($Re=790.000$).	62

Figura 52 - Distribuição da componente velocidade média (V_x) junto com as linhas de corrente para os casos de prédio de mesma altura ($Re=100$ e 1000).	62
Figura 53 - Distribuição de velocidades médias obtidas por Blocken (2007).	63
Figura 54 - Coeficientes de Arrasto para o Caso 2H.	63
Figura 55 - Coeficientes de Sustentação para o Caso 2 (H/H).....	63
Figura 56 - Domínio e Condições de contorno utilizados na simulação.....	64
Figura 57 - Malha Hexaédrica utilizada na Simulação.	65
Figura 58 - Distribuição de pressões médias com linhas de corrente.	66
Figura 59 – Distribuição das velocidades médias e linhas de corrente em corte $y=0$	66
Figura 60 - Distribuição das velocidades médias e linhas de corrente para um corte em $z=1$	67
Figura 61 - Comparação entre o modelo de turbulência do presente trabalho e outros modelos de turbulência.	67
Figura 62 - Distância X_f	68
Figura 63 - Comparativo entre as Magnitudes de velocidades médias.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de arrastos médios obtidos no presente trabalho e por outros autores.	40
Tabela 2 - Coeficientes de Arrasto do presente trabalho e obtidas por Braun (2007).	53
Tabela 3 - Coeficientes de Arrasto para o Caso 1 (1H/2H)	53
Tabela 4 - Coeficientes de arrasto para o prédio menor (H) nos casos 2H/H e H/H.	58
Tabela 5 - Coeficientes de sustentação para o prédio menor (H) nos casos 2H/H e H/H.	59
Tabela 6 - Coeficientes médios para o Caso 2 (H/H).....	64
Tabela 7 - Comparativo entre distancias X_f	68

Sumário

1. Introdução.....	15
1.1 Relevância do Tema.....	15
1.2 Casos danosos de Ação do vento em estruturas.....	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivos Gerais.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Referencial Teórico	19
2.1 Dinâmica dos Fluidos	19
2.2 Conceitos Fundamentais	20
2.2.1 Tipos de Escoamento	21
2.2.2. Número de Reynolds.....	23
2.2.3 Formação e desprendimento de Vórtices.....	24
2.3 Aspectos Gerais da Engenharia do Vento Computacional.....	25
2.4 Engenharia do Vento Computacional: Contexto Histórico	27
3. Metodologia.....	28
3.1 Equações governantes	29
3.2 Simulação de Grandes Escalas (LES).....	30
3.2.1 Modelo Sub-malha de Smagorinsky.....	31
3.2.2 Modelo Sub-malha de Smagorinsky Dinâmico.....	31
3.3 Formulação Numérica	32
4. Resultados e Discussão.....	33
4.1 Análise de um Cilindro circular Finito com relação de $AR = 3$	33
4.2 Prédios Paralelos para Reynolds 100 e 1000.....	40
4.2.1 Prédios paralelos com alturas diferentes ($2H$ e H) para $Re=100$ e 1000	41
4.2.2 Prédios Paralelos com alturas diferentes para $Re=790000$	51
4.2.3 Prédios paralelos com mesma altura (H e H).	53
4.3 Prédios Paralelos para Reynolds 790.000 com diferentes modelos de turbulência.....	59
4.4 Prédio com proporções 1:1:2.....	64
5 Conclusões.....	70
Referências	71

1. Introdução

Os fenômenos da natureza, ao longo do tempo, por sua magnitude e constância tem obrigado a humanidade a adequar seus comportamentos e realizações ao contexto climático e temporal em que vivem. De forma que com o avanço do intelecto humano muitas ciências relacionadas aos acontecimentos naturais foram se formando, como a meteorologia, geologia, hidrologia, etc. Uma dessas ciências que está diretamente relacionada com a dinâmica de fluidos, a Engenharia do Vento se preocupa em estudar e caracterizar a aerodinâmica de obras da construção civil.

O crescimento acelerado da construção civil e a diminuição dos espaços urbanos levaram à verticalização das construções para atender as demandas populacionais, necessidades econômicas e técnica. Associado a isso os planos diretores e códigos de obra de cada cidade exigem que existam áreas não construídas, fazendo com que as áreas possíveis para novas construções tornem-se menores ainda, levando aos engenheiros a projetar edifícios cada vez mais esbeltos.

Antigamente, os métodos construtivos e as peças estruturais da construção civil levavam a edifícios não muito altos e com peças estruturais (vigas, pilares e paredes principalmente) de grandes dimensões, de forma que as ações do vento junto com análises de segunda ordem podiam ser de certa forma desconsideradas ou analisadas de forma simplificada. Porém, com os avanços da tecnologia do concreto e do aço, as peças estruturais começaram a ficar cada vez mais finas e esbeltas, e os edifícios cada vez mais altos. Assim, as cargas de vento passaram a ter uma maior significância nas análises estruturais, sendo muito importante nos cálculos das cargas para o dimensionamento das estruturas de contraventamentos.

Assim, do ponto vista da Engenharia Civil, é importante conhecer a dinâmica de fluidos de forma geral, e de forma mais específica a Engenharia do Vento aplicada à aerodinâmica de edificações.

1.1 Relevância do Tema

Foi perceptível nos últimos anos um crescimento constante na indústria da construção civil, levando a um aumento considerável no número de habitações e edifícios residências e indústrias nas cidades. Tal crescimento por vezes de forma desenfreada pode gerar problemas no que tange à Engenharia do Vento, tais como regiões de baixa e alta velocidade de vento, regiões de recirculação, entre outros fenômenos. Conhecer e prever tais fenômenos é

fundamental para evitar problemas relacionados à ventilação natural, desconforto dos pedestres e dos próprios habitantes do edifício.

Aliado a isso, o aumento do número de edificações de elevado porte e muito próximas uma das outras, torna a mecânica do escoamento muito complexa, fazendo com seja necessária uma análise mais precisa, que considere a máxima quantidade de detalhes geométricos possíveis para aquela situação.

Tradicionalmente, a análise da ação do vento sobre obras da construção civil vem sendo executada em túneis de vento, onde são empregadas técnicas experimentais desenvolvidas especialmente com o intuito de reproduzir escoamentos de ventos naturais e representar o comportamento estático ou dinâmico das estruturas sob a ação de forças aerodinâmicas ou aeroelásticas. Ainda assim, a realização de tais análises experimentais são, em geral, pouco acessíveis e de custo elevado.

Porém, com o aumento da eficiência, acessibilidade e capacidade de processamento dos computadores, tornou-se mais viável as análises numéricas de vários problemas relacionados à Engenharia, em especial para o presente trabalho a solução de problemas relacionados à dinâmica de fluidos. A partir disso, surge uma nova metodologia para a solução de tais problemas, a Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC). A DFC permite através dos métodos numéricos resolver as equações que governam o escoamento dos fluidos, nos servindo com resultados como a distribuição de velocidades, campos de pressão, e outras variáveis em todo o domínio utilizado para a análise.

As análises realizadas nos últimos anos com os modelos numéricos tem se mostrado eficiente, e em muitos casos apresentando algumas vantagens em relação às análises experimentais em túneis de vento, como a obtenção de coeficientes aerodinâmicos com uma maior flexibilidade de repetição dos testes, podendo-se variar facilmente a geometria ou os parâmetros do escoamento.

A rapidez na criação dos modelos computacionais e a possibilidade de realizar estudos de diversos modelos fazem das simulações computacionais instrumento ainda mais interessante. A rápida visualização dos resultados permite que novas alterações sejam realizadas em curto prazo de tempo. Tudo isso torna a simulação numérica uma opção mais econômica e com tempo de execução menor se comparada com as simulações e estudos realizados em túneis de vento.

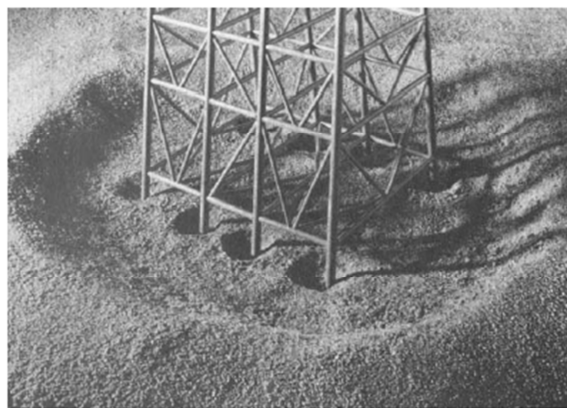
Não somente na área de Engenharia do Vento, mas de modo geral, a necessidade de se estudar métodos computacionais nos cursos de Engenharia Civil torna-se fundamental devido

às demandas do mercado, às necessidades de otimização e às obras cada vez mais complexas, em especial no emergente crescimento da construção civil no Brasil, exigem que os engenheiros estejam familiarizados com tais metodologias.

1.2 Casos danosos de Ação do vento em estruturas

Como já foi dito, o vento deve ser considerado como uma parcela de carga no cálculo das estruturas, além disso, não só seus carregamentos, mas também os efeitos aerodinâmicos também geram interferências na segurança e estabilidade das estruturas, nas Figuras 1 e 2, podem-se observar a erosão causada pela formação de vórtices de base nas fundações de algumas estruturas.

Figura 1 - Erosão causada pela formação de vórtices de base em um modelo de plataforma de petróleo.



FONTE: WITEHOUSE, 1998

Figura 2 - Erosão na base de um poste na neve causada pela formação de vórtices de base.



FONTE: SILVA, 2006.

Na Figura 3, observa-se o descolamento de parte do telhado de uma quadra do Colégio José Florêncio Neto, localizado no Bairro São Francisco em Caruaru. As altas velocidades do vento e grandes gradientes de pressões são as principais causas que ocasionam esse tipo de problema.

Figura 3 - Telhado da quadra danificado pela ação do vento.



FONTE: PINHEIRO, 2014

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo modelar e simular através da Dinâmica de Fluidos Computacional a aerodinâmica de modelos típicos de edificações residenciais a fim de analisar a aerodinâmica das edificações frente a diferentes disposições geométricas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obter numericamente as distribuições de velocidade e pressão no domínio do problema analisado;
- Analisar através da simulação numérica como a variação do número de Reynolds e da forma geométrica influencia a distribuição das principais variáveis;
- Analisar como os modelos de turbulência influenciam as principais variáveis e coeficientes aerodinâmicos dos problemas estudados.

2. Referencial Teórico

2.1 Dinâmica dos Fluidos

A curiosidade humana e a necessidade de se formar conceitos básicos sobre a mecânica e movimentação dos fluidos remonta à antiguidade, Fortuna em seu livro Técnicas para Dinâmica dos Fluidos (2000, p. 19) traz um pequeno respaldo histórico sobre a Mecânica dos fluidos nos tempos antigos, dizendo:

Egípcios tinham relógios de água; Aristóteles foi o primeiro a descrever o princípio da continuidade; Arquimedes, pelo seu princípio, definiu as condições para que um corpo, quando mergulhado em fluido flutuasse ou não. Os romanos construíram aquedutos para transportar água para as suas cidades. O gênio Leonardo da Vinci, no século XV, sugeriu, entre outras coisas, formas que reduziam o arrasto de barcos na água. Em 1586, Simon Stevin publicou Estática e Hidrostática, um tratado matemático sobre a mecânica dos fluidos como era conhecida até então.

Sobre a Mecânica de Fluidos, Brunetti constrói uma definição, baseada nos seus aspectos principais e suas aplicações:

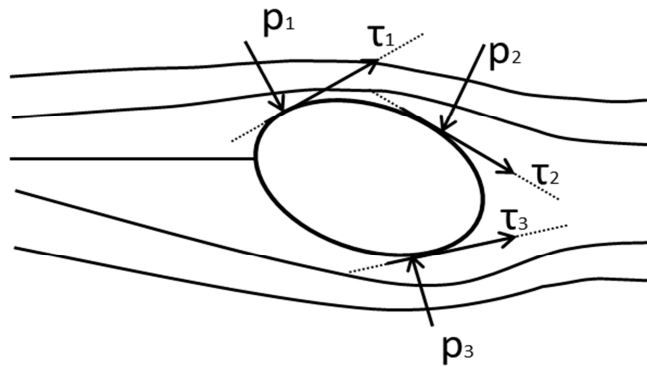
A mecânica dos fluidos é a ciência que estuda o comportamento físico dos fluidos, assim como as leis que regem esse comportamento. As bases lançadas pela Mecânica dos fluidos são fundamentais para diversos ramos de aplicação da engenharia. Dessa forma, o escoamento de fluidos em canais e

condutos, a lubrificação, os esforços em barragens, os corpos flutuantes, as máquinas hidráulicas, ventilação, a aerodinâmica e muitos outros assuntos lançam mão das leis das Mecânicas de Fluidos para obter resultados de aplicação prática (Brunetti, 2008).

2.2 Conceitos Fundamentais

Quando um fluido escoar por uma superfície de um sólido os esforços gerados por cada partícula do fluido podem ser divididos em dois tipos: uma força normal (p) e uma força tangencial (τ), também denominadas de pressão e cisalhamento, respectivamente. A Figura 4 ilustra os dois tipos de ações.

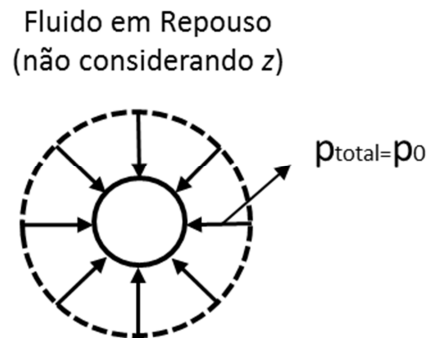
Figura 4 - Tensões atuantes no corpo imerso.



FONTE: BRUNETTI, 2008

Em determinadas situações algumas dessas forças são desconsideradas, como por exemplo, nas situações em que o fluido permanece estático, as tensões de cisalhamento são desconsideradas, e as variações de pressão só ocorrem segundo uma variação de cota (Z). De forma que num eixo horizontal inexistem diferenças de pressões, pois as pressões são simétricas e se anulam, assim em uma partícula de fluido, com altura desprezível, a pressão resultante é zero, conforme mostra a Figura 5.

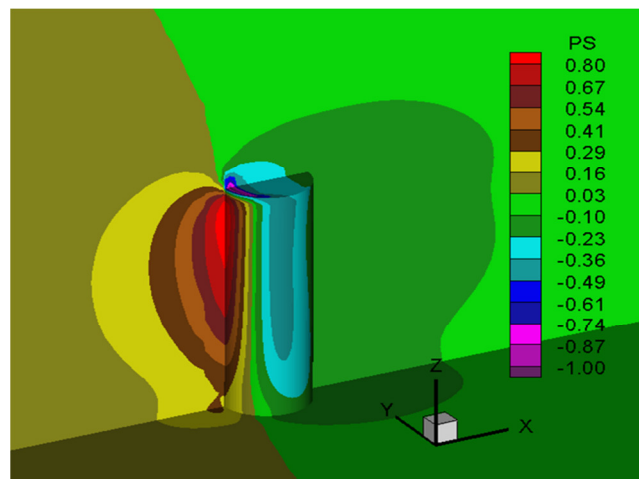
Figura 5 - Pressão atuante no corpo imerso.



FONTE: BRUNETTI, 2008

Porém, na consideração de um fluido ideal, na situação em que o fluido se encontra em movimento, ou o objeto se movimenta em relação ao fluido, existem diferenças de pressão no eixo horizontal, de forma que agora, os gradientes de pressão não estão restritos apenas à direção Z. A componente de velocidade, existente agora na situação dinâmica, gera diferenças de pressão a barlavento e sotavento do corpo imerso no fluido. Na Figura 6 se tem a imagem de um corpo tridimensional sujeito a um campo de velocidade, que gera diferenças de pressão num eixo horizontal:

Figura 6 - Variações de Pressão em um corpo tridimensional.



FONTE: AUTOR, 2013

2.2.1 Tipos de Escoamento

Os tipos de escoamento podem ser classificados principalmente em três tipos, segundo WHITE (2002) temos:

- Escoamento Permanente ou Não Permanente;
- Compressível ou Incompressível;
- Laminar ou Turbulento;

O regime permanente é aquele que as propriedades do fluido não mudam segundo uma variação no tempo. Isso não significa que não possam mudar com o espaço, desde que não hajam variações no tempo. Ou seja, mesmo um fluido estando em movimento suas propriedades em qualquer instante permanecem a mesma.

E por analogia, o escoamento não permanente é aquele que tem suas propriedades, em determinadas regiões, variando no tempo.

Sobre escoamentos compressíveis e incompressíveis WHITE (2002) afirma que:

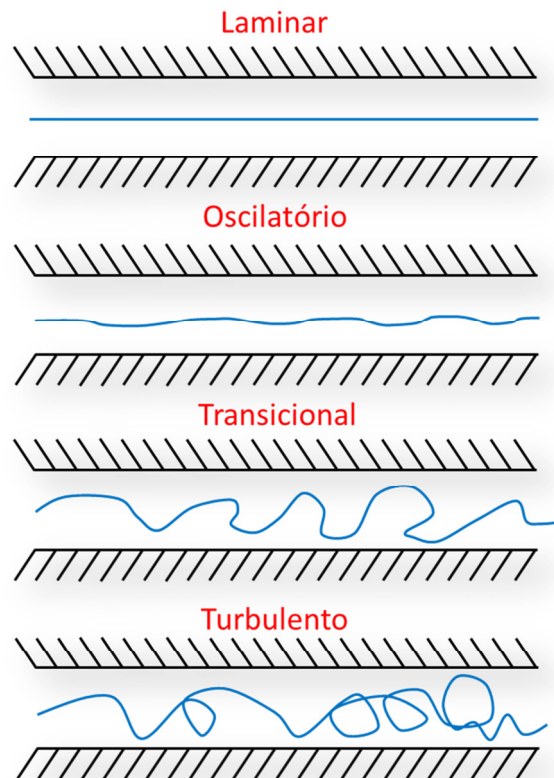
A compressibilidade de um fluido está ligada à sua capacidade de mover-se a velocidades comparáveis à sua velocidade do som e sofrer variações em sua massa específica. Um escoamento incompressível existe se a massa específica de cada partícula permanece constante no seu movimento através do seu campo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

Sobre a natureza do escoamento relacionado as características laminar, transitória e turbulenta. Toassi (2003) afirma que:

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) (TOASSI, 2013, p. 20).

Conforme a Figura 7 abaixo:

Figura 7 - Linhas de corrente segundo variação de turbulência.



O escoamento laminar possui baixas velocidades e as linhas de fluxo são bem orientadas e não se misturam, nessa situação os efeitos viscosos são mais significativos. Nos escoamentos de transição, observa-se um aumento na desordem das linhas de fluxo, mostrando a tendência de um aumento na turbulência do sistema. No escoamento turbulento, que geralmente ocorre em altas velocidades e números de Reynolds altos, as linhas de fluxo se movem de forma aleatória e desorientada, misturando-se, conforme se pode observar na imagem acima.

2.2.2. 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, p. 688):

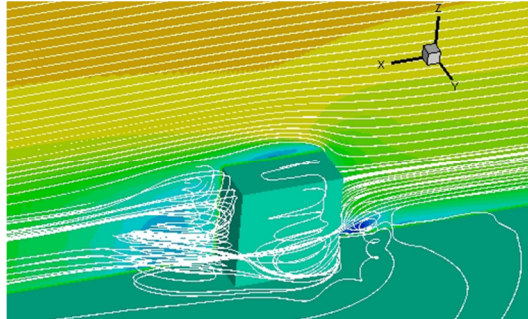
$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1)$$

Onde V é a velocidade característica, L é o comprimento característico do objeto imerso no fluido, e ν é a viscosidade cinemática. Em termos físicos a expressão de Reynolds representa a razão entre as forças inerciais e forças viscosas do fluido.

2.2.3. Formação e 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.” (SIMIU e SCALAN, 1996). Um vórtice é um escoamento em formato giratório e suas linhas de corrente apresentam um padrão circular ou espiral, tal fenômeno ocorre devido a alguma diferença de pressão ocorrido na região de escoamento do fluido. Ao tentar equilibrar esse gradiente de pressão o fluido tende a escoar preferencialmente para tal região, criando um formato de escoamento característico.

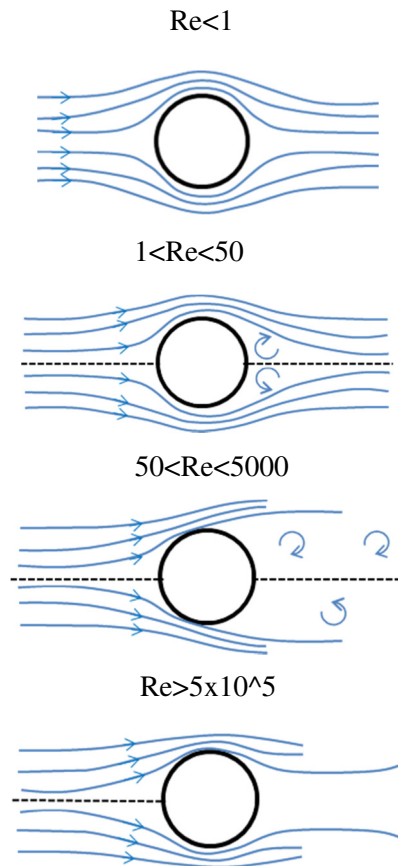
Figura 8 - Formação de vórtices em um corpo imerso.



FONTE: NASCIMENTO, 2015.

Como já foi dito, o número de Reynolds altera as propriedades e regimes de escoamento, de forma que a variação do mesmo gera variações na formação e desprendimento de vórtices, a Figura 9 abaixo ilustra tal fenômeno:

Figura 9 - Formação e desprendimento de vórtices em um cilindro circular bidimensional



FONTE: SCHIOZER, 1996.

É possível observar na Figura 9 que para Reynolds muito baixos não existe a formação de vórtices a jusante do corpo, tendo-se apenas um escoamento simétrico. Ao se aumentar o número de Reynolds, formam-se um par de vórtices simétricos. Para números de Reynolds entre 50 e 5000 inicia-se o desprendimento de vórtices.

2.3. Aspectos Gerais da Engenharia do Vento Computacional

A Engenharia do Vento Computacional (EVC) se preocupa principalmente em resolver problemas relacionados à Dinâmica dos Fluidos Computacionais, que até um tempo atrás eram realizados somente em Túneis de Vento. Ela se utiliza de métodos numéricos para a modelagem das equações governantes e solução das mesmas, com o auxílio de computadores.

Braun em sua tese de Doutorado (2007, p.1-2) afirma que:

A EVC pode ser definida como o resultado do processo evolutivo na forma de abordagem dos problemas de engenharia do vento, a qual foi construída a partir de técnicas experimentais desenvolvidas no túnel de vento. Através da abordagem computacional, as análises passam a ser feitas empregando-se técnicas numéricas de solução para as equações de conservação, as quais regem o comportamento de fluidos em movimento e de estruturas imersas deformáveis. Consequentemente, a maioria das áreas de aplicação desenvolvidas pela engenharia do vento pode ser transportada diretamente para o ambiente computacional (BRAUN, 2007, p.1-2).

Simiu e Scanlan (1996), afirma que a engenharia do vento é dividida em três subáreas de aplicação: “avaliação das condições ambientais devidas à circulação do vento, determinação das forças induzidas pelo vento sobre estruturas e resposta estrutural sob a ação do vento”. Os problemas de condições ambientais provocados pela circulação de vento estão relacionados a questões climáticas, tais como: camada limite atmosférica e da turbulência atmosférica. Exemplos típicos de aplicação podem ser encontrados na análise de dispersão de poluentes e estudos de microclimas em zonas urbanas, análises de conforto térmico em ambientes internos e externos, estudos sobre conforto de pedestres em regiões próximos a prédios de grande porte e análise de circulação de vento sobre terrenos abertos.

Quanto aos esforços gerados pela ação do vento, os mesmos são obtidos pelos coeficientes aerodinâmicos e sua variação no tempo, através de ensaios experimentais ou análises numéricas. Os principais esforços atuantes em corpos imersos em um fluido em movimento são as forças de arrasto, sustentação e momento. Esses coeficientes são muito utilizados em análises estruturais não só na engenharia civil para a análise dos esforços causados pelos ventos, mas também se utilizam tais coeficientes em projetos de carros, aeronaves, pontes e quaisquer corpos que sofram influências significativas da mecânica dos fluidos.

Na situação em que o fluido escoar e gera esforços na estrutura, a mesma se deforma e para análise da interação de forças aerodinâmicas com forças de inércia é conveniente um estudo de interação fluido-estrutura. Considerando a situação de aeroelasticidade da combinação dos dois meios, fluido e estrutura, e toda essa análise deve ser feita considerando a variação dos esforços e respostas estruturais no tempo. Tais análises nos fornecem informação referentes à estabilidade da estrutura, são muito utilizados em projetos de pontes, edifícios altos, aerofólios, asas de aviões, ônibus espaciais, etc.

2.4. Engenharia do Vento Computacional: Contexto Histórico

No intuito de distinguir aplicações usualmente associadas à Dinâmica dos Fluidos Computacional (“CFD – *Computational Fluid Dynamics*”) das aplicações de engenharia quase exclusivamente relacionadas ao vento, um novo campo de estudos foi estabelecido na metade dos anos oitenta. Desta maneira, teve início a Engenharia do Vento Computacional (“CWE – *Computational Wind Engineering*”) e rapidamente evoluciona nas últimas décadas (PICCOLI, 2009, p. 5).

Um dos pioneiros e principais propagadores de tal segmento foi Shuzo Murakami. Murakami foi o responsável pela edição de uma das primeiras publicações sobre o tema, no início da década de noventa. Braun (2007, p. 2-3) comenta:

A primeira publicação dedicada ao tema da EVC aparece no volume 35 do “*Jornal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*”, editado por Murakami (1990), onde são apresentados 14 trabalhos representando o estado-da-arte da época. Boa parte destes trabalhos é direcionada ao estudo e aplicação dos modelos de turbulência na simulação de escoamentos sobre corpos rombudos, evidenciando a importância deste aspecto na elaboração dos algoritmos.

Murakami prosseguiu e em 1993 reuniu os principais e mais relevantes trabalhos relacionados à EVC realizados no primeiro *Simpósio Internacional sobre Engenharia do Vento*, que ocorreu em Tóquio, no ano 1992. Tais trabalhos trouxeram relevantes avanços relacionados a modelos de turbulência, formulações numéricas, cargas devido ao vento em prédios e edificações em geral, instabilidades causadas pela ação do vento em pontes e conforto térmico.

A partir daí já se observou a complexidade e a grande quantidade de equações que eram necessárias para se resolver problemas de EVC que possuíam altos números de Reynolds e grandes domínios. Tais características levam à Engenharia do Vento Computacional a uma dificuldade: elevados tempos de processamento. Dificuldade essa que tornavam inviáveis, e ainda tornam a solução de determinados tipos de problemas e limitavam alguns problemas a malhas não muito refinadas e números de Reynolds moderados.

Para mostrar o grau de dificuldade de resolver tais problemas, (SILVEIRA NETO, 2002) fez uma estimativa, na qual informa a quantidade de equações necessárias para resolver um problema tridimensional de escoamentos atmosféricos. Abaixo tem-se a equação:

$$Ngl = \left(\frac{L}{l}\right)^3 = Re^{\frac{9}{4}} \quad (2)$$

Onde Ngl é o número de graus de liberdade, que define a quantidade de equações, L é a escala de comprimento característica e l a escala dissipativa de Kolmogorov. Sobre essa equação Piccoli (2009, p. 6) faz um exemplo e mostra a grande quantidade de graus de liberdade existente em um problema tridimensional: “Para um escoamento onde $L \sim 500 \text{ km}$ e $l \sim 1 \text{ mm}$, o número de equações necessárias é de $Ngl = 10^{24}$, muito além do valor de 10^8 praticável com o atual poder computacional observado.”

Porém com o passar do tempo e com os avanços realizados nos desenvolvimento de computadores, estes passaram a ter mais capacidade de processamento e armazenamento, tornando que novas análises fossem feitas e que análises realizadas anteriormente fossem refeitas de forma melhorada, com malhas mais refinadas e número de Reynolds mais altos.

De forma que hoje em dia tornou-se possível, apesar de ainda várias limitações solucionar diversos problemas ligados a EVC, tanto relacionadas ao conforto térmico (Sumei Liu et al., 2013), a interação fluido estrutura (Braun e Awruch, 2009) e também relacionado à aerodinâmica de edificações (Soares e Bono, 2015; Nascimento e Bono, 2015).

Porém observa-se que do fim dos anos noventa para os anos 2000 ocorre um aumento considerável no número de simulações computacionais realizadas, em detrimento de ensaios experimentais realizados em túneis de vento. Sobre isso Posner et al. (2003), afirma que com isso gerou uma grande carência de análises experimentais, e consequentemente informações e dados que eram obtidos em tais análises estavam em falta, e prejudicam inclusive as validações dos modelos numéricos utilizados.

3. Metodologia

Apesar da importância do tema, a literatura sobre Engenharia do Vento é escassa e, muitas vezes, baseada em estudos realizados em túneis de vento. Esses estudos se apresentam como importantes contribuições e ajudam a entender o comportamento do escoamento no exterior e interior das edificações, entretanto, resulta muito difícil extrapolar os resultados para outros projetos.

Nas últimas décadas, os programas baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional permitiram a simulação de problemas relacionados à ventilação e aerodinâmica de edificações e conjuntos urbanos. O programa HEXAFEM_3D_IFF (BONO et al., 2011a) faz uso destas técnicas e foi utilizada para o desenvolvimento das investigações propostas neste trabalho.

A simulação numérica de escoamentos incompressíveis apresenta uma série de dificuldades devido à forma na qual se reduz a equação de conservação de massa em razão da restrição imposta pela incompressibilidade. Uma alternativa interessante para o tratamento numérico deste tipo de problema é dada através do enfoque da pseudo-compressibilidade, cujos princípios foram apresentados inicialmente por Chorin (1967), na qual se considera a presença de uma leve compressibilidade no escoamento. Deste modo, através da pseudo-compressibilidade é possível obter uma equação de conservação de massa que tenha um termo explícito para a pressão, simplificando enormemente a solução do sistema de equações governantes. Esta forma de abordagem tem sido empregada por vários autores, tais como Zienkiewicz et al. (2005), entre outros.

3.1 Equações governantes

As equações de conservação de massa e de quantidade de movimento são as equações mais gerais para a descrição de um escoamento em um meio contínuo, tridimensional, isotérmico, turbulento e em regime transiente. Desprezando as forças de volume e a existência de fonte/sumidouro as equações que governam o problema podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{em } \Omega. \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{em } \Omega. \quad (4)$$

com $i, j = 1, 2, 3$ onde $\Omega \subset \mathbb{R}^N$ e $(0, T)$ são os domínios espacial e temporal, respectivamente, $N = 3$ é o número de dimensões espaciais e Γ denota o contorno de Ω . As coordenadas espaciais e temporais são denotadas por $\mathbf{x}$ e t . v_i é a componente da velocidade na direção da coordenada x_i , ρ é a massa específica, p é a pressão termodinâmica, τ_{ij} são as componentes do tensor de tensões viscosas e δ_{ij} é o delta de Kronecker.

Considerando a hipóteses de Stokes a equação constitutiva é definida como:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right). \quad (5)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Para definir totalmente o problema, devem-se adicionar ao sistema de equações, dado pelas equações (3) e (4), as condições iniciais e de contorno para as variáveis.

As equações que modelam o escoamento transiente incompressível viscoso numa descrição euleriana em coordenadas cartesianas podem ser escritas considerando a hipótese de pseudo-compressibilidade empregada por Kawahara e Hirano (1983). Esta hipótese modifica a equação de conservação de massa possibilitando escrevê-la em função da derivada temporal da pressão.

Após algumas manipulações algébricas e considerando a velocidade de propagação do som (c) para um escoamento isotérmico e isentrópico, obtém-se a nova equação de conservação de massa para um escoamento levemente compressível:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + c^2 \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{em } \Omega. \quad (6)$$

3.2 Simulação de Grandes Escalas (LES)

Apesar de que as equações de Navier-Stokes são válidas para qualquer tipo de escoamento (laminar e turbulento), o mecanismo conhecido como *cascata de energia* dificulta o tratamento da turbulência. Atualmente um dos grandes desafios da Dinâmica dos Fluidos Computacional são a simulação e modelagem de escoamentos turbulentos. A maior parte dos escoamentos encontrados nos processos naturais e em aplicações práticas são turbulentos, portanto, este campo de pesquisas está em contínuo estudo no meio acadêmico e industrial. Constantemente os modelos existentes são aprimorados e novas metodologias de modelagem da turbulência são apresentadas.

A metodologia LES baseia-se na idéia de filtrar as variáveis de campo do problema para separar as grandes escalas das pequenas escalas. Após o processo de filtragem cada variável, escreve-se em dois componentes $f(\mathbf{x}, t) = \bar{f}(\mathbf{x}, t) + f'(\mathbf{x}, t)$ onde: $\bar{f}(\mathbf{x}, t)$ é a componente filtrada (resolvida) e $f'(\mathbf{x}, t)$ é a componente função das pequenas escalas ou sub-malha (modelada).

Aplicando-se um filtro volumétrico do tipo *box* à equação de conservação de massa (6) e de quantidade de movimento (4), obtém-se as equações filtradas. No formato da equação de conservação de massa não há alteração, entretanto, no termo da parcela advectiva na equação de quantidade de movimento, o termo não linear torna-se um produto filtrado,

impossibilitando a solução do sistema de equações. Para contornar o problema emprega-se o tensor de Reynolds global sub-malha $\tau_{ij}^{SGS} = \overline{v_i v_j} - \bar{v}_i \bar{v}_j$, chegando-se finalmente a seguinte equação filtrada:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \tau_{ij}^{SGS} \right). \quad (7)$$

onde τ_{ij}^{SGS} são as componentes do tensor de tensões sub-malhas na equação de conservação de quantidade de movimento. Empregando a hipótese de Boussinesq é possível modelar a parte anisotrópica do tensor de Reynolds global sub-malha, ou seja, escrevendo o mesmo em função da taxa de deformação gerada pelo campo de velocidades filtrado:

$$\tau_{ij}^{SGS} - \frac{\tau_{kk}}{3} \delta_{ij} = -2 \nu_t \bar{S}_{ij}. \quad (8)$$

sendo o tensor taxa de deformação $\bar{S}_{ij}$, dado por:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right). \quad (9)$$

3.2.1 Modelo Sub-malha de Smagorinsky

A viscosidade turbulenta ν_t proposta por Smagorinsky (1963) é dada como:

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta})^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}|. \quad (10)$$

onde C_s é a constante de Smagorinsky, assumindo valores diferentes de acordo ao tipo de escoamento, e $\bar{\Delta} = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z} = \sqrt[3]{\text{volume elemento}}$ é a dimensão característica associada ao filtro empregado. Com o objetivo de evitar a dependência da constante de proporcionalidade de Smagorinsky, foram desenvolvidos os modelos dinâmicos, onde a constante é função do tempo e espaço.

3.2.2 Modelo Sub-malha de Smagorinsky Dinâmico

Este modelo está baseado no uso de dois filtros com comprimentos característicos diferentes. Para a primeira filtragem usam-se as dimensões da malha para calcular o seu comprimento característico, ou seja, exatamente como no modelo de Smagorinsky. No segundo filtro usa-se um múltiplo das dimensões da malha para calcular o comprimento

característico do filtro teste. O comprimento característico do segundo filtro, $\langle \bar{\Delta} \rangle$, é maior que o comprimento característico do filtro no nível da malha, $\bar{\Delta}$.

Empregando o modelo sub-malha dinâmico, proposto por Germano et al. (1991) e modificado posteriormente por Lilly (1992), a viscosidade turbulenta fica definida por:

$$\nu_t = C(\mathbf{x}, t) \bar{\Delta}^2 |\bar{S}|. \quad (11)$$

onde $C(\mathbf{x}, t)$ é o coeficiente dinâmico, o qual é calculado automaticamente em função da posição no espaço $\mathbf{x}$ e do tempo t . O coeficiente dinâmico é dado por:

$$C(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}}. \quad (12)$$

onde os tensores L_{ij} e M_{ij} são definidos segundo Germano et al. (1991):

$$L_{ij} = \langle \bar{v}_i \bar{v}_j \rangle - \langle \bar{v}_i \rangle \langle \bar{v}_j \rangle. \quad (13)$$

$$M_{ij} = \langle \bar{\Delta} \rangle^2 \langle \bar{S} \rangle \langle \bar{S}_{ij} \rangle - \langle \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \rangle. \quad (14)$$

com $i, j = 1, 2, 3$. Nas equações (13) e (14) a barra sobreposta indica o primeiro processo de filtragem e o símbolo $\langle \rangle$ refere-se ao segundo processo de filtragem (filtro teste). Observa-se que os tensores L_{ij} e M_{ij} podem ser calculados explicitamente, uma vez que os valores presentes nas equações são todos conhecidos.

3.3 Formulação Numérica

As equações de conservação de massa e de quantidade de movimento são resolvidas empregando o método dos elementos finitos (FEM), usando uma série de Taylor e o clássico método de Bubnov-Galerkin para a discretização do tempo e do espaço, respectivamente.

Neste trabalho, para a resolução das equações de conservação de massa e de Navier-Stokes, foi implementado o esquema de Taylor-Galerkin explícito de dois passos empregado por Braun e Awruch (2005) e Braun (2007). Para discretizar a geometria emprega-se o elemento hexaédrico trilinear com integração analítica reduzida das matrizes em nível de elemento, a fim de reduzir o tempo de CPU e o consumo de memória.

4. Resultados e Discussão

4.1 Análise de um Cilindro circular Finito com relação de $AR = 3$

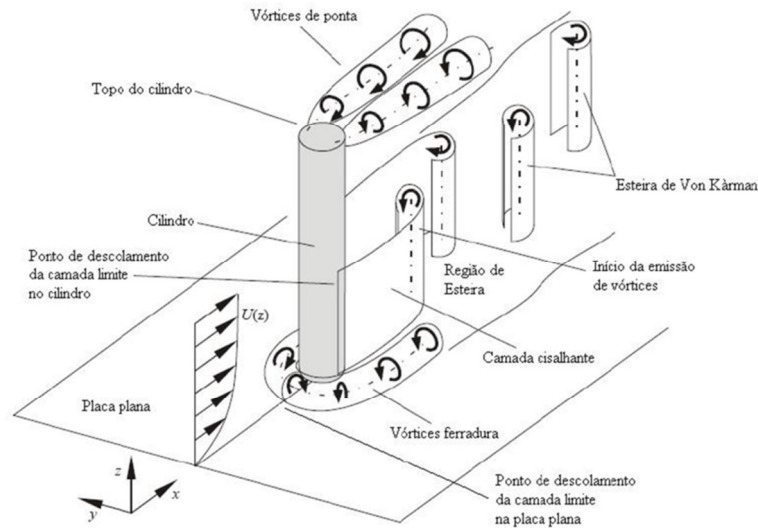
Inicialmente foi analisado um modelo tridimensional de um cilindro circular rígido de diâmetro unitário e de comprimento finito com razão de aspecto (proporção comprimento/diâmetro) igual a 3. Emprega-se este exemplo já que existe uma ampla gama de resultados tanto experimentais como numéricos, além do mais, o escoamento apresenta os principais fenômenos que ocorrem em corpos rombudos imersos em um fluido em movimento.

A análise e compreensão do escoamento em torno de corpos rombudos é fundamental para várias áreas da engenharia. Este tipo de geometria aparece frequentemente nas mais diversas áreas tais como: escoamento ao redor de edificações, aplicações na indústria aeronáutica e aeroespacial, trocadores de calor, risers da indústria de exploração de petróleo offshore, entre outros.

O escoamento ao redor de um cilindro circular de comprimento finito é um problema muito complexo, o qual tem atraído durante muitos anos o interesse científico de inúmeros pesquisadores, tornando-se um problema clássico da Mecânica dos Fluidos (Sumner, 2004). Embora, a geometria seja simples, os diferentes fenômenos que se apresentam no escoamento num intervalo reduzido do número de Reynolds são extremamente variados, por exemplo: separação da camada limite, geração e desprendimento da esteira de vórtices, transição do regime de esteira fechada para o de esteira periódica devido ao aparecimento da primeira instabilidade, formação do vórtice ferradura ou base, entre outros.

A topologia do escoamento ao redor de corpos rombudos tridimensionais muda significativamente quando comparada com a análise que considera um corpo de comprimento infinito (caso bidimensional). Várias peculiaridades apresenta este tipo de escoamento, por exemplo: formação do vórtice ferradura ou vórtice de base, geração dos vórtices de ponta e a da esteira de Von Karman, entre outros.. Na Figura 10, adaptada de Sumner et al. (2004), podem-se observar os principais fenômenos desenvolvidos no caso de um cilindro circular de comprimento finito sobre uma plataforma plana e submetido a um perfil de camada limite desenvolvido. Deve-se ressaltar que a topologia do escoamento e intensidade dos fenômenos muda conforme varia a relação entre o comprimento e o raio do cilindro circular.

Figura 10- Desenho esquemático dos principais fenômenos.



Fonte: Adaptada de Sumner et al., 2004

A geometria foi simulada para dois números de Reynolds, $Re = 100$ ($C=0.1$) com modelo de Turbulência Smag. Clássico, e $Re=1000$ ($C=0.1$), para a situação com $Re=1000$ utilizou-se dois modelos de turbulência, Smag. Clássico e Samg. Dinâmico. Empregou-se uma malha estruturada de elementos hexaédricos, sendo as dimensões do domínio $29 \times 17 \times 15$ [m³]. Para a discretização do domínio empregou-se uma malha de 319400 elementos e 335076 nós. Na Figura 11, mostra-se a malha empregada para o estudo, e na Figura 12 o domínio e as condições de contorno utilizadas.

Figura 11 - Malha de elementos hexaédricos empregados na simulação.

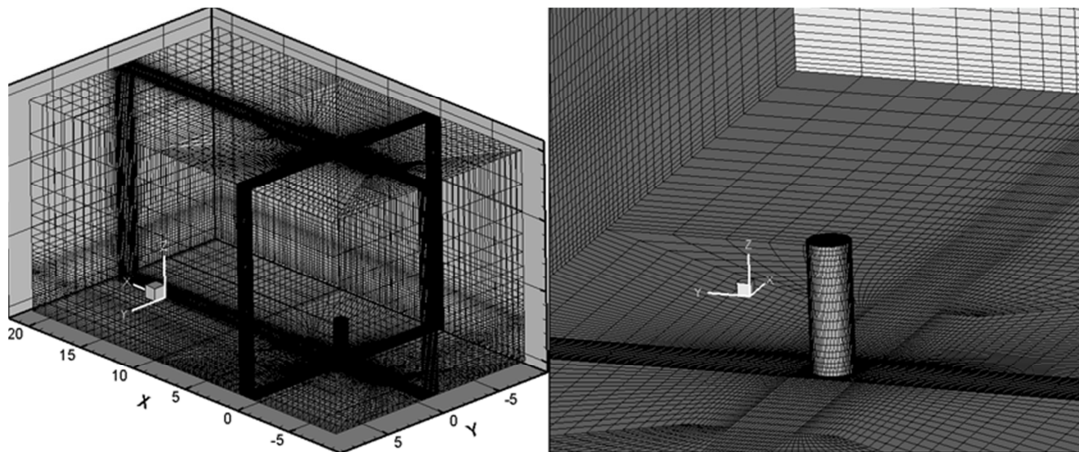
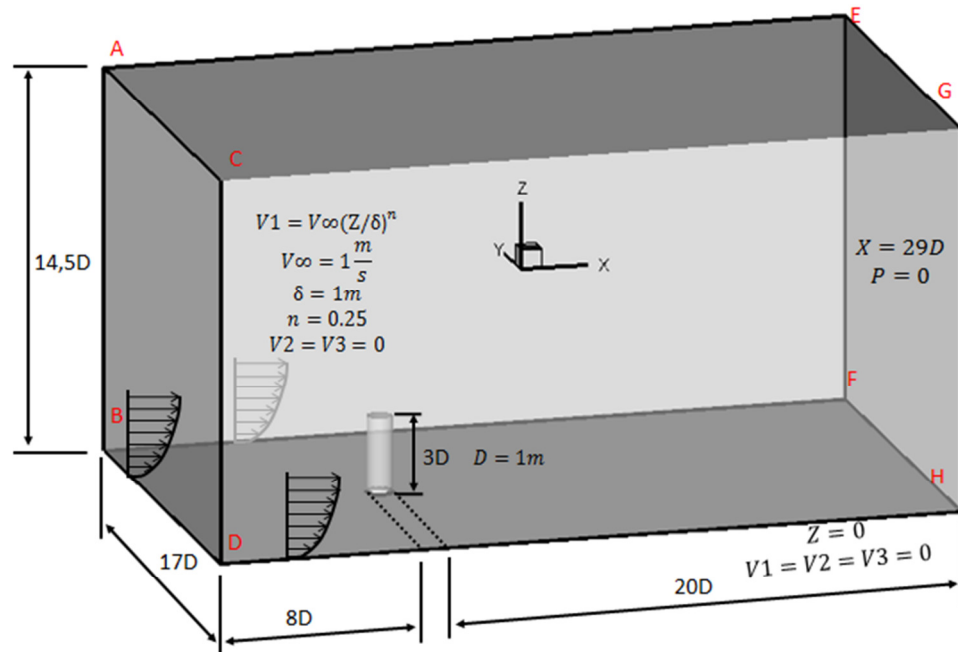


Figura 12 - Domínio Computacional utilizado.



Nos planos ABCD, ABEF, e CDGH é colocado o perfil de velocidade de acordo com a equação indicada na Figura 12. No plano BDFH, e na superfície do cilindro são descritas velocidade $(0,0,0)$ e no plano EFGH, é imposto uma pressão de referencia com valor $(0,0,0)$.

Na Figura 13, mostram-se as linhas de corrente médias e a distribuição de pressões médias ao redor do cilindro circular para o caso de $Re = 100$ e 1000 . Nota-se que a jusante da geometria as linhas de corrente se separam indicando uma ampla região de recirculação. Entretanto, a montante pode-se observar a formação do vórtice ferradura ou vórtice base, que pode ser melhor visto na Figura 14. Pode-se observar que as linhas de corrente no caso de $Re = 1000$ são afetadas pela turbulência, apresentando uma certo desordem em comparação com o caso de número de Reynolds laminar, $Re = 100$. Ainda é possível observar que na parte superior da geometria, as pressões são consideravelmente maiores em comparação com a região da base.

Figura 13 - Distribuição de pressões médias e linhas de corrente para $Re=100$ com Smag. Clássico e $Re=1000$ com Smag. Clássico e Dinâmico.

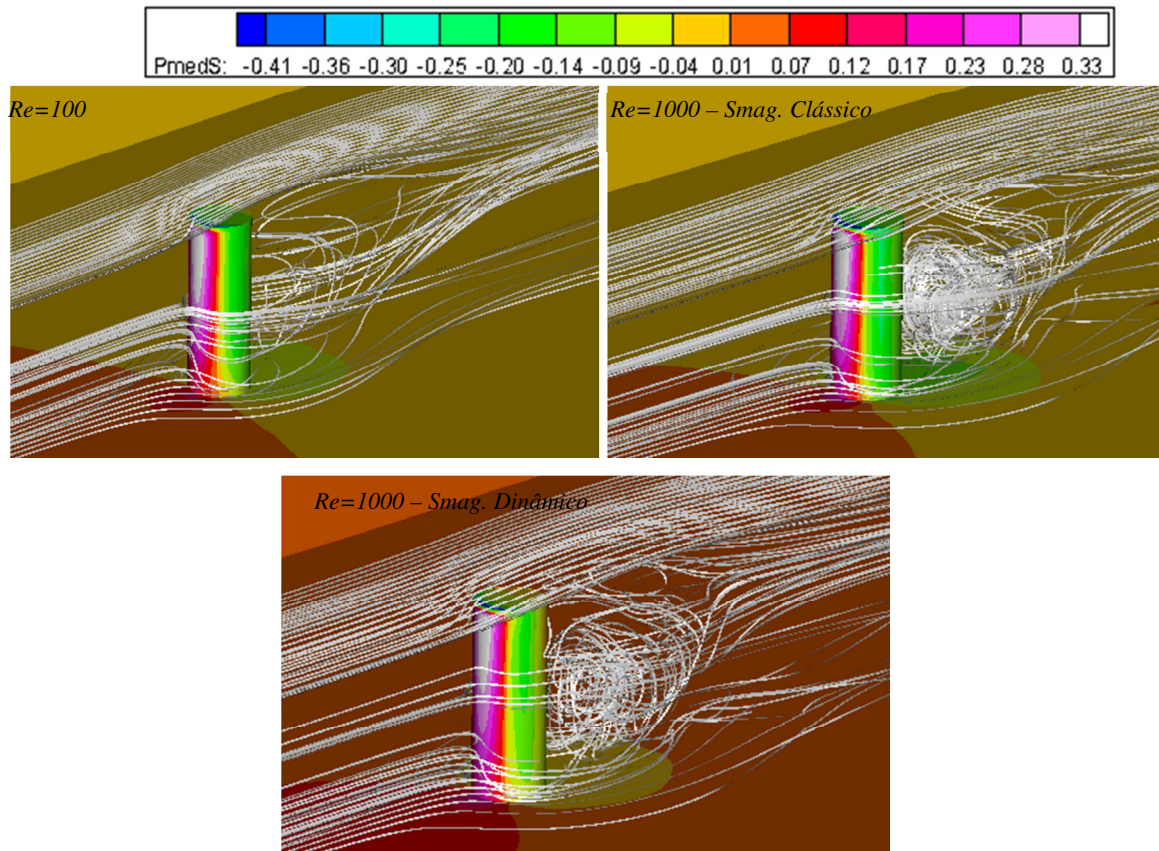
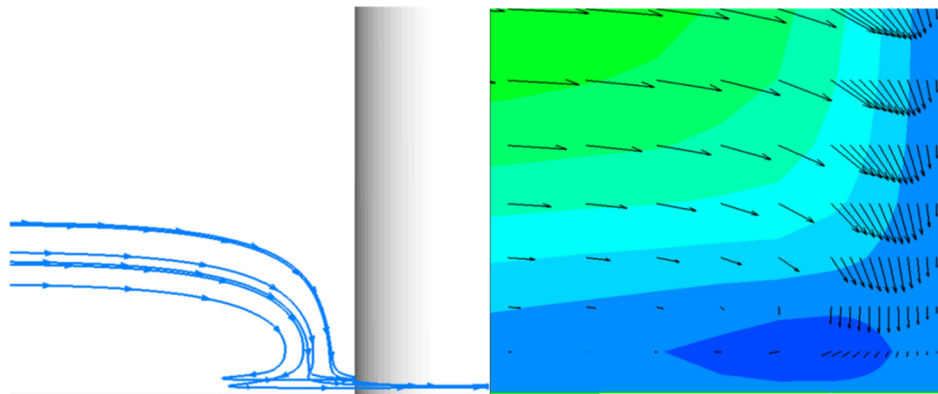


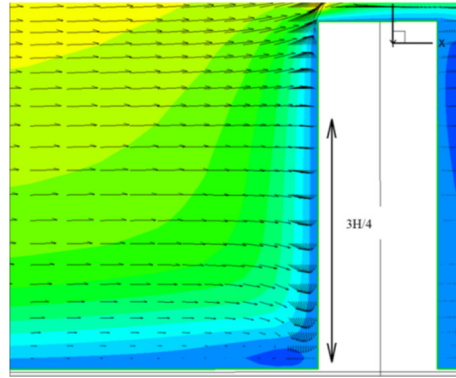
Figura 14 - Formação do vórtice de base para o caso de $Re=100$.



Na Figura 15, pode-se observar que no plano de simetria existem duas direções do escoamento, uma ascendente e outra descendente. A linha de corrente do ponto de estagnação divide o escoamento em duas regiões, a primeira dada por uma circulação descendente na região frontal da geometria no intervalo dado aproximadamente pelas alturas $[0, 3H/4]$. Entretanto, as partículas de fluido que se localizam acima da linha de corrente do ponto de estagnação tem um movimento ascendente na direção ao topo da geometria. A geometria do

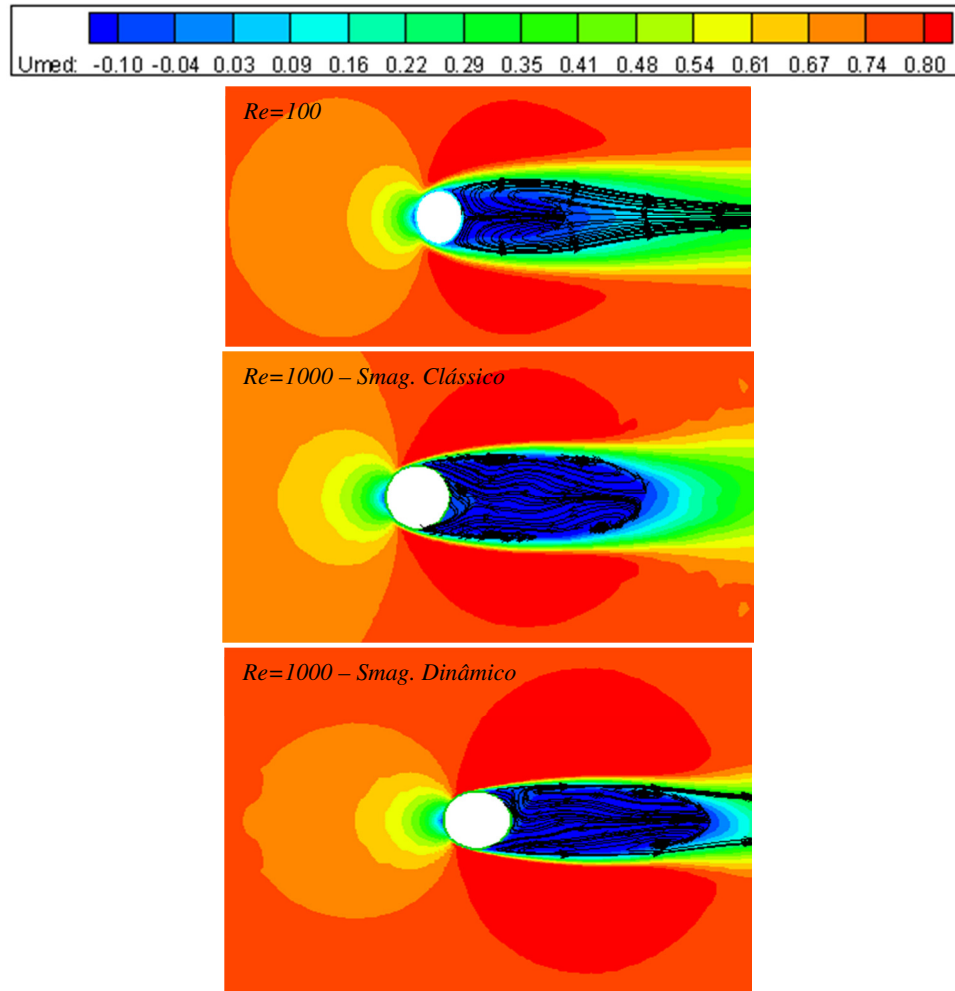
vórtice de base é muito semelhante para os dois números de Reynolds analisados e a posição aproximada do ponto de estagnação permanece praticamente constante e igual a $z = 3H/4$ nos dois casos estudados, conforme pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Ponto de estagnação para o caso de $Re=100$.



Na Figura 16, mostra-se a distribuição da componente de velocidade média na direção x para o plano $z = 1.5D$. Pode-se observar região da camada cisalhante, formada pela separação da camada limite de ambos os lados do cilindro circular. A interação das duas camadas cisalhantes têm grande impacto no desprendimento alternado de pares contrarrotativos de vórtices e na transição para a turbulência. Ainda observa-se como as velocidades para o caso de $Re=1000$ com Smag. Dinâmico são consideravelmente maiores se comparadas com o caso de $Re=1000$ em Smag. Clássico.

Figura 16 - Distribuição da velocidade média (V_x) para $Re=100$ com Smag. Clássico e $Re=1000$, com Smag. Clássico e Dinâmico, para um corte em $z=1.5D$.



Ainda na Figura 16 observa-se que para $Re=100$ ocorre a formação de um par de vórtices contrarrotativos simétricos, diferente do que ocorre para $Re=1000$, onde ocorre a formação de dois pares de vórtices, não simétricos, causada pelo efeito da turbulência. Pode-se observar que as velocidades são maiores para o caso de $Re=1000$.

Foram capturadas as velocidades instantâneas (V_x) de um ponto específico do domínio localizado em $x=0.75$, $y=0$ e $z=1.5$, na Figura 17 é mostrada a localização do ponto. As velocidades médias foram obtidas para as três situações simuladas $Re=100$ com Smag. Clássico, $Re=1000$ com Smag. Clássico e Dinâmico, na Figura 18 é mostrado um gráfico com as velocidades.

Observa-se que para o caso de $Re=100$ as velocidades são praticamente constantes se comparadas com os $Re=1000$, isso ocorre pelo fato do escoamento para $Re=100$ ser

predominantemente laminar enquanto para o outro Reynolds inicia-se os fenômenos de turbulência, causando alterações constantes nas velocidades.

Figura 17 - Localização do ponto - $x=0.75$, $y=0$ e $z=1.5$

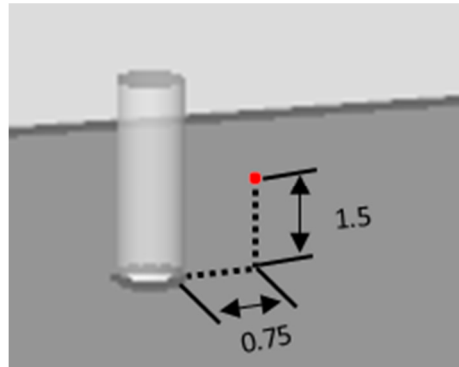
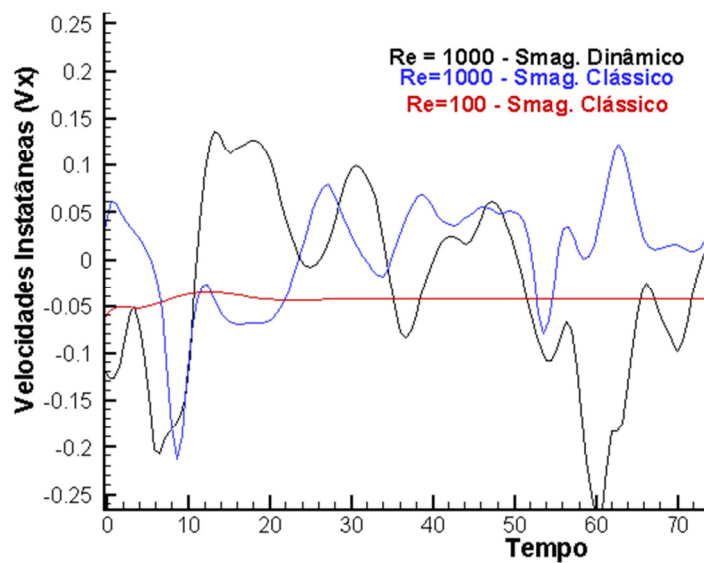


Figura 18 - Velocidades médias para o ponto em $x=0.75$, $y=0$ e $z=1.5$



Abaixo na Figura 19 é mostrado o coeficiente de arrasto para o cilindro. Observa-se que para o $Re=100$ os coeficientes são maiores se comparados com os $Re=1000$. No caso de geometrias com formato de cilindros circulares existe uma tendência dos valores dos coeficientes de arrasto diminuírem com o aumento do Reynolds. Na Tabela 1 é mostrado essa tendência dos valores médios do coeficiente de arrasto do presente trabalho, comparados com os obtidos por outros autores.

Figura 19 - Coeficientes de arrasto para o Cilindro Circular

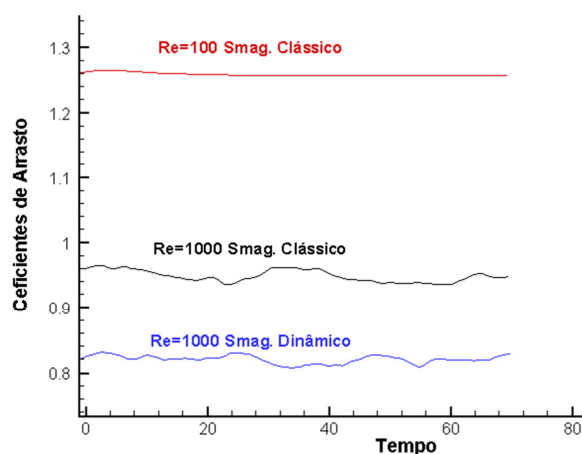


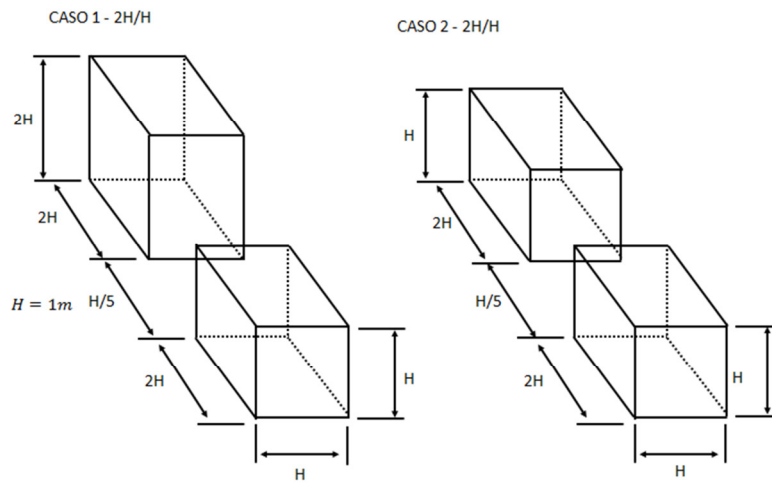
Tabela 1 - Coeficientes de arrastos médios obtidos no presente trabalho e por outros autores.

	Reynolds	CD
Presente Trabalho	0.1×10^3 - Smag. Clássico	1.26
Presente Trabalho	1×10^3 - Smag. Clássico	0.94
Presente Trabalho	1×10^3 - Smag. Dinâmico	0.82
Okamoto and Yagita	13×10^3	0.75
Sakamoto and Oiwake	60×10^3	0.68
Farivar (1981)	70×10^3	0.63

4.2 Prédios Paralelos para Reynolds 100 e 1000

Neste item serão analisadas duas situações em que existem dois prédios paralelos. Na primeira situação considera-se os prédios com diferentes alturas ($2H$ e H), e no segundo caso as edificações tem alturas iguais (H e H). Em ambos os casos as seções são retangulares de $2H \times H$ e as edificações estão separadas por um corredor de dimensão igual a $H/5$, conforme pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Disposições geométricas dos dois casos simulados.



Para as análises foram utilizados dois números de Reynolds, 100 , 1000 e 790000 . O principal objetivo de estudar esta configuração geométrica é analisar como a proximidade das geometrias e modificação da altura em uma das edificações influencia a topologia do escoamento e as distribuições das principais variáveis.

4.2.1 Prédios paralelos com alturas diferentes ($2H$ e H) para $Re=100$ e 1000

Para este caso emprega-se uma malha estruturada de 221.864 elementos hexaédricos e 235.860 nós. A malha, o domínio e as condições de contorno utilizadas podem ser vistas nas Figuras 21 e 22. Os modelos dos prédios e domínios empregados são similares aos estudados por Tuta e Orguz (2002) e Braun (2007), porém no presente estudo também consideram-se outros números de Reynolds.

Figura 21 - Malha hexaédrica utilizada na simulação dos prédios $2H$ e H .

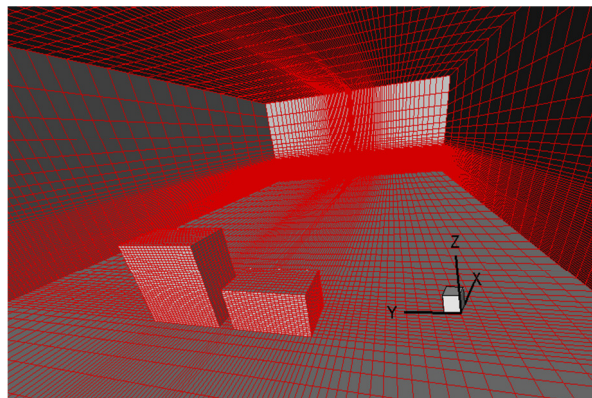
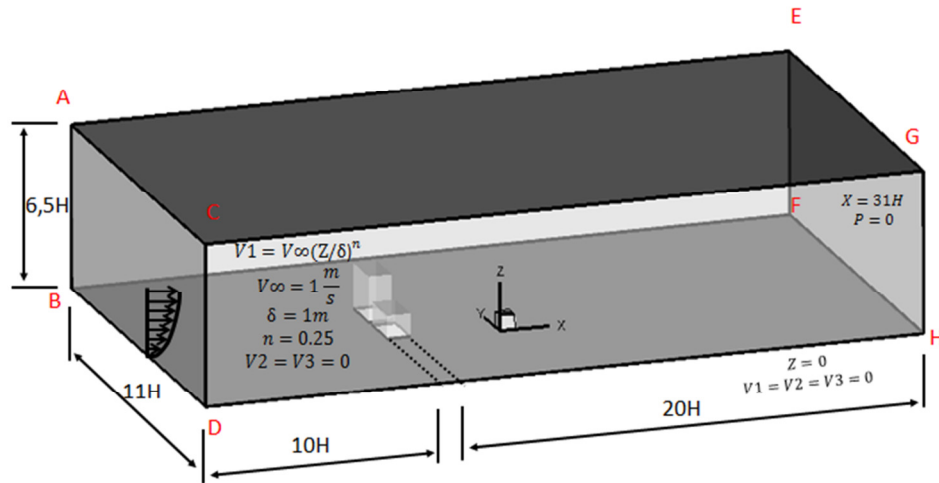


Figura 22 - Domínio computacional utilizado na situação 2H e H.



Nos plano ABCD é colocado o perfil de velocidade de acordo com a equação indicada na Figura 20. No plano BDFH, e na superfície do prédio são descritas velocidade (0,0,0) e no plano EFGH, é imposto uma pressão de referencia com valor (0,0,0).

Na Figura 23, mostram-se as distribuições das velocidades médias (V_x) para os casos de número de Reynolds igual a 100 e 1000 no plano $z = 0.75H$. Pode-se observar a formação de uma região de recirculação à jusante da geometria e uma região de velocidades negativas na parte frontal da geometria, indicando a existência de outra região de recirculação. Está recirculação origina-se pela formação do vórtice de base que pode ser visto na Figura 24 para os casos de $Re = 100$ e 1000. As linhas de corrente permitem mostrar a complexidade do escoamento e como a distribuição das pressões médias resulta alterada.

Figura 23 - Distribuição das velocidades médias (V_x) para $Re = 100$ e 1000 ($z = 0.75H$).

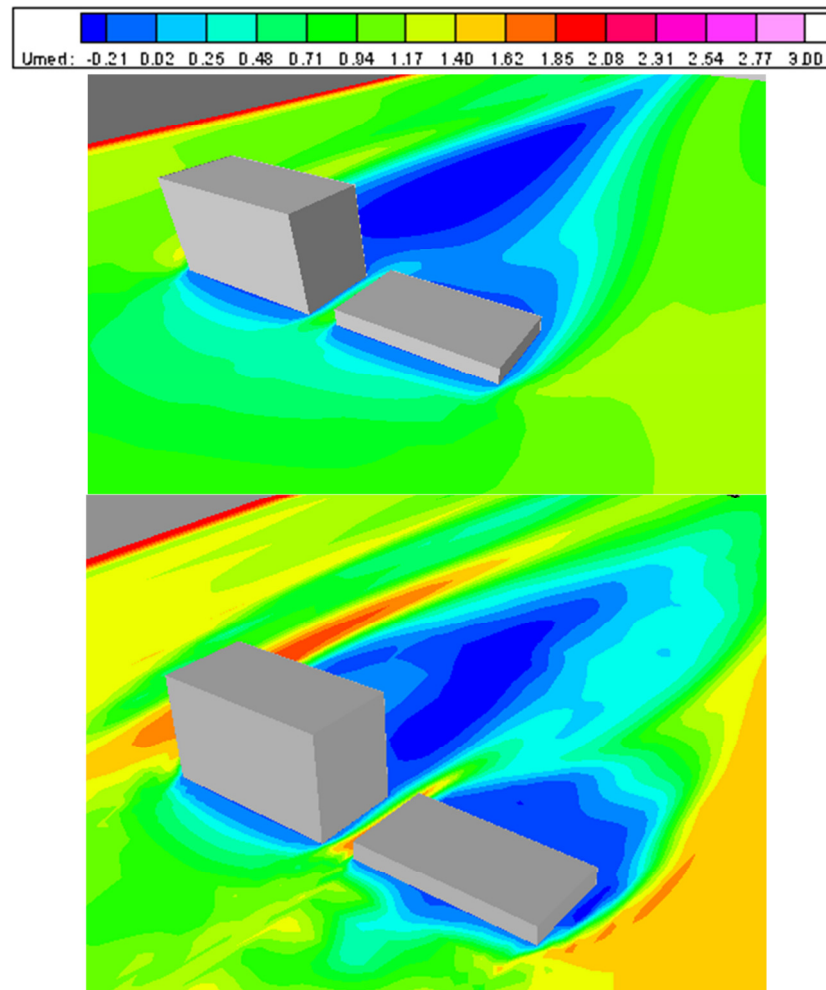
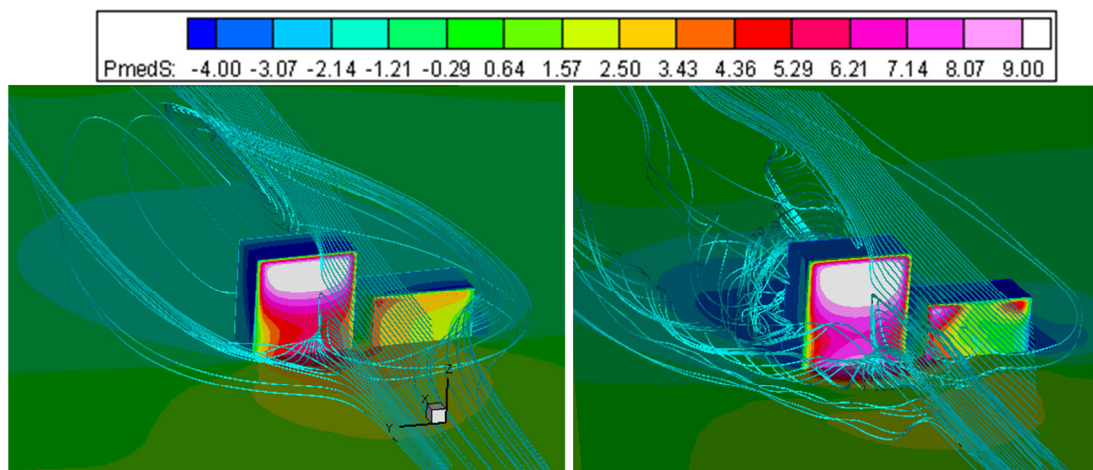


Figura 24 - Distribuição das pressões médias e linhas de corrente para $Re = 100$ e 1000 .

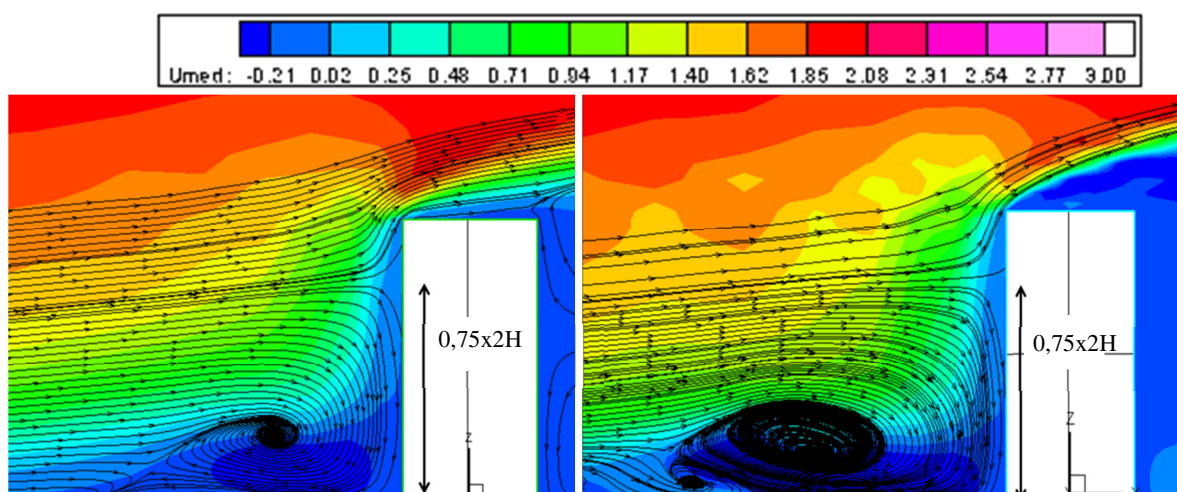


Na Figura 25, mostra-se a distribuição de velocidades médias na direção x junto com os vetores de velocidade no plano $y=1,2$ (plano no centro do prédio de altura $2H$). É possível notar que existem duas direções de escoamento na região frontal da geometria. A primeira

ocorre no sentido descendente a partir de um ponto de estagnação, o escoamento desce até o piso, onde recircula no sentido contrário do escoamento, formando o vórtice de base, e consequentemente gerando uma região de velocidades negativas.

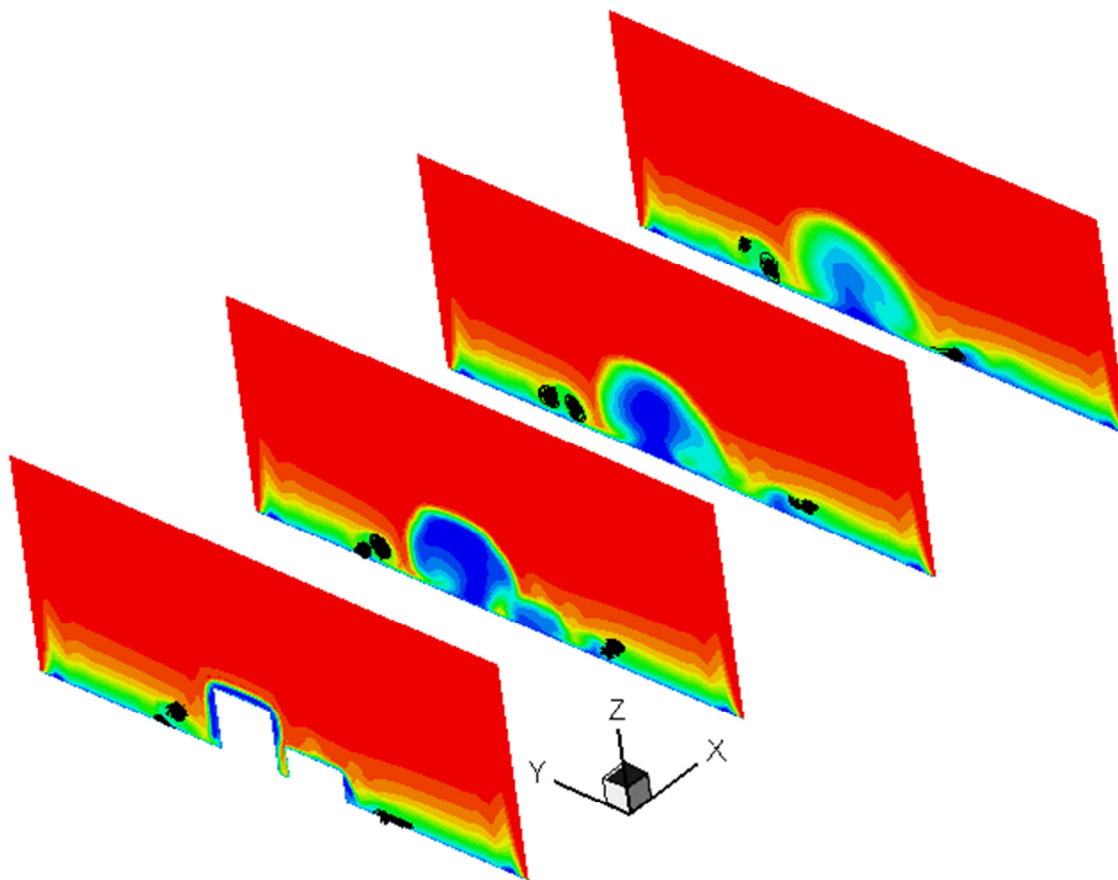
Na segunda região, o escoamento tem sentido ascendente, indo em direção ao topo da edificação, a partir do ponto de estagnação, sendo conduzidas posteriormente para as regiões de recirculação a jusante da geometria. O ponto de separação que divide o escoamento em ascendente e descendente foi observado como sendo aproximadamente $0,75 \times 2H$. Além do ponto de estagnação, é possível notar na imagem a diferença entre os tamanhos dos vórtices de base para os dois números de Reynolds analisados. Para o caso de $Re = 1000$, além do vórtice ser maior ocorre a formação de mais um pequeno vórtice junto ao vórtice principal.

Figura 25 - Ponto de estagnação para $Re = 100$ e 1000 para o prédio com altura $2H$.



Na Figura 26, mostra-se a distribuição das velocidades médias (V_x) para o caso de número de Reynolds igual a 1000 no plano $y=4,25$. Pode-se observar que o escoamento resulta fortemente alterado pelo vórtice de base, existindo regiões de altas velocidades nas proximidades do solo as quais podem provocar desconforto nos pedestres.

Figura 26 - Vórtices de base para o caso de $Re = 1000$ no plano $y = 4,25$.



Nas Figuras 27 e 28, mostram-se as componentes de velocidade na direção x no plano $z = 0.8H$ e as linhas de corrente para os casos de Reynolds 100 e 1000 . Analisando as figuras, é possível notar a diferença que existe entre as regiões de recirculação com Reynolds 100 e 1000 . Para o menor Reynolds observa-se uma maior região de recirculação em comparação com $Re=1000$. Também, observa-se uma maior desordem na formação dos vórtices para o caso com $Re=1000$.

Através das linhas de corrente, fica nítida a diferença entre as dimensões dos vórtices formados pelos prédios com diferentes alturas. A maior região de recirculação ocorre para o caso da maior edificação, isso se dá pela característica tridimensional do problema, fazendo com que a geometria maior, por ser mais rombuda e menos aerodinâmica, gere mais perturbações no escoamento.

Na Figura 27, também pode-se observar um aumento significativo da velocidade na região do corredor que divide as duas edificações. Observa-se que para o caso de $Re=1000$ esse aumento é ainda maior. Sempre que existe um estreitamento da região por onde o fluido escoar (que é o caso do corredor), a velocidade do fluido tende a aumentar. Isso se dá pela

existência de um gradiente de pressão a montante e jusante (entrada e saída) do corredor, diante dessa variação de pressão o fluido tende a equilibra-la, e escoar tão rapidamente quanto maior for esse gradiente de pressão, para a região de menor pressão. Ou seja, ocorre uma sucção do fluido para a região de menor pressão.

Figura 27 - Distribuição das velocidades médias (V_x) e linhas de corrente ($z = 0.8H$) para $Re = 100$ e 1000 .

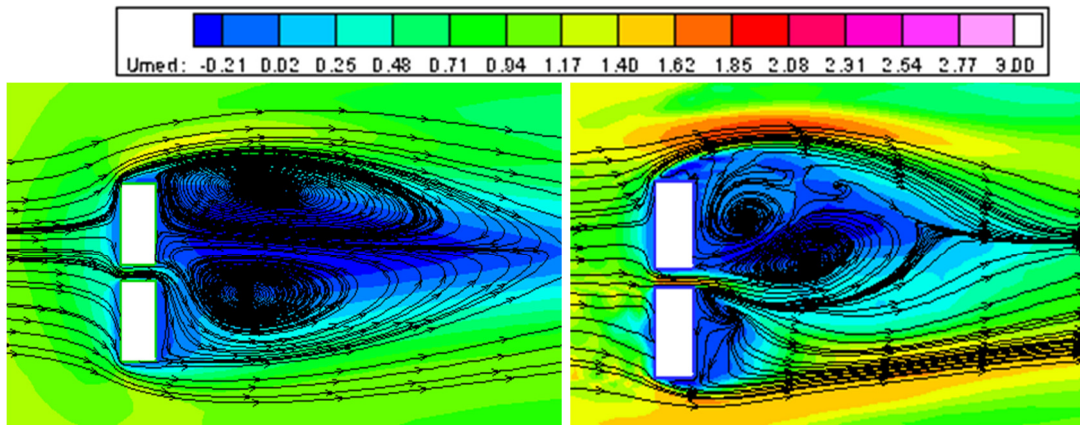
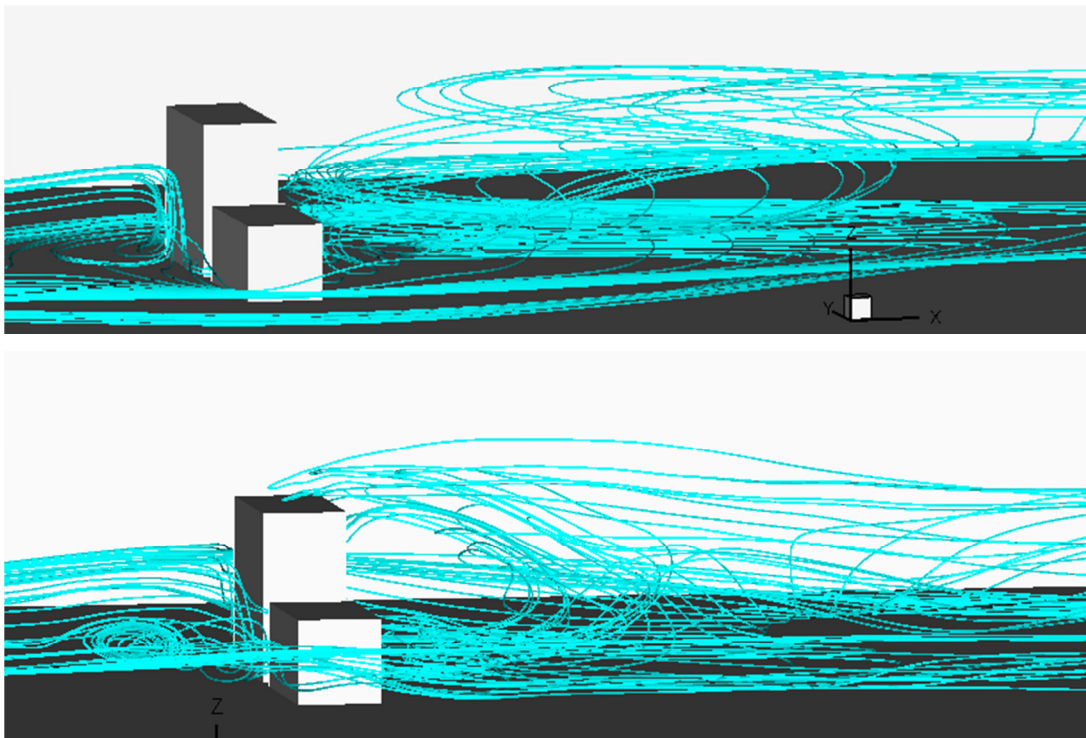


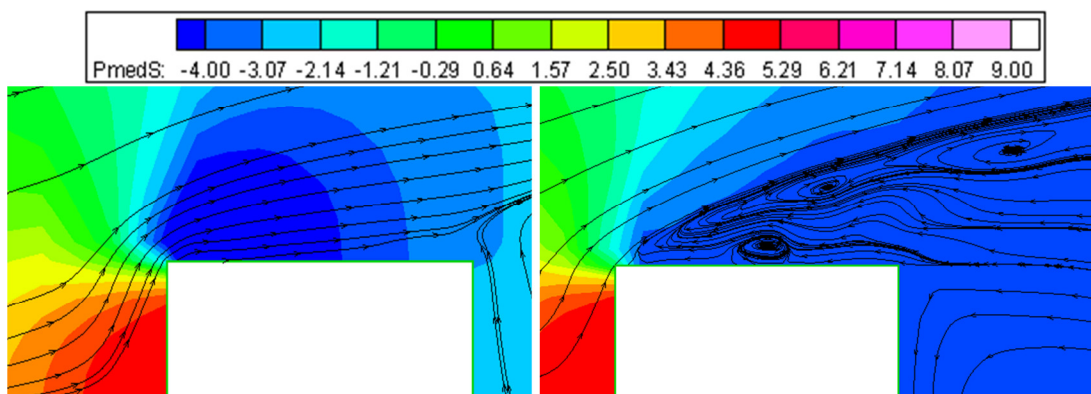
Figura 28 - Linhas de corrente para os casos de $Re = 100$ e 1000 .



Ainda na Figura 28, pode-se observar que para o caso de $Re = 1000$ a região de recirculação atinge a parte superior (teto) da edificação maior, o que não ocorre para o caso

com $Re = 100$. Isto induz uma maior pressão negativa no teto da edificação para o caso de $Re = 1000$. Esse fenômeno pode ser melhor visualizado na Figura 29. Para os edifícios de menor altura, não se observou a formação de vórtices no topo dos prédios para nenhum dos número de Reynolds analisados.

Figura 29 - Formação de vórtices no topo da edificação de maior altura para $Re=100$ e $Re=1000$.



Na Figura 30, mostram-se para os casos de $Re = 100$ e 1000 as distribuições de pressões médias para os planos $z = 0.5H$ e $1.5H$. Nas figuras podem-se visualizar as diferenças de pressão a montante e a jusante das geometrias, justificando o aumento de velocidade observado na Figura 27. Como foi dito anteriormente, o fluido escoar tão rapidamente quanto maior for esse gradiente de pressão. Para o caso de $Re=1000$ as diferenças de pressão são bem maiores para a mesma variação de espaço, ou seja, existe um maior gradiente de pressão, por isso ocorre um aumento de velocidade maior no caso do maior número de Reynolds. Na Figura 31, mostra-se a distribuição de pressão obtida por Braun (2007) para $Re = 7.9 \times 10^5$. Observar-se que os resultados obtidos no presente estudo são muito semelhantes, embora os números de Reynolds sejam diferentes.

Ao observar as distribuições de pressão é possível notar os esforços que as geometrias podem sofrer, nesse caso, nota-se que a região a montante do escoamento (região frontal a geometria) experimenta uma pressão positiva, empurrando o prédio no sentido do fluxo. Já na região a jusante do escoamento (região posterior da geometria), tem-se uma pressão negativa, ou seja, uma sucção, puxando a face posterior da geometria na direção do fluxo. Também observam-se pressões negativas no teto e nas laterais da edificação.

Na Figura 32, mostram-se os coeficientes de sustentação para o caso de $Re=100$ e 1000 para as duas edificações. Observa-se que o prédio de menor altura (H) sempre possui maior valor do coeficiente que o prédio de maior altura, independentemente do número de

Reynolds. Isto pode ser justificado, observando a distribuição de pressão para o plano $z = 1.5H$ na Figura 30. Observa-se que a geometria maior (2H) gera uma região de pressões negativas no teto da geometria menor altura (H), fazendo com que essas pressões se somem as pressões negativas ocasionadas pelo próprio prédio menor, induzindo portanto um coeficiente de sustentação positivo.

Figura 30 - Distribuição das pressões médias para $Re = 100$ e 1000 .

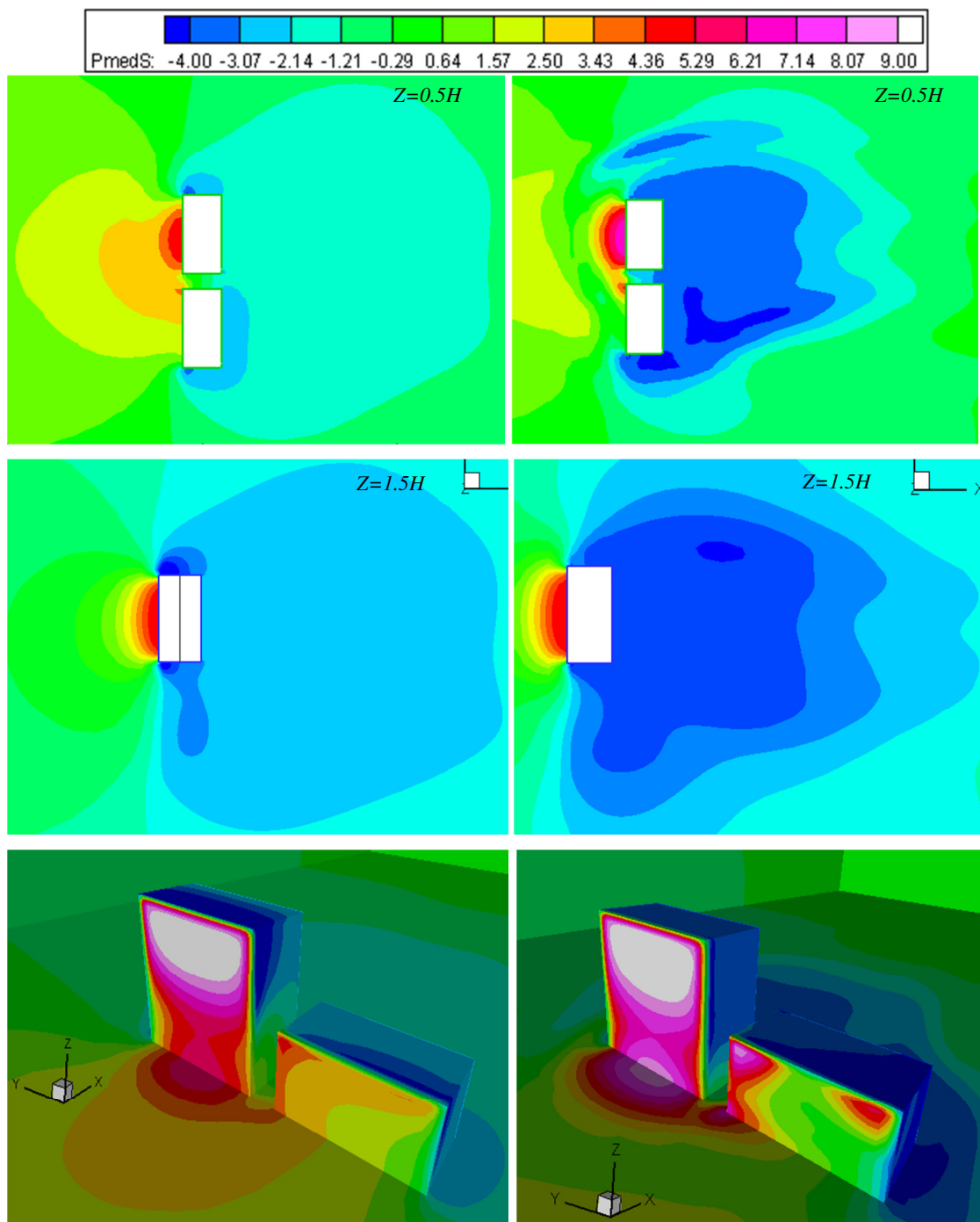
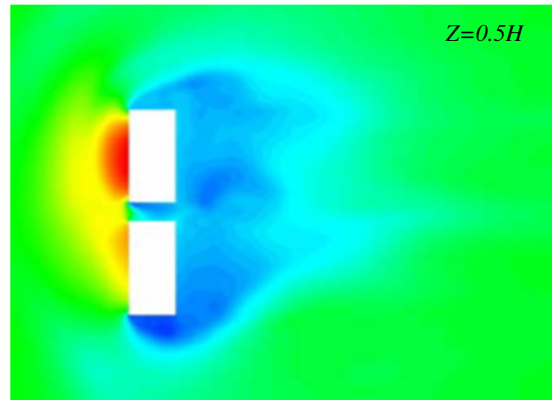
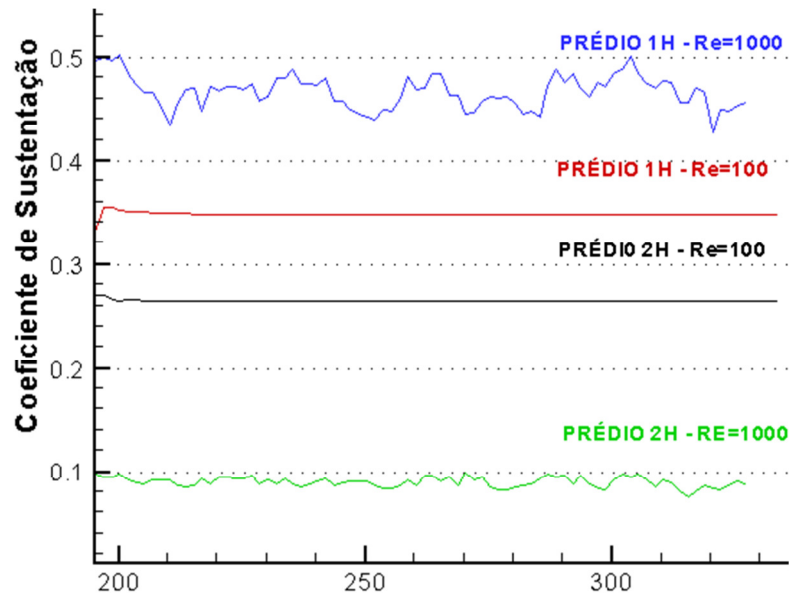


Figura 31 - Distribuições de pressões obtidas por Braun (2007).



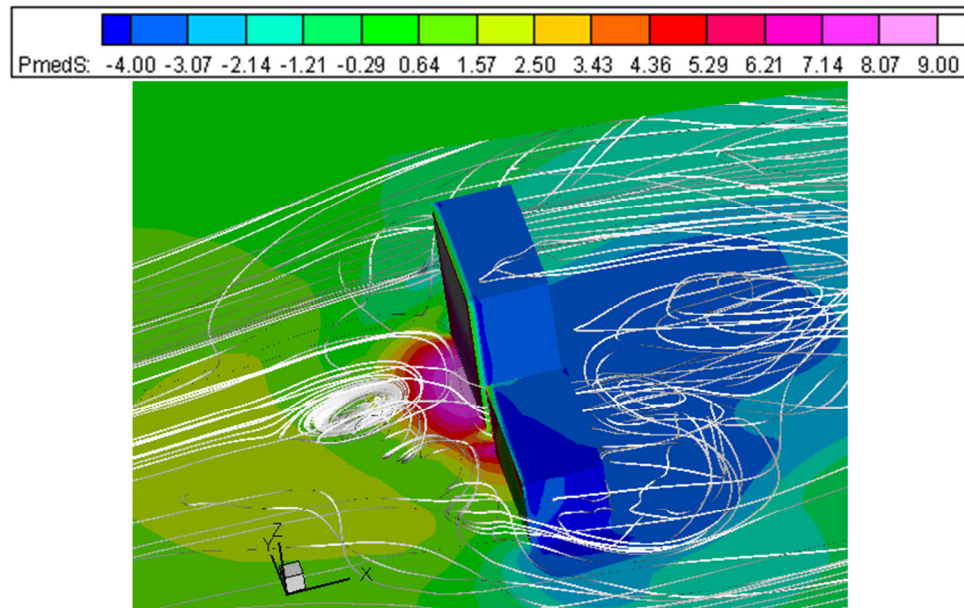
Fonte: BRAUN, 2007

Figura 32 - Variação dos coeficientes de sustentação para o caso 2H/H .



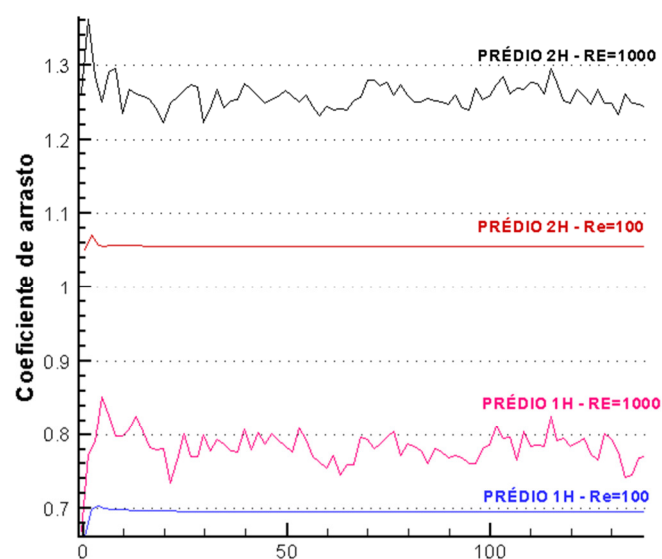
Na Figura 33, mostra-se a distribuições de pressões médias e as linhas de corrente para o caso de $Re = 1000$. Nota-se que o vórtice de base da maior edificação influencia fortemente a circulação na região frontal da edificação menor, impedindo que o escoamento atinja perpendicularmente a geometria menor, e desta forma as pressões que a mesma experimenta resultam menores.

Figura 33 - Região de recirculação na parte frontal da geometria menor.



Para ter uma análise quantitativa dos esforços experimentados pelos edifícios, na Figura 34, mostram-se os coeficientes de arrasto para os casos de $Re=100$ e $Re=1000$. Como já era esperado o prédio de maior altura sofre mais arrasto se comparado com o prédio de menor altura, isso corrobora o análises feito anteriormente, considerando as pressões a montante e jusante da geometria. Observa-se que os coeficientes de arrasto são maiores para $Re=1000$, devido a que as maiores pressões encontram-se para este caso.

Figura 34 - Variação dos coeficientes de arrasto para o caso 2H/H .



4.2.2 Prédios Paralelos com alturas diferentes para $Re=790000$

Na Figura 35 é mostrado a distribuição de velocidades médias para a situação com $Re=790000$, nota-se que as velocidades para esse Reynolds são bem maiores para os casos de $Re=100$ e $Re=1000$, assim como também no corredor que separa os dois prédios é possível observar que ocorre uma maior aceleração na velocidade se comparado com os Reynolds anteriores. Mais uma vez se explica pelos gradientes de pressão (Figura 36) serem maiores para o caso de maior Reynolds, ocasionando uma maior velocidade no interior do corredor.

Considerando-se esse corredor entre os dois prédios uma rua, alguns problemas podem ocorrer com esses aumentos bruscos de velocidade, como desconforto e até risco de insegurança para os pedestres que transitam na região entre os dois prédios, como também problemas para objetos como placas de trânsito, *outdoors*, telões, que podem ser arrancados ou seriamente danificados pela ação do vento.

Figura 35 - Distribuição das velocidades médias para $Re=790000$.

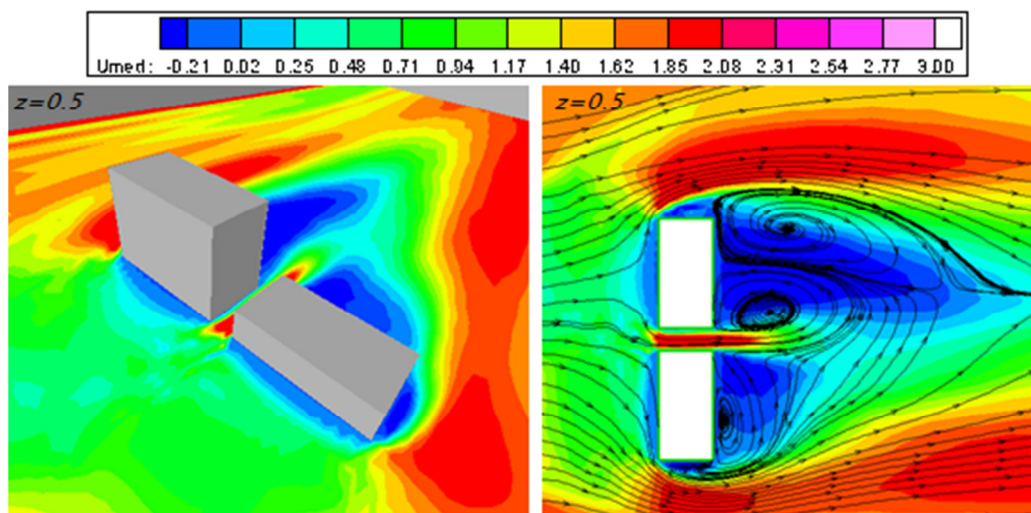
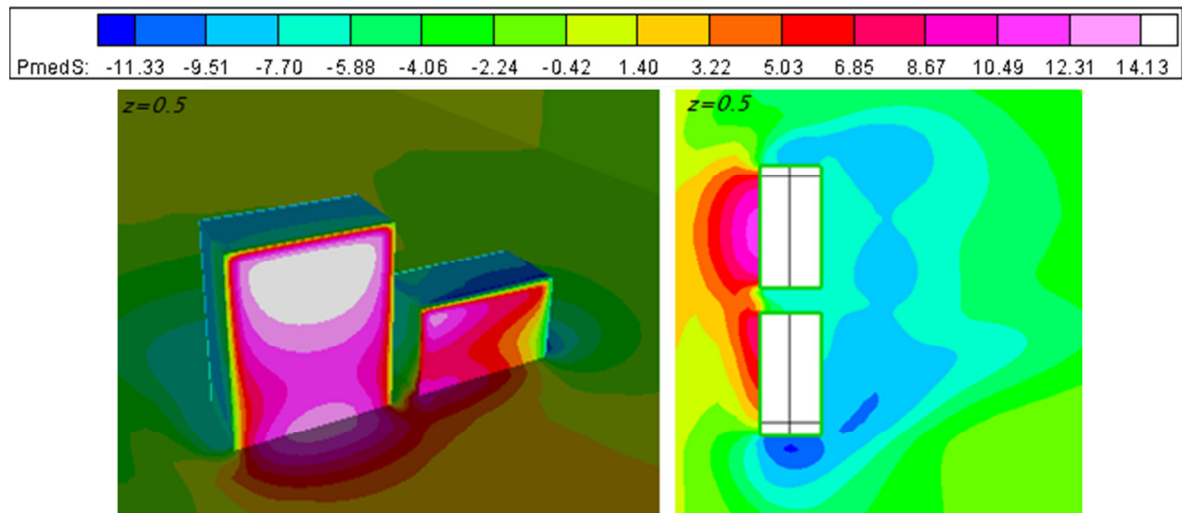


Figura 36 - Distribuição das velocidades médias para $Re=790000$.



Nas Figuras 37 e 38 é mostrado os Coeficientes de Arrasto e Sustentação para os dois prédios, para todas a situações simuladas até agora, ou seja, $Re=100$, $Re=1000$ e $Re=790000$, e na Tabela 2, os valores médios dos coeficientes de arrasto junto com os coeficientes obtidos por Braun (2007).

Figura 37 - Coeficientes de Arrasto para os dois prédios para $Re=790000$

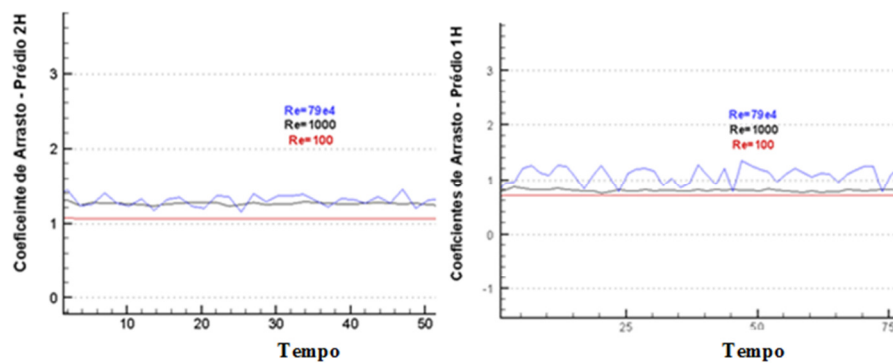


Figura 38 - Coeficientes de Sustentação para os dois prédios para $Re=790000$

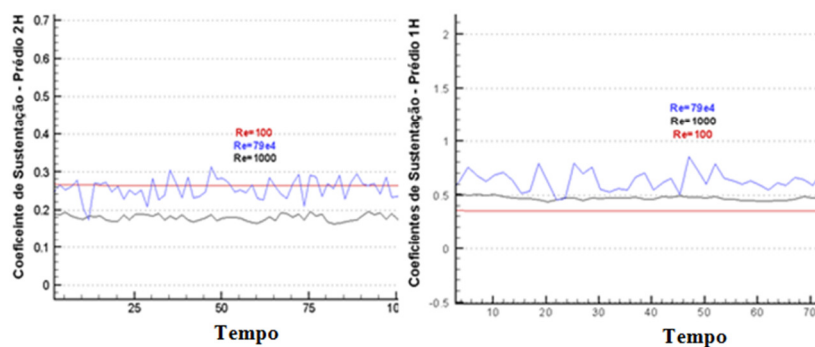


Tabela 2 - Coeficientes de Arrasto do presente trabalho e obtidas por Braun (2007).

	Braun (2007) <i>Re=790000</i>	Presente Trabalho <i>Re=100</i>	Presente trabalho <i>Re=1000</i>	Presente trabalho <i>Re=790000</i>
Prédio 2H	1.05	1.05	1.25	1.27
Prédio 1H	0.8	0.69	0.78	0.95

Na Tabela 3 são mostrados os valores médios de Coeficientes de Sustentação para os dois prédios.

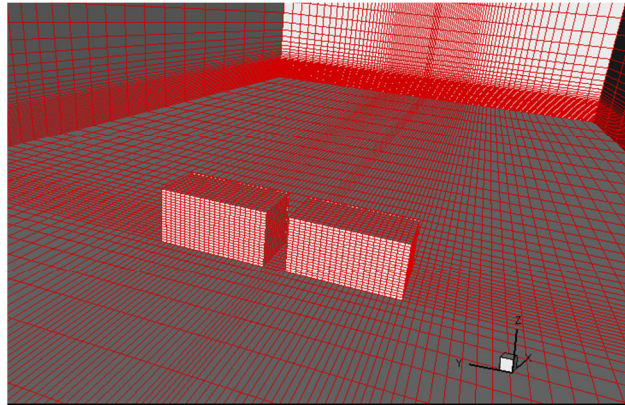
Tabela 3 - Coeficientes de Arrasto para o Caso 1 (1H/2H)

Coeficientes de Sustentação	<i>Re=100</i>	<i>Re=1000</i>	<i>Re=790000</i>
Prédio 2H	0.273	0.185	0.264
Prédio 1H	0.347	0.468	0.653

4.2.3 Prédios paralelos com mesma altura (H e H).

Neste exemplo estuda-se o escoamento ao redor de dos prédios com mesma altura (H e H) e números de Reynolds igual a 100 e 1000. Na Figura 39, mostra-se a malha de elementos hexaédricos empregados para modelar o problema. A malha consiste de 150.648 elementos hexaédricos e 161.520 nós. O domínio e as condições de contorno são as mesmas que foram utilizadas na análise do item 4.2.1, para mais detalhes ver a Figura 22.

Figura 39 - Malha hexaédrica utilizada na simulação dos prédios H e H.



Na Figura 40, mostram-se as linhas de corrente junto com as distribuições de pressão para o caso de $Re = 100$ e 1000 . Tal como acontecia no caso $2H/H$, pode-se observar a formação de uma região de recirculação à jusante da geometria, porém para este caso os pares de vórtices formados para $Re = 100$ são simétricos, o que já se esperava uma vez que o escoamento é laminar, as geometrias são iguais e estão posicionadas simetricamente.

A distribuição de velocidades médias na direção x , para o plano $z = 0.5H$, mostra-se na Figura 41. Pode-se observar uma região de velocidades negativas na parte frontal da geometria, confirmando a presença do vórtice de base, como se pode observar na Figura 41.

Figura 40 - Distribuição das pressões médias e linhas de corrente para $Re = 100$ e 1000 .

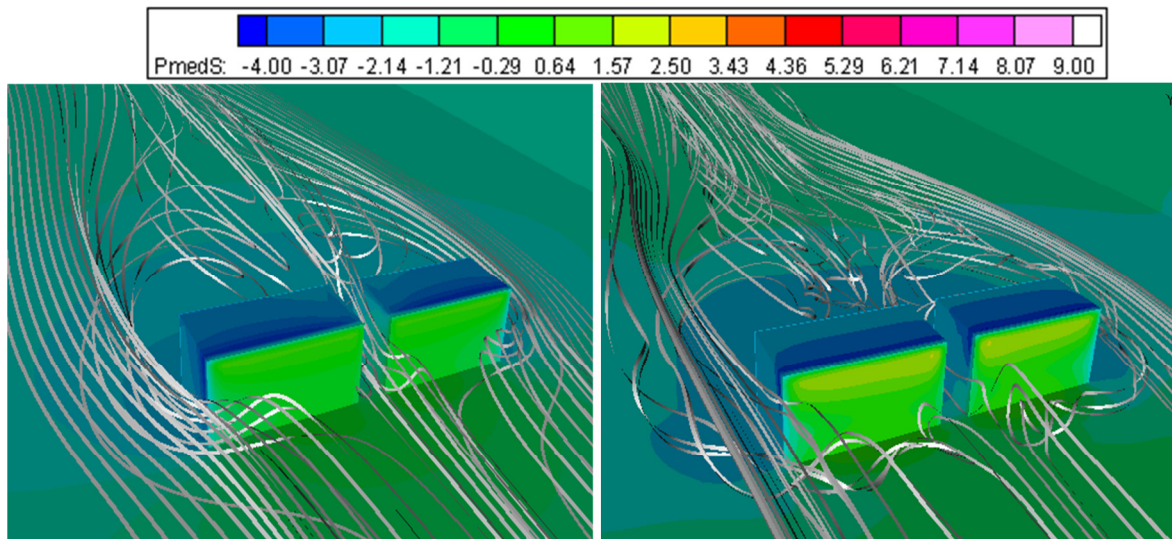
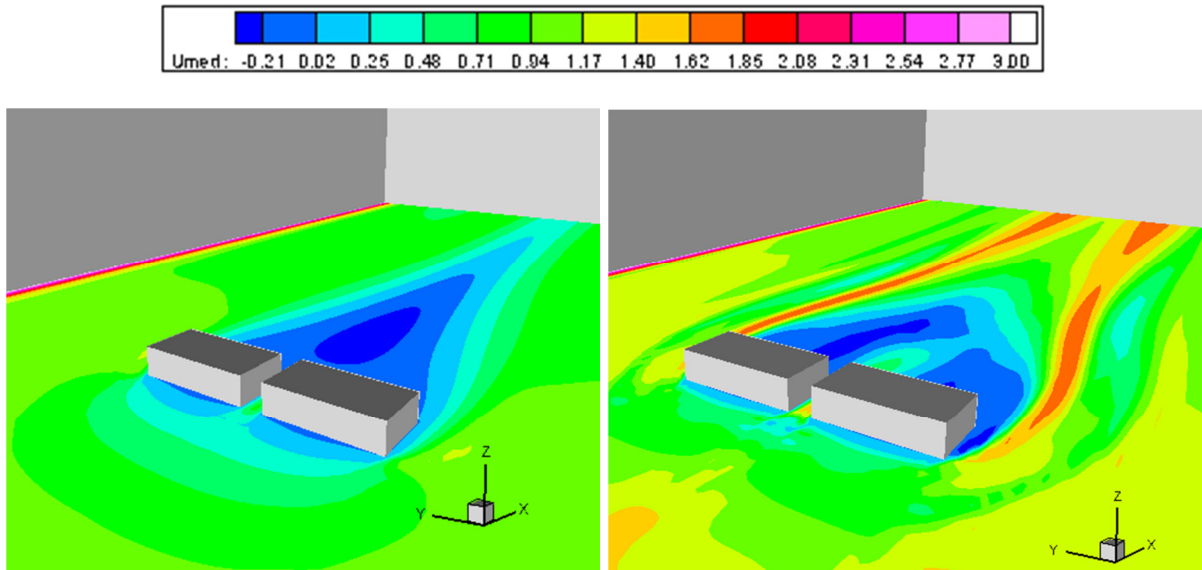


Figura 41 - Distribuição das velocidades médias (V_x) para $Re = 100$ e 1000 no plano $z=0.5H$.



Assim como no caso dos prédios com alturas diferentes ($2H/H$), neste caso também existe uma divisão do escoamento na região frontal da geometria. O ponto de estagnação está localizado para uma altura de aproximadamente $0,75H$ para os dois número de Reynolds analisados. O valor é o mesmo que foi achado para o caso dos prédios com altura diferente.

Detalhes do vórtice de base podem ser observados tridimensionalmente na Figura 40 e no plano central do prédio na Figura 42. Na Figura 43, apresenta-se o vórtice de base obtido num análise experimental. Pode-se ver que existe uma grande semelhança com o vórtice de base obtido numérica para $Re=1000$, estando presentes dois vórtices na região frontal da geometria.

Figura 42 - Ponto de estagnação para $Re = 100$ e 1000 para o caso H/H .

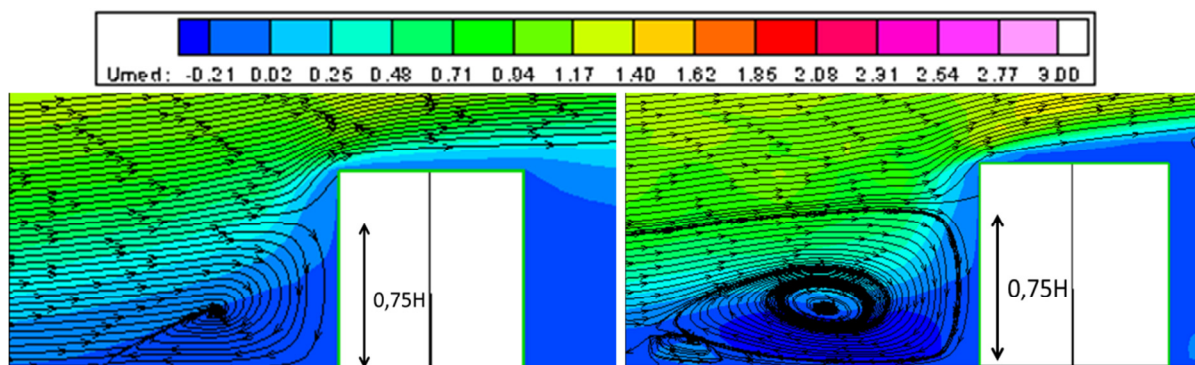
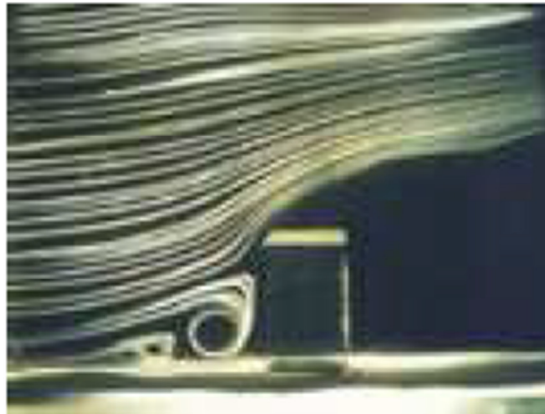


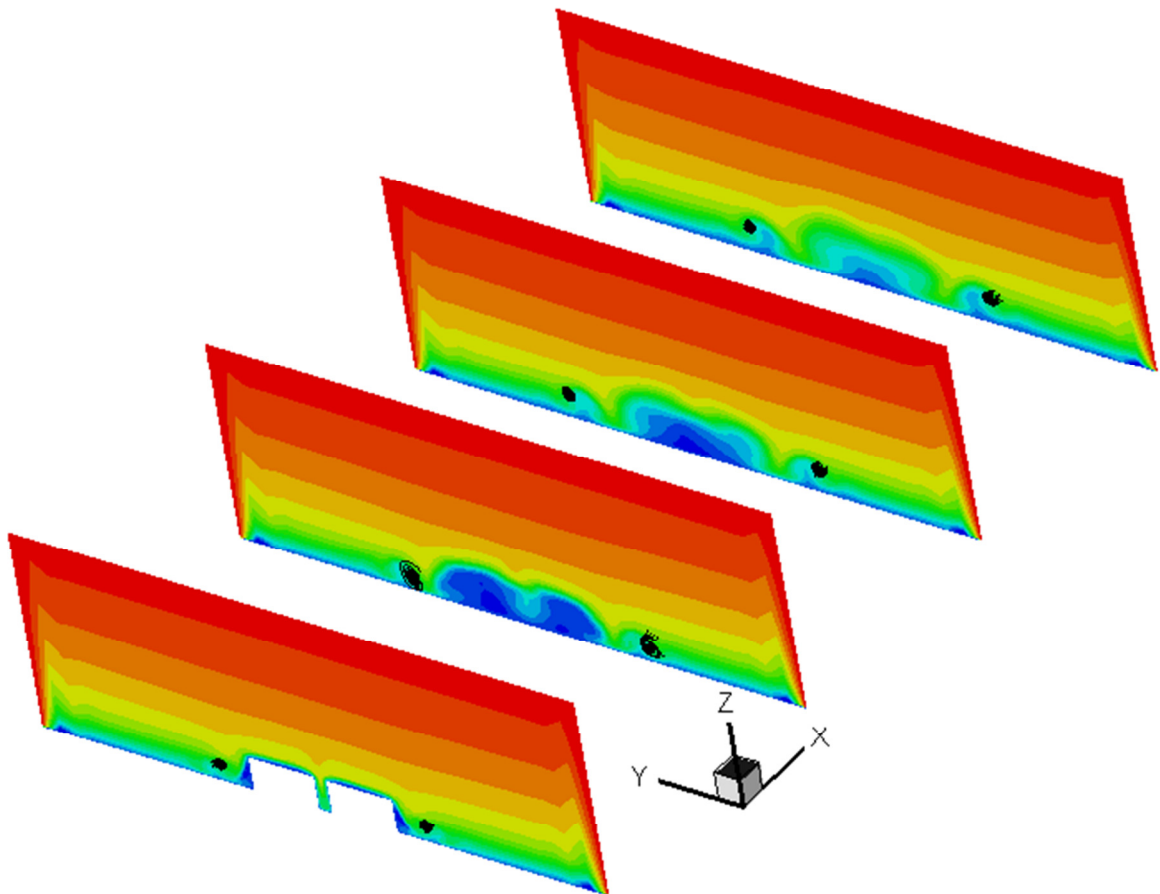
Figura 43 - Formação do vórtice de base em análise experimental.



Fonte: SILVA, 2006.

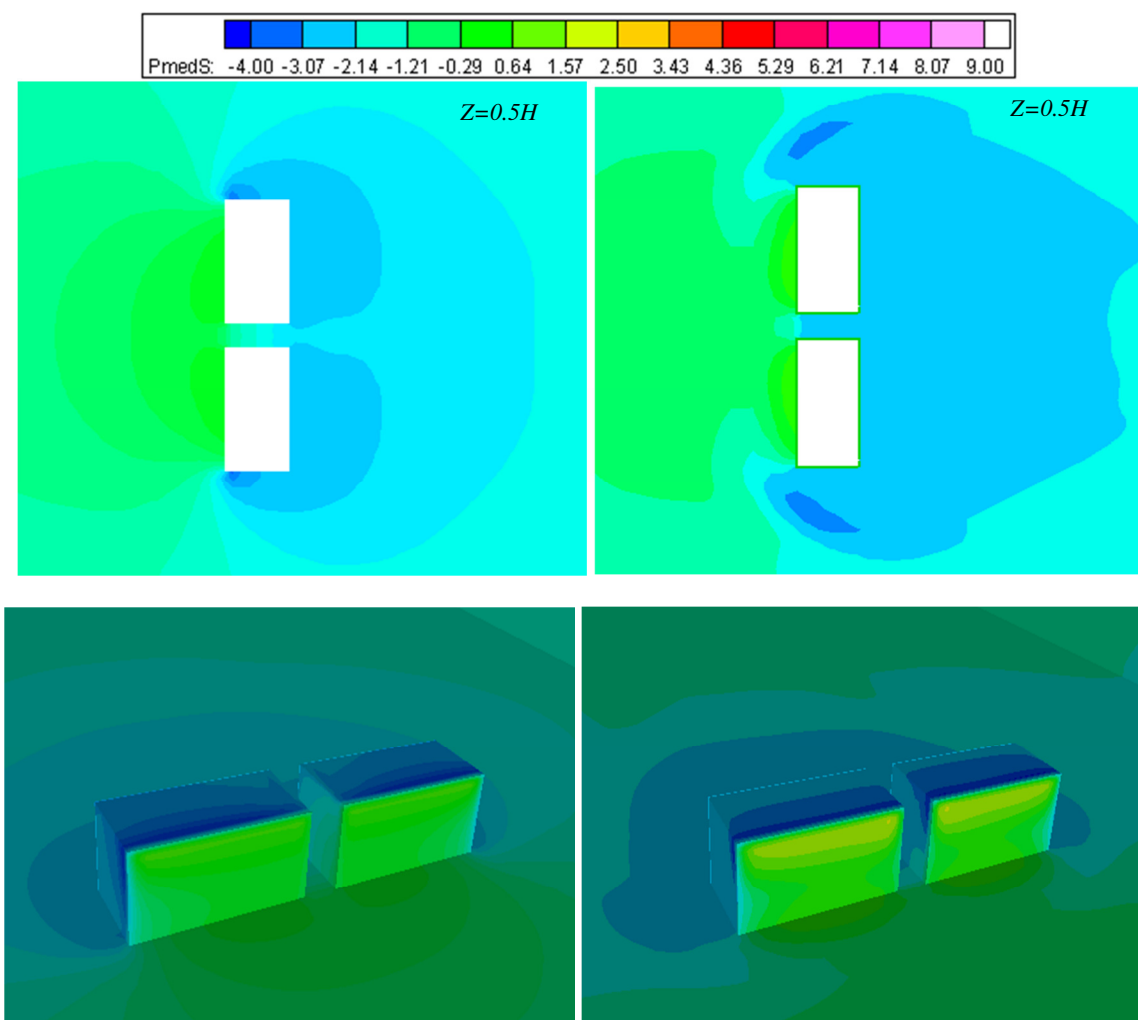
Na Figura 44, mostra-se a distribuição de velocidade na direção x e os vórtices de base no plano $y=4,25$. Pode-se notar que diferentemente do caso dos prédios de duas alturas ($2H/H$), ocorre a formação de apenas dois vórtices relativamente simétricos.

Figura 44 - Vórtices de base no plano $y = 4,25$ para $Re=1000$.



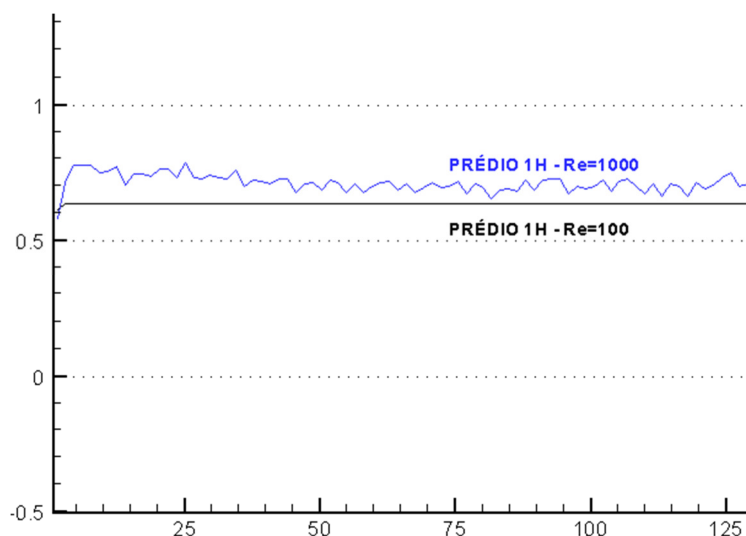
Na Figura 45, mostram-se as distribuições de pressões para os dois números de Reynolds analisados. Devido à simetria e semelhança geométrica das edificações, as pressões são iguais nas duas geometrias, ficando em evidência o quanto pode interferir a presença de edificações vizinhas. Isto fica mais evidente observando a interferência da edificação maior sobre a menor no caso 2H/H.

Figura 45 - Distribuição das pressões médias para $Re = 100$ e 1000 .



Os coeficientes de arrasto para o caso H/H e as situações de $Re=100$ e 1000 , são mostrados na Figura 46. Os coeficientes dos dois prédios para as duas situações ($Re=100$ e 1000) são praticamente idênticos, ou seja, a edificação da esquerda e da direita sofrem o mesmo arrasto. Assim como no caso 2H/H os maiores coeficientes de arrasto encontram-se para o maior número de Reynolds.

Figura 46 - Coeficientes de arrasto para prédios de mesma altura - $Re = 100$ e 1000 .



Na Tabela 4, mostram-se os coeficientes de arrastos médios para o prédio de menor altura (H) obtido nos casos $2H/H$ e H/H . Pode-se observar que os coeficientes de arrasto são ligeiramente maiores para o caso de alturas diferentes ($2H/H$), consequência das maiores pressões sofridas pela menor geometria na primeira situação.

Tabela 4 - Coeficientes de arrasto para o prédio menor (H) nos casos $2H/H$ e H/H .

Coeficiente de arrasto	$Re=100$	$Re=1000$
Caso 1 ($2H/H$)	0.69	0.78
Caso 2 (H/H)	0.61	0.71

Na Figura 47, mostram-se os coeficientes de sustentação para o caso H/H e números de Reynolds igual a $Re=100$ e 1000 . Na Tabela 5, mostram-se os coeficientes de sustentação médios para o prédio de menor altura (H) obtido nos casos $2H/H$ e H/H . Pode-se observar que os coeficientes de sustentação são maiores para o caso de alturas diferentes ($2H/H$). Uma possível explicação deste comportamento pode ser dada observando a Figura 45, onde pode-se ver que as pressões negativas no topo das geometrias são menores, em módulo, se comparadas com as pressões da menor geometria da análise $2H/H$. Ou seja, o prédio maior induz uma redução da pressão no topo da geometria menor (H) em comparação com o caso H/H .

Figura 47 - Coeficientes de Sustentação.

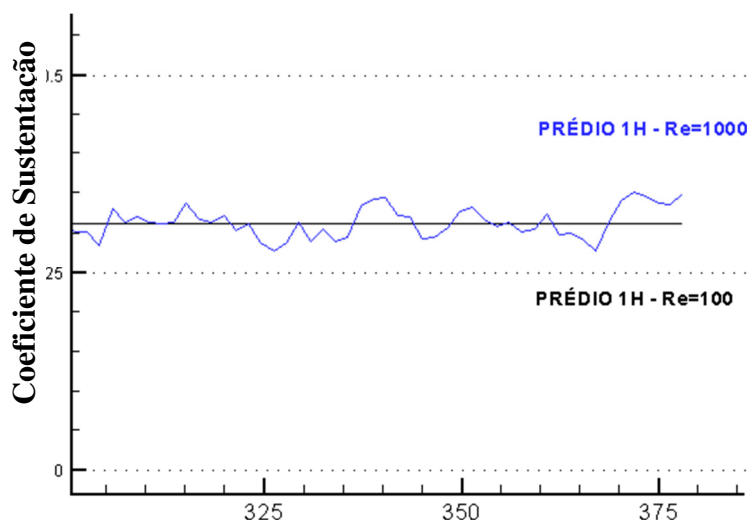


Tabela 5 - Coeficientes de sustentação para o prédio menor (H) nos casos 2H/H e H/H.

Coeficientes de Sustentação	<i>Re=100</i>	<i>Re=1000</i>
Caso 1 (2H/H)	0.347	0.468
Caso 2 (H/H)	0.32	0.321

4.3 Prédios Paralelos para Reynolds 790.000 com diferentes modelos de turbulência.

Neste caso, estuda-se o escoamento ao redor dos prédios paralelos considerando um número de Reynolds igual a $Re = 790.000$. Para este caso foram realizadas duas simulações, na primeira considera-se o modelo de turbulência de Smagorinsky clássico e no segundo emprega-se o modelo de Smagorinsky dinâmico. Com este exemplo, pretende-se comparar como as distribuições das principais variáveis do problema e os coeficientes aerodinâmicos são afetados pelos dois modelos de turbulência.

A malha de elementos finitos, o domínio e as condições de contorno são as mesmas que foram utilizadas na análise do item 4.2.3. Adota-se para a constante de Smagorinsky o valor igual a 0.10 (Bono et. al, 2011).

Na Figura 48, mostram-se as distribuições de pressão e as linhas de corrente sobre as geometrias para os modelos de Smagorinsky clássico e dinâmico, respectivamente.

Entretanto, a distribuição de pressão para o plano $z = 0.25H$ mostra-se na Figura 49. Pode-se observar que tanto a topologia do escoamento como a distribuição de pressão apresentam uma grande similaridade, porém as pressões são ligeiramente maiores para o modelo de Smagorinsky dinâmico. Isto, também pode ser verificado no gráfico dos coeficientes de arrasto para os dois modelos de turbulência (ver Figura 50).

Figura 48 - Distribuição das pressões médias e linhas de corrente para $Re=790000$ com modelo de Smagorinsky clássico e dinâmico.

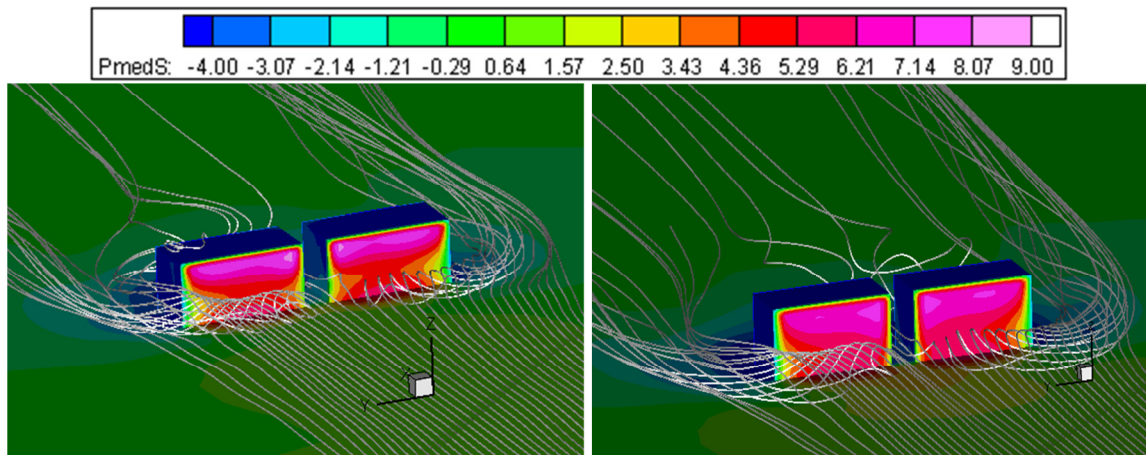
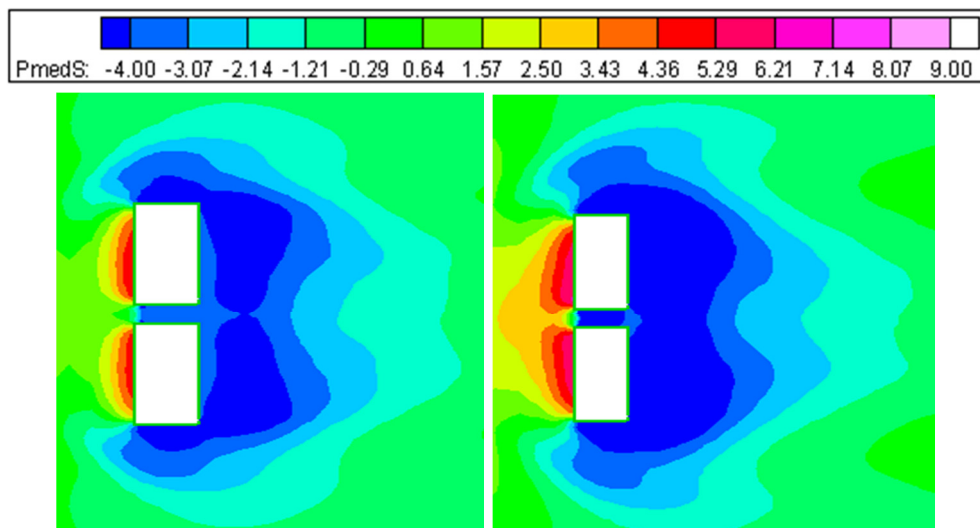
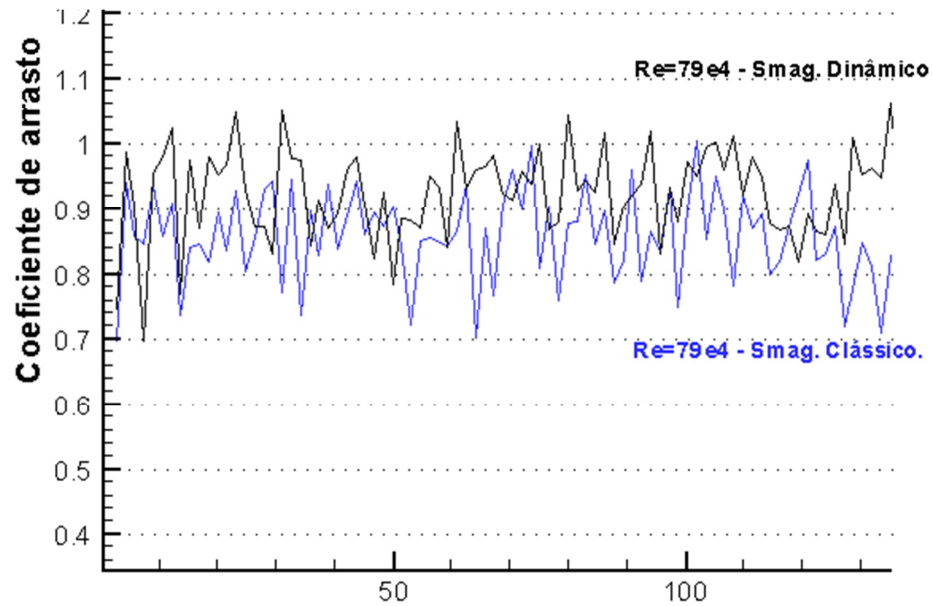


Figura 49 - Distribuição de pressões médias ($z=0.5H$) para $Re=790.000$ com modelo de Smagorinsky clássico e dinâmico.



Assim como com as pressões, os coeficientes de arrasto para o caso do modelo de turbulência de Smagorinsky dinâmico resulta ligeiramente maior em comparação com o modelo de Smagorinsky clássico.

Figura 50 – Coeficientes de arrasto para os modelos de Smag. Clássico e Dinâmico.



Nas Figuras 51 e 52, são mostradas as distribuições de velocidades médias (V_x) no plano $z = 0.5H$ para os dois modelos de turbulência e para os números de Reynolds 100 e 1000 . Nota-se que nos casos de $Re=790.000$ ocorre a formação de dois pares de vórtices (4 vórtices), dois atrás de cada edificação, uma parte formada pelo escoamento advindo das laterais e outra parte formada pelo escoamento que vem do corredor que divide as duas geometrias, o que não ocorre para o caso de $Re=100$, onde existe apenas um par de vórtices. Provavelmente isso ocorre porque as diferenças de pressões são bem maiores para os números de Reynolds mais altos, de forma que, para $Re=100$, apenas a recirculação do escoamento advindo das laterais seja suficiente para tentar equilibrar essas diferenças de pressões.

Para o número de Reynolds igual a 7.9×10^5 , pode-se observar a semelhança tanto na topologia do escoamento quanto nos valores de velocidade para os dois modelos de turbulência empregados. Porém é possível notar que no modelo de Smagorinsky dinâmico a velocidade na região que divide os dois prédios (corredor), e nas proximidades da camada cisalhante é consideravelmente maior em comparação com o modelo de Smagorinsky clássico.

Figura 51 - Distribuição da componente velocidade média (V_x) junto com as linhas de corrente para os modelos de Smag. Clássico e Dinâmico ($Re=790.000$).

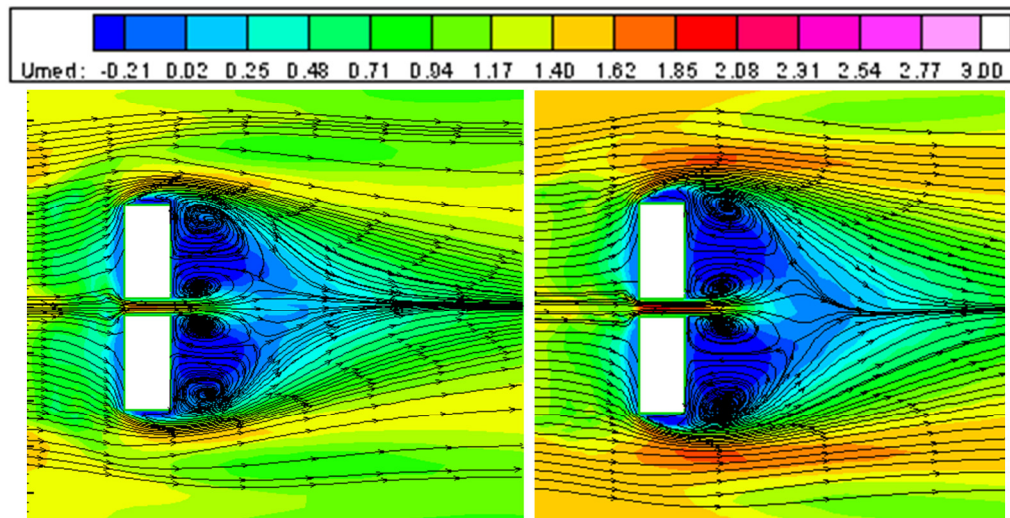
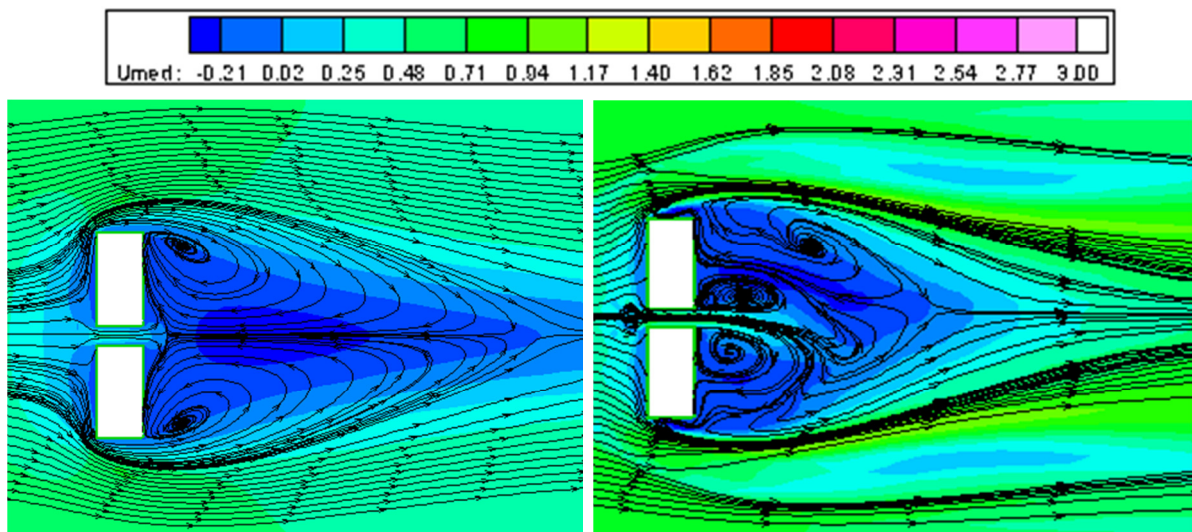
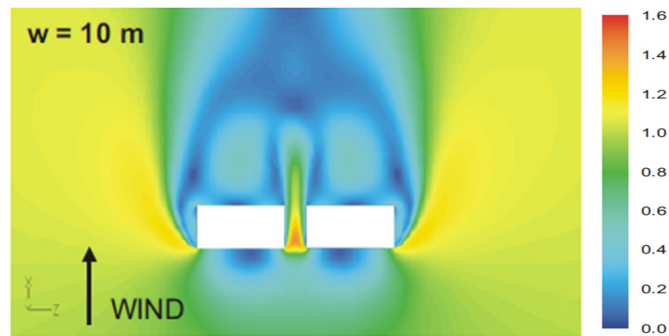


Figura 52 - Distribuição da componente velocidade média (V_x) junto com as linhas de corrente para os casos de prédio de mesma altura ($Re=100$ e 1000).



Na Figura 53, mostra-se o campo de velocidade médio obtido por Bolcken (2007). Pode-se observar, que existe uma boa concordância com os resultados obtidos na presente simulação, embora o espaçamento entre os prédios no trabalho de Blocken seja $H/4$.

Figura 53 - Distribuição de velocidades médias obtidas por Blocken (2007).



Na Figura 54 e 55 é mostrado os Coeficientes de Arrasto e Sustentação para o *Caso 2* (H/H), para todas as situações analisadas, ou seja, com $Re=100$, $Re=1000$, $Re=79e4 - Smag. Clássico$, $Re=79e4 - Smag. Dinâmico$, e na Tabela 6 são mostrados os valores médios dos respectivos coeficientes.

Figura 54 - Coeficientes de Arrasto para o Caso 2H.

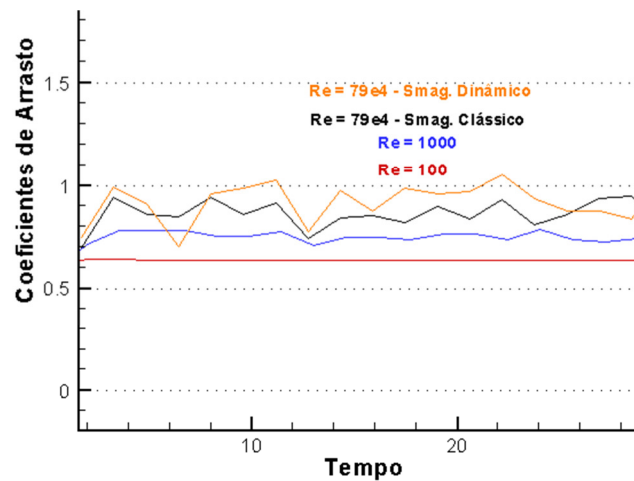


Figura 55 - Coeficientes de Sustentação para o Caso 2 (H/H).

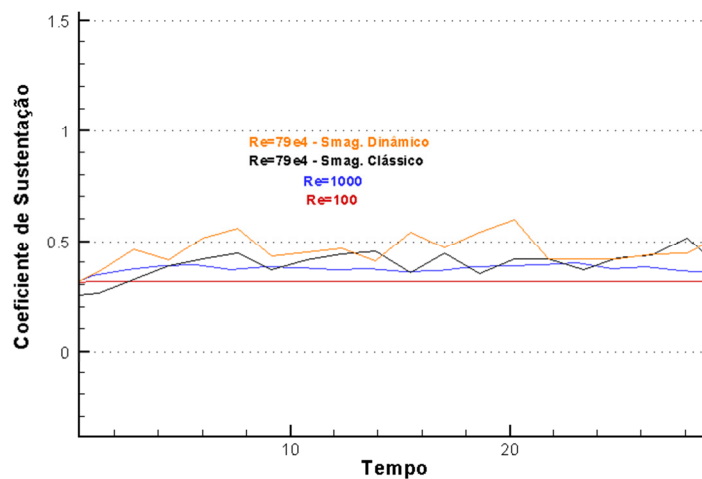


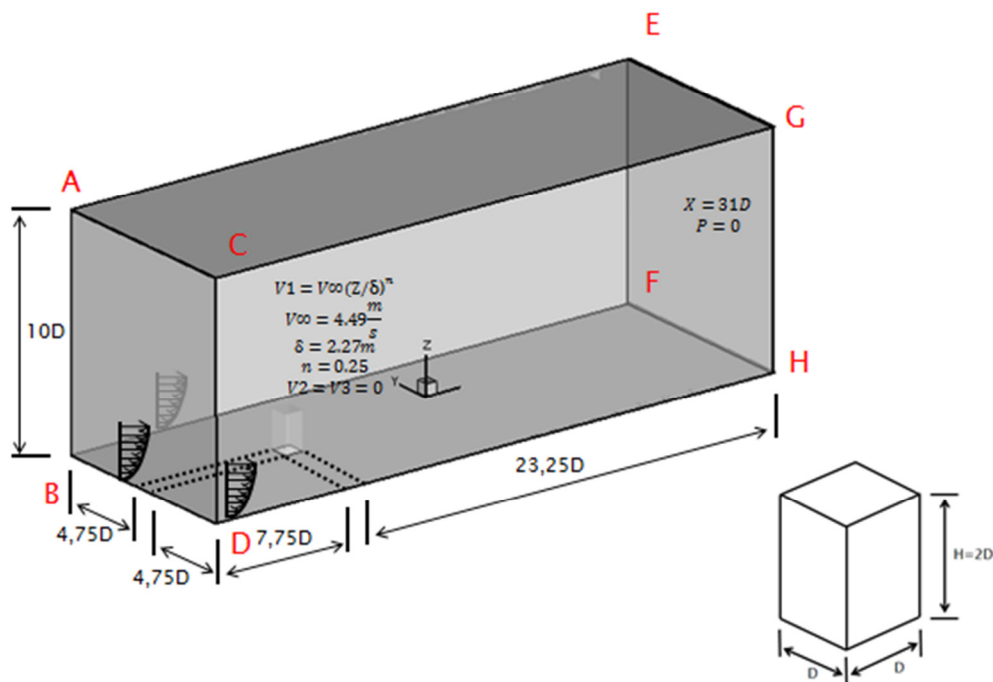
Tabela 6 - Coeficientes médios para o Caso 2 (H/H).

	<i>Re=100</i>	<i>Re=1000</i>	<i>Re=790000</i> <i>Smag. Clássico</i>	<i>Re=790000</i> <i>Smag. Dinâmico</i>
Coef. de Arrasto	0.69	0.78	0.88	0.94
Coef. de Sustentação	0.347	0.468	0.48	0.491

4.4 Prédio com proporções 1:1:2

Neste caso foi estudado uma geometria com formato de cilindro quadrado com proporções 1:1:2. Esse formato é bastante comum nas edificações residenciais, além de ser um modelo usualmente estudado e simulado na Dinâmica de Fluidos Computacional, como em Tominaga et. al. (2008). Na Figura 56 é mostrado o domínio utilizado na simulação junto com as condições de contorno utilizadas.

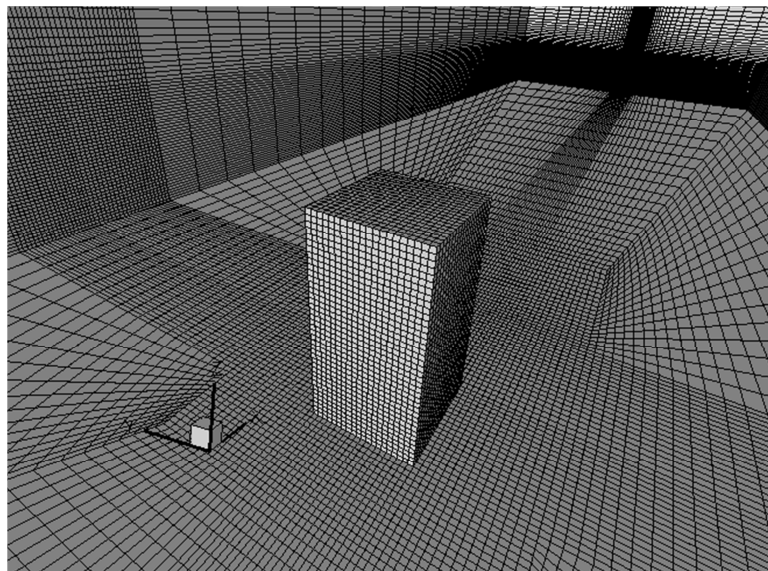
Figura 56 - Domínio e Condições de contorno utilizados na simulação.



Nos planos ABCD, ABEF, e CDGH é colocado o perfil de velocidade de acordo com a equação indicada na Figura X. No plano BDFH, e na superfície do prédio são descritas velocidade $(0,0,0)$ e no plano EFGH, é imposto uma pressão de referencia com valor $(0,0,0)$.

Na Figura 57 é mostrado a malha utilizada, de mesma forma que para as análises anteriores foi utilizada uma malha hexaédrica de 8 nós totalmente estruturada. A quantidade de elementos foi de 687.000, e o número de nós de 707.512.

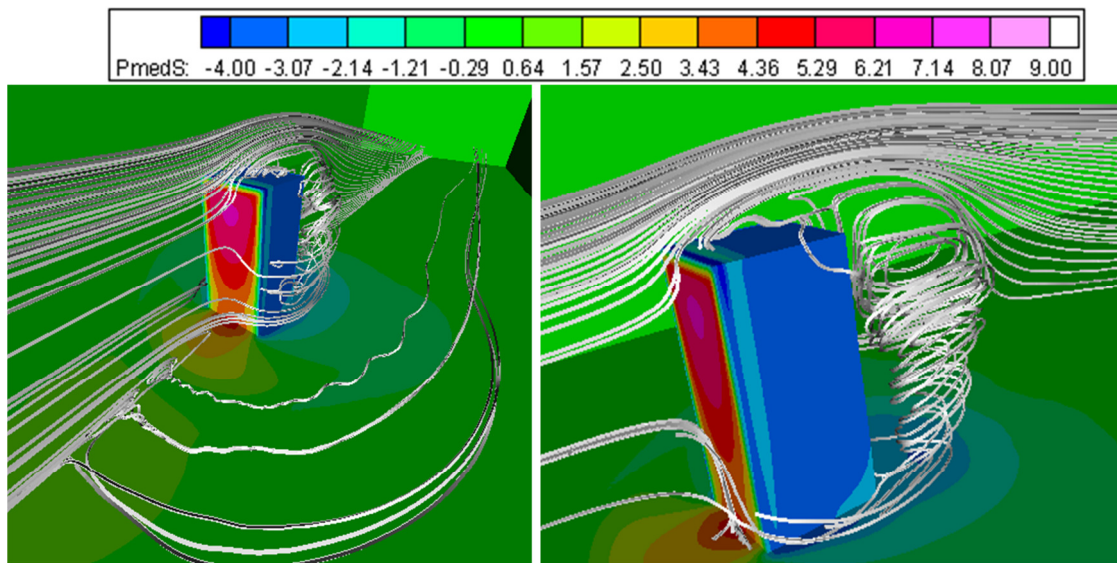
Figura 57 - Malha Hexaédrica utilizada na Simulação.



Na Figura 58 é mostrado as distribuições médias de pressão junto com as linhas de corrente. É possível notar a formação de dois vórtices de base que se desprendem da região frontal de circulam em direção jusante a geometria. Além de se observar a região de recirculação a jusante da geometria.

Com as distribuições de pressão é possível observar, que assim como nos casos anteriores, a geometria experimenta pressões positivas na região frontal e negativa nas laterais e na região posterior. Ainda como nos casos anteriores, as pressões são maiores a medida que a região da geometria é mais alta.

Figura 58 - Distribuição de pressões médias com linhas de corrente.



Na Figura 59 é mostrado em um corte no plano de simetria do prédio ($y=0$) as linhas de corrente junto com a distribuição de velocidades médias (V_x). Nota-se que assim como nos casos anteriores que o ponto de estagnação é aproximadamente $0,75H$. Na Figura 60 foi feito um corte em $z=1$ [m], observa-se a formação de um par de vórtices contrarrotativos simétricos, também foi possível captar a formação de um pequeno vórtice nas laterais esquerda e direita da geometria.

Figura 59 – Distribuição das velocidades médias e linhas de corrente em corte $y=0$.

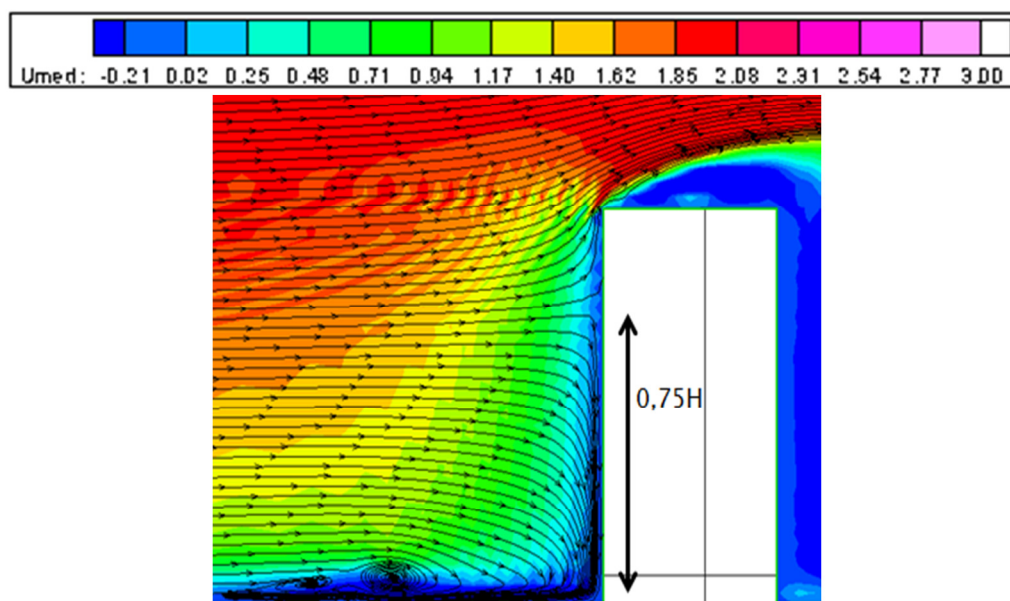
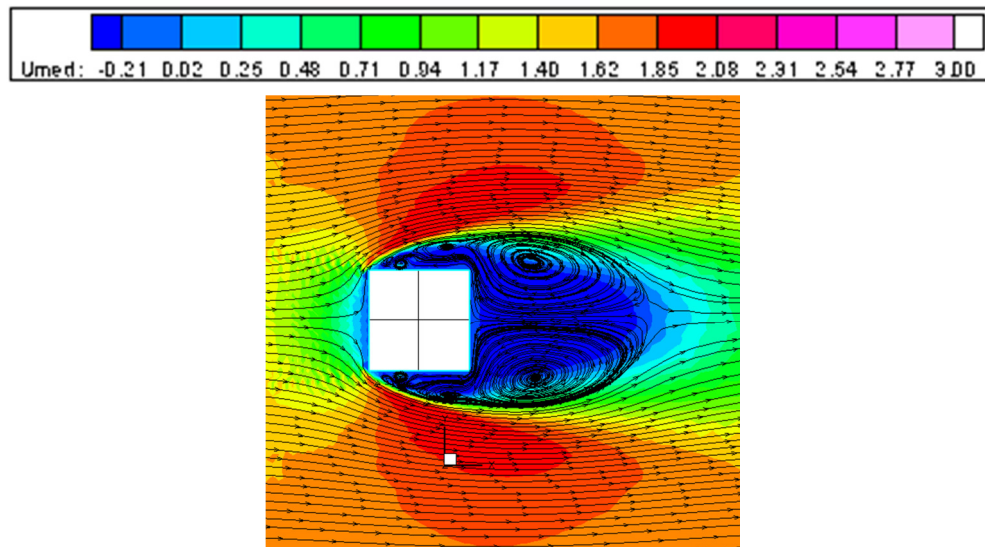
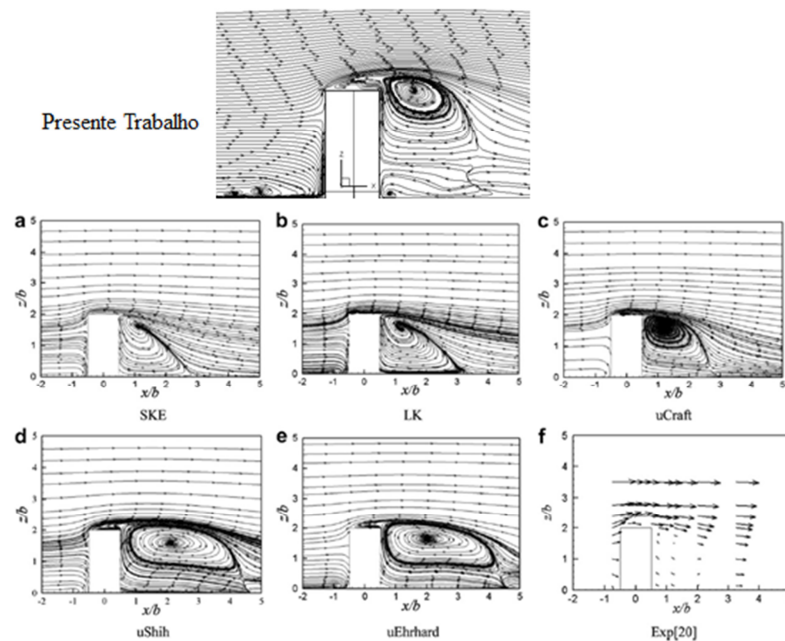


Figura 60 - Distribuição das velocidades médias e linhas de corrente para um corte em $z=1$.



Mais abaixo na Figura 61, é mostrada a topologia do escoamento da região de recirculação a jusante da geometria com linhas de corrente, e comparada com outros modelos de turbulência encontrados na literatura. É possível observar que de forma geral a formação da região de recirculação tem uma variação significativa entre os diversos modelos de turbulência mostrados, apesar disso é possível observar certa semelhança entre o presente trabalho, onde se utilizou Smag. Clássico, e o modelo de uCraft.

Figura 61 - Comparação entre o modelo de turbulência do presente trabalho e outros modelos de turbulência.



FONTE: Tominaga et. al. (2008)

Na Tabela 7 é mostrado os valores de X_f , que é o comprimento domínio em x (ver Figura 62) tomado pela região de recirculação mostrado na Figura 61. O valor encontrado foi medido é comparado com outros modelos de turbulência existentes. Observou-se uma grande proximidade entre os valores obtidos e os dos outros modelos de turbulência.

Figura 62 - Distância X_f

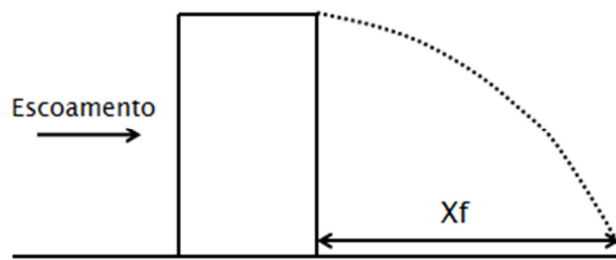


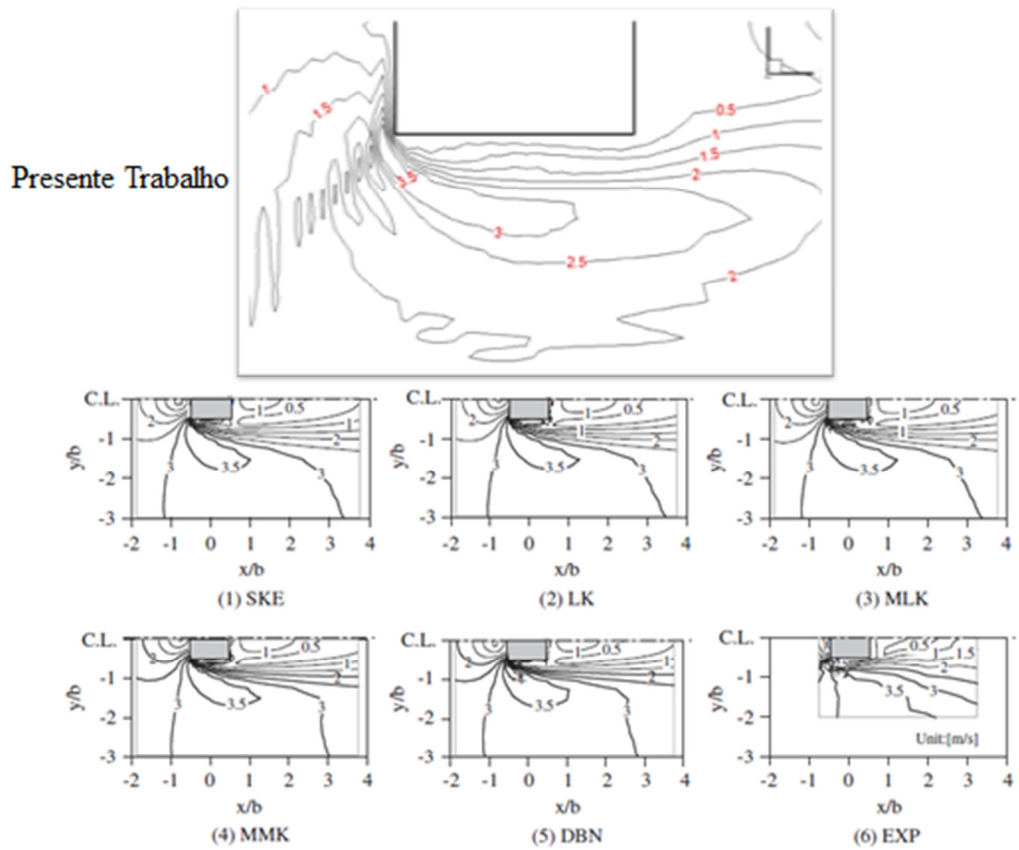
Tabela 7 - Comparativo entre distancias X_f .

Caso	Modelo de Turbulência	X_f
Presente Trabalho	Smag. Clássico	2,38
SKE	Standart K-E	2,4
LK	LK Model	2,75
Craft	Craft Model	2,5

FONTE: Tominaga et. al. (2008)

Na Figura 63 têm-se as magnitudes de velocidades em um plano $z=0.0625$, também junto com as magnitudes de outros modelos de turbulência. Nota-se que o caso deste trabalho apresenta velocidades consideravelmente menores que os outros casos. Um maior refinamento da malha na região da superfície da geometria poderia melhorar os resultados trazendo velocidades mais próximas dos modelos comparados. Como foi visto no tópico 4.3, o modelo de Smag. Dinâmico traz velocidades maiores que o caso de Smag. Clássico, assim a utilização do modelo de turbulência Dinâmico também poderia trazer resultados mais próximos ao dos modelos mostrados.

Figura 63 - Comparativo entre as Magnitudes de velocidades médias.



FONTE: Tominaga et. al. (2008)

5 Conclusões

A quantificação da ação do vento sobre as estruturas e, em particular sobre duas edificações próximas, engloba conhecimentos da Engenharia do Vento, sendo portanto estabelecidas neste trabalho algumas noções acerca desta matéria que visam facilitar a compreensão de conceitos essenciais para quem se inicia no estudo desta área.

Com as simulações realizadas foi possível analisar os principais fenômenos que ocorrem em modelos tridimensionais de corpos rombudos imersos em um fluido em movimento. A ferramenta utilizada mostrou-se bastante eficiente na captação das principais variações que ocorreram no escoamento, tais como: variações de velocidades, formação de vórtices, gradientes de pressão, etc.

Observou-se como as principais variáveis se distribuem ao longo da geometria, e como a mesma podem variar em função das mudanças geométricas e do número de Reynolds. Através dos coeficientes de arrasto e de sustentação foi possível observar de forma quantitativa como os esforços sobre as edificações variam. Procurou-se sempre encontrar explicações para os fenômenos ocorridos, baseando para isso nos princípios básicos da Mecânica dos Fluidos.

Por fim, no caso de escoamentos turbulentos, dois modelos de submalha foram testados: o modelo de Smagorinsky clássico e o modelo dinâmico. Para os casos analisados, verificou-se que o modelo de Smagorinsky dinâmico sempre gera valores de velocidades e pressões ligeiramente superiores aos obtidos com o modelo de Smagorinsky clássico.

Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: **Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zonamento Bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** - Rio de Janeiro, 2005.
- BLOCKEN, B., CARMELIET, J., STATHOPOULOS, Y. et al. **CFD evaluation of Wind speed conditions in passages between parallel buildings – Effect off wall-fuction roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow.** 2007.
- BONO, G.; BONO, G.F.F.; AWRUCH, A.M. **Simulação Numérica de um Corpo Rombudo em Escoamentos Compressíveis.** Anais do Congresso da Associação Argentina de Mecânica Computacional – Argentina, 2011. pp. 1413 – 1422.
- BONO, G., LYRA, P.R.M. e BONO, G.F.F. **Simulação em escoamentos incompressíveis através do Método dos Elementos Finitos,** Anais Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica, v. 1, p. 721-733, Porto – Portugal, 2011.
- BONO, G.; LYRA, P.R.M.; BONO; G.F.F. **Simulação numérica de escoamentos incompressíveis com Simulação de Grandes Escalas,** Mecânica Computacional, XXX: 1423-1440, 2011.
- CABRAL, N.C.; BONO, G.; BONO, G.F.F. **Estudo paramétrico de dispositivos de controle passivo de Vibrações Induzida por Vórtices,** Mecânica Computacional, XXXI: 69-84, 2012.
- BRAUN, A. L. **Simulação Numérica na Engenharia do Vento incluindo efeitos de interação Fluido-Estrutura.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS – Rio Grande do Sul, 2007.
- BRAUN, A.L e AWRUCH, A.M. **Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tal building model using numerical simulation.** Computers & Strcutures. Vol. 87.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos.** – 2 ed. rev. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- CHORIN A.J. **A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems,** J. Comput. Physics, vol. 2. pp. 12-26, 1967.

D. FARIVAR., "Turbulent uniform flow around cylinders of finite length", AIAA Journal, Vol. 19, No. 3, pp. 275-281, 1981.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos e Aplicações.** – 1 ed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

MURAKAMI, S. **Current Status of Computational Wind Engineering.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990.

NASCIEMENTO, V. do N. **Emprego da Engenharia do Vento Computacional em moradias populares.** Relatório Final de Iniciação Científica - FACEPE, 2015.

NASCIMENTO, V. do N. e BONO. G. **Estudo da Aerodinâmica de Edificações empregando a Dinâmica dos Fluidos Computacional.** Trabalho apresentado no 1 Workshop Norte-Nordeste de CFD aplicado a Engenharia e Ciências correlatas, Campina Grande, Paraíba, 2015.

OKAMOTO, T., YAGITA, M. **The experimental investigation on the flow past a circular cylinder of finite length placed normal to the plane surface in a uniform stream.** Bull JSME, 1973.

PICCOLI, G. L. **Análise Numérica na Engenharia do Vento Computacional empregando Computação de Alto Desempenho e Simulação de Grandes Escalas.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS – Rio Grande do Sul, 2009.

PINHEIRO, R.F. **Efeitos aerodinâmicos do Vento sobre Edificações.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco – Pernambuco, 2015.

POSNER, J.D.; BUCHANAN, C.R.; DUNN-RANKIN, D. **Measurement and prediction of indoor air flow in a model room.** - Revista Energy and Buildings vol. 35. pp. 515 – 526, 2003.

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

RATNAM, Seeta G.; VENGADESAN, S. **Performance of two equation turbulence models for prediction of flow and heat transfer over a wall mounted cube.** Publicação em International Journal of Heat and Mass Transfer 51 – 2007. pp. 2834 – 2846.

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

SAKAMOTO, H., OIWAKE, S. **Fluctuating forces on a rectangular prism and circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer.** J Fluid Mech, 1983.

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

SILVEIRA, N. A. **Turbulência.** - vol. 1 – Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, M. C., **Estudo do escoamento a montante de um cilindro fixado perpendicularmente a um fundo plano.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

SIMIU, E.; SCANLAN, R.H. **Wind Effects on Structures.** – 2 ed. - Nova York: John Wiley & Sons, 2007.

SOARES, R.C.A., BONO, G. **Estudo numérico do escoamento ao redor de um cilindro circular de comprimento finito.** Trabalho apresentado no 1 Workshop Norte-Nordeste de CFD aplicado a Engenharia e Ciências correlatas, Campina Grande, Paraíba, 2015.

L. SUMEI, L. JUNJIE, Q. YANG, P. JINGJING, L. DAYI, C. XIAODONG, C. JIANGYUE, Z CHAOBIN . **Coupled simulation of natural ventilation and daylighting for a residential community design.** The 2nd International Conference on Building Energy and Environment Elseiver, 2013. Pp. 686 – 695.

SUMNER, D., DANSEREAU O.J.P., HESELTINE, J.L. **Vortex Shedding from a finite Circular Cylinder of small aspect ratio.** Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering Forum 2004 - CSME Forum 2004, London, Canada, pp. 625-633, Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan – Canadá, 2004.

TOASSI, T. L. M. **Análise de esforços de vento em estruturas de barras utilizando o método dos volumes finitos.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Civil – Paraná, 2013.

TOMINAGA, Y., OSHIDA, A., MURAKAMI, S., SAWAKI, S. - **Comparison of various revised k–e models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 – 2008, pp. 309 – 411

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

WHITEHOUSE, R. **Scour at Marine structures.** Londres, Reino Unido: Thomas Telford 1998. 198 pp.

YOON K.T., MOON S.Y., GARCIA S.A., HEARD G.W., CHUNG T.J. **Flowfield-dependent Mixed Explicit-implicit (FDMEI) Methods for High and Low Speed and Compressible and Incompressible Flows.** Comp. Meth. Appl. Mech. and Eng., vol. 151(1-2). pp. 75-104, 1998.

ZIENKIEWICZ O.C. e TAYLOR R.L. **The Finite Element Method – Vol. 3: Fluid Dynamics.** Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.