

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
Programa de pós graduação em Engenharia Civil
Mestrado em Estruturas

Carlos Vitor da Silva Sarmiento

**ESTIMATIVA DE PARÂMETROS AERODINÂMICOS EM
ESTRUTURAS COM A UTILIZAÇÃO DA DINÂMICA DOS
FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Recife

2015

CARLOS VITOR DA SILVA SARMENTO

**ESTIMATIVA DE PARÂMETROS AERODINÂMICOS EM
ESTRUTURAS COM A UTILIZAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, área de Estruturas, como requisito para obtenção do diploma de Mestre em Engenharia Civil.

Recife

2015

Catálogo na fonte

Biblioteca Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S246e Sarmento, Carlos Vitor da Silva.
Estimativa de parâmetros aerodinâmicos em estruturas com a utilização da dinâmica dos fluidos computacional / Carlos Vitor da Silva Sarmento. - Recife: O Autor, 2015.
200 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro.
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Oscar Cavalcanti da Fonte.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências e anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Dinâmica dos Fluidos. 3. Computacional. 4. Túnel de Vento. 5. Coeficiente de Arrasto. I. Ribeiro, Paulo Marcelo Vieira. (Orientador). II. Fonte, Antônio Oscar Cavalcanti da. (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-173



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS AERODINÂMICOS EM ESTRUTURAS
COM A UTILIZAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

defendida por

Carlos Vitor da Silva Sarmiento

Considera o candidato APROVADO

Recife, 22 de maio de 2015

Orientadores:

Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Antônio Oscar Cavalcanti da Fonte – UNICAP
(co-orientador)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Lineu José Pedroso – UnB
(examinador externo)

Prof. Dr. Paulo Roberto Maciel Lyra – UFPE
(examinador interno)

*A Deus, à minha mãe, meu irmão,
minha namorada e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todo o projeto que tem em minha vida, que vem sendo consolidado cada dia que passa e a cada fase que venço nesta jornada acadêmica.

A minha mãe, Inês, por ser minha fortaleza e refúgio, me inspirando com seu jeito determinado de guiar a vida. Por me alimentar com seu amor e carinho, que me fortifica para as dificuldades diárias. Também destaco sua tolerância a minha ausência.

Ao meu irmão, Carlos Felipe, por inspirar-me através de seu domínio da matemática pura e seu raciocínio lógico. Ainda destaco um espaço a minha cunhada, Sheyla e a meu sobrinho Rafael, que terá boas inspirações em sua árvore genealógica. Agradeço ainda a todos da minha família, por me apoiar e servir de exemplo com tantos pesquisadores e professores sempre a motivar-me.

A minha namorada, Danielle, por sua paciência e compreensão à minha ausência. Pela ajuda nas horas difíceis e apoio constante nas dificuldades inerentes de uma pós graduação. Também pelo seu companheirismo em congressos e viagens.

A meus amigos por compreenderem a minha ausência e me apoiarem sempre. E a meus colegas de trabalho por me apoiarem sempre. Principalmente Paulo Alison pela sua experiência em CFD.

A todos os professores do programa de pós graduação em engenharia civil da UFPE que realizam suas atividades com grande dedicação. Destaco também o agradecimento a quem está por trás do funcionamento operacional da pós da UFPE, as servidoras Andrea e Claudiana, que sempre foram atenciosas e prestativas em seu trabalho.

Ao meu coorientador, professor Antônio Oscar, por acreditar em mim, desde a graduação, onde iniciamos estudos ligados à ação do vento em edificações. Sou muito grato ao professor Oscar pela paciência e contribuição nos estudos, que foram de grande tamanho devido à sua larga experiência e conhecimento técnico.

Em especial agradeço ao meu orientador, professor Paulo Marcelo Ribeiro, por toda a sua paciência e dedicação à pesquisa. Sou infinitamente grato pela sua contribuição na formação de um pesquisador. Com o prof. Paulo Marcelo aprendi bem mais que equações diferenciais ordinária ou método dos elementos finitos. Aprendi na verdade que ser professor extrapola a barreira da sala de aula, expandindo ao campo da curiosidade epistemológica. Sou extremamente grato pelo seu tempo gasto em diversas pesquisas em diversos campos da física e em especial na aerodinâmica de edificações, assunto que não é comumente abordado por engenheiros civis, principalmente calculistas, mas que foi um desafio abraçado por nós, que resultou em um final extremamente satisfatório. Professor Paulo Marcelo e Antônio Oscar, são as pessoas mais geniais que já conheci. Consegui unir os dois para um trabalho em um assunto que tenho grande apreço e curiosidade.

Agradeço também a banca pela sua colaboração e dedicação para a melhoria deste trabalho.

"A matemática é a única linguagem que temos em comum com a natureza".

Stephen Hawking

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original".

Albert Einstein

RESUMO

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS AERODINÂMICOS EM ESTRUTURAS COM A UTILIZAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Estruturas estão constantemente sujeitas a ações dinâmicas do vento. O procedimento padrão de análise de esforços consiste na obtenção de parâmetros aerodinâmicos, dentre eles o coeficiente de arrasto (C_A) e de força, para uma posterior aplicação de forças estáticas equivalentes aos nós ou superfície de influência do modelo numérico.

De maneira geral o C_A é obtido através de ábacos e tabelas disponíveis na literatura e normas vigentes. No Brasil a norma que fornece esses coeficientes é a NBR-6123/1988. Um problema surge em construções especiais, obras de arte e edificações não contempladas por aspectos normativos, e desta forma exigem uma análise especial.

Uma alternativa surge com o emprego de ensaios em túnel de vento para estimativa do coeficiente de arrasto (C_A). Entretanto, dificuldades adicionais podem surgir, como erros de escalas, instrumentação e incertezas do processo. Uma alternativa que já é bastante utilizada nas indústrias aeroespacial e automobilística e vem ganhando espaço na construção civil é a Dinâmica dos Fluidos Computacional ("Computational Fluid Dynamics-C.F.D."). Através de simulações numéricas por meio de um solver para equações completas de Navier-Stokes é possível avaliar o C_A para diversas formas geométricas e também para diferentes parâmetros de entrada. Na literatura é comum encontrar a denominação: "Túnel de Vento Numérico", para esse tipo de abordagem. Neste trabalho foram analisados casos práticos. Simulações numéricas com o auxílio do software Ansys® CFX foram conduzidas e os resultados foram posteriormente confrontados com as prescrições da NBR-6123/1988. Desta forma o CFD se mostrou bastante promissor em termos de custo computacional, estimativa do C_A e versatilidade na mudança de parâmetros do problema.

Palavras-chaves: *Dinâmica dos Fluidos. Computacional. Túnel de Vento. Coeficiente de Arrasto.*

ABSTRACT

AERODYNAMIC PARAMETERS ESTIMATE ON STRUCTURES WITH THE USE OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Structures are constantly subjected to dynamic wind action. The Standard analysis procedure is to obtain aerodynamic parameters, including the drag and force coefficients, for a subsequent application of static equivalent forces on the numerical model.

Generally, the drag coefficient is obtained by abacuses and tables available in the literature and design codes. In Brazil, the code that provides these coefficients is the NBR-6123/1988. However, a problem arises in special buildings and structures not covered by code provisions, demanding special analyses for a safe design.

An alternative arises with the use of wind tunnel tests for estimation of the aerodynamic parameters. On the other hand, additional difficulties may arise, such as: scales errors, instrumentation and uncertainties in the process. An other alternative that is already widely used in the aerospace and automotive industries and that is becoming more popular in civil engineering is the Computational Fluid Dynamics (CFD). Through numerical simulations using a solver for Navier-Stokes equations it is possible to evaluate the aerodynamic parameters for various geometric shapes and for different input data. In literature, this type of analysis is commonly referred as Numerical Wind Tunnel.

Practical simulations using Ansys CFX software were conducted and the results were later confronted with the requirements of NBR-6123/1988 as well as wind tunnel tests. The CFD models proved quite promising in terms of accuracy, computational cost and versatility to structural engineering analysis.

Palavras-chaves: Fluid Dynamics. Computational. Wind Tunnel. Drag Coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –Escoamento do vento em torno de prédios na beira mar da cidade do Panamá....	26
Figura 1.2 –Evolução na Modelagem- Escoamento bidimensional	38
Figura 1.3 –Evolução na Modelagem- Escoamento tridimensional.....	39
Figura 2.1 – Vetor velocidade e espaço.....	46
Figura 2.2 – Distribuição dos campos vetoriais e escalares no volume de controle.	47
Figura 2.3 –Deformações Tangenciais causadas pela tensão de cisalhamento: a) elemento de fluido deformado; b) Distribuição de velocidade.....	47
Figura 2.4 –Rotação em um elemento de fluido.....	49
Figura 2.5 –a) Superfície de controle. b) Escoamento por uma seção S.	53
Figura 2.6 –Volume de controle arbitrário em escoamento com um padrão arbitrário.....	55
Figura 2.7 –Equação de Bernoulli para o escoamento sem atrito ao longo de uma linha de corrente: a) força e fluxo; b) força líquida de pressão.....	64
Figura 2.8 –Volume de controle infinitesimal com fluxo unidimensional.....	66
Figura 2.9 –Volume de controle elementar fixo sujeito a aceleração angular.	71
Figura 2.10 – a)Forças atuando em um corpo em escoamento de um fluido; b) Tensões infinitesimais atuantes na interface do corpo.	76
Figura 2.11 –Placas dispostas no escoamento em ângulos diferentes: a)90°; b) 0°	77
Figura 2.12 –Resultante das forças em um corpo imerso em um fluido.	78
Figura 2.13 – Efeitos do carenamento na redução do arrasto.....	78
Figura 2.14-Turbulência a) Escoamento pela modelagem clássica . b) Escoamento pela modelagem contemporânea. c) Média de Reynolds.....	80
Figura 2.15- Método Numérico.	84
Figura 2.16- a) Discretização de malha mostrando o elemento. b) Elemento 1234 e volume centrado em 1.	85
Figura 3.1 –Espessura da camada limite.	100
Figura 4.1 –Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s).....	103

Figura 4.2 –Coeficiente de Arrasto para edificações em vento de baixa turbulência.	104
Figura 5.1 –CFX- Workbench- Ansys 14.0.....	105
Figura 5.2 –Módulo Geometry- Ansys 14.5.....	107
Figura 5.3 –Módulo Mesh - Ansys 14.5.....	107
Figura 5.4 –Módulo Mesh - Ansys 14.5.....	108
Figura 5.5 –Módulo Setup - Ansys 14.5.....	111
Figura 5.6 –Analysis Type e Configurações do domínio - Ansys 14.5.....	111
Figura 5.7 –Configurações do domínio e características iniciais - Ansys 14.5.....	112
Figura 5.8 –Solver Control e Expressions - Ansys 14.5.....	112
Figura 5.9 –Plataforma Solver - Define Run- Ansys 14.5.....	113
Figura 5.10 –Partitioner, Solver e Interpolator Alocações de memória- Ansys 14.5.....	114
Figura 5.11 –Solver Manager- Ansys 14.5.....	115
Figura 5.12 –Results - Ansys 14.5.....	116
Figura 6.1 –Evolução da Modelagem - escoamento Bidimensional.....	118
Figura 6.2 –Coeficiente de arrasto de corpos bidimensionais com $Re \geq 10^4$	118
Figura 6.3 – Dimensões do domínio.....	119
Figura 6.4 – Dimensões genéricas para um domínio bidimensional qualquer.....	119
Figura 6.5 – Dimensões do domínio para a seção quadrada.	120
Figura 6.6 – Domínio e subdomínios para a seção quadrada.	120
Figura 6.7 – Detalhe da malha.....	121
Figura 6.8 – Detalhes das malhas- Seção quadrada.....	122
Figura 6.9 – Elementos com menores deformações (em geral nas regiões de interesses)- Seção quadrada.	123
Figura 6.10 – Elementos com maiores deformações (afastados das regiões de interesses)- Seção quadrada.....	124
Figura 6.11 – Elementos com maiores ortogonalidades (Na Regiões de interesses)- Seção quadrada.	124

Figura 6.12 – Elementos com menores ortogonalidades (Fora da Regiões de interesses)- Seção quadrada.	125
Figura 6.13 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Seção quadrada.	126
Figura 6.14 – Convergência no modelo de turbulência- Seção quadrada.	127
Figura 6.15 – a) Convergência de Malhas. b)Tempo de processamento- Seção quadrada- Estacionário.	127
Figura 6.16 – RMS do Regime Estacionário- Seção Quadrada: a) Momento; b) Turbulência.	128
Figura 6.17 – RMS do Regime Transiente- Seção Quadrada: a) Momento; b) Turbulência.	128
Figura 6.18 – Convergência do número de Courant- Seção quadrada.	129
Figura 6.19 – Convergência no número de iterações- Seção quadrada.	130
Figura 6.20 – Convergência de Malha - Seção quadrada- a) Arrasto instantâneo. b)Arrasto médio.	131
Figura 6.21 – Erro da Simulação- Seção quadrada.	132
Figura 6.22 –Aqueduto São Francisco. a) Trecho da Obra, b) Seção Transversal (unidades em centímetro)	132
Figura 6.23 - Seção submetida a vento perpendicular ao plano da Figura (NBR 6123/1988).	133
Figura 6.24 – Dimensões do domínio para o aqueduto.	134
Figura 6.25 – Domínio e subdomínios para o aqueduto.	134
Figura 6.26 – Detalhes das malhas- Seção do Aqueduto.	136
Figura 6.27 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)- Aqueduto	137
Figura 6.28 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Aqueduto.	137
Figura 6.29 – Elementos com maiores ortogonalidades (Na Regiões de interesses)- Aqueduto.	138

Figura 6.30 – Elementos com menores ortogonalidades (Fora da Regiões de interesses)- Aqueduto.....	138
Figura 6.31 –Aqueduto com vento ideal- Estacionário: a) Convergência de Malhas b) tempo de processamento.....	139
Figura 6.32 – Convergência de Malha - Aqueduto ideal- a) Arrasto instantâneo. b) Arrasto médio.....	140
Figura 6.33 – Independência da Massa específica do modelo.	141
Figura 6.34 – a) Convergência de Malhas. b)Tempo de processamento- Aqueduto Vento Real.	142
Figura 6.35 – a) Convergência no número de Courant- Aqueduto Vento Real.	143
Figura 6.36 – Convergência de Malha- Aqueduto: a) Arrasto instantâneo; b)Arrasto médio.	144
Figura 6.37 –Aqueduto: a) Erro da Simulação; b) Tempo de processamento.....	144
Figura 6.38 –Aqueduto Real- Detalhe da Malha 05- Escoamento em 15s.....	145
Figura 6.39 – Linhas de corrente- Escoamento em torno da Seção Quadrada.....	146
Figura 6.40 – Linhas de corrente- Escoamento em torno do Aqueduto Real.....	146
Figura 6.41 –Evolução da Modelagem - Escoamento Tridimensional	147
Figura 6.42 – Dimensões do domínio para o cubo.....	148
Figura 6.43 –a) Domínio e subdomínios para a seção tridimensional; b) Detalhe do Cubo..	148
Figura 6.44 – Domínio e subdomínios para o cubo.....	149
Figura 6.45 – Detalhes das malhas- Cubo.	149
Figura 6.46 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)- Cubo.....	150
Figura 6.47 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Cubo.....	150
Figura 6.48 – Elementos com maiores ortogonalidade (Na Regiões de interesses)- Cubo....	151
Figura 6.49 – Elementos com menores ortogonalidade (Fora da Regiões de interesses)- Cubo.	151

Figura 6.50 – Convergência do Modelo de turbulência- Cubo	152
Figura 6.51 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Cubo... 153	
Figura 6.52 – Convergência do número de Courant- Cubo..... 154	
Figura 6.53 – Convergência no número de Iterações- Cubo. 154	
Figura 6.54 – Convergência de Malha - Seção quadrada: a) Arrasto instantâneo; b)Arrasto médio..... 155	
Figura 6.55 – Erro da Simulação- Cubo..... 156	
Figura 6.56 –Edifício idealizado. 156	
Figura 6.57 – Dimensões do domínio genérico..... 157	
Figura 6.58 – Edifício idealizado a) Domínio; b) Detalhe da edificação, ocultado as faces do domínio..... 158	
Figura 6.59 – Detalhes das malhas- Edifício idealizado- SubModelo 05.a..... 159	
Figura 6.60 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)... 160	
Figura 6.61 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Edifício Real..... 160	
Figura 6.62 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)... 161	
Figura 6.63 - Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)... 161	
Figura 6.64 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Edifício idealizado. 162	
Figura 6.65 – Convergência do número de Courant - Seção quadrada. 163	
Figura 6.66 – Convergência no número de Iterações- Edifício idealizado. 164	
Figura 6.67 – Convergência de Malha - Edifício 30x10x10 (5a) - a) Arrasto instantâneo. b)Arrasto médio..... 165	
Figura 6.68 – Convergência de Malha - Edifício 40x5x10 (5b) - a) Arrasto instantâneo. b)Arrasto médio..... 165	
Figura 6.69 – Convergência de Malha - Edifício 40x10x5 (5c) - a) Arrasto instantâneo. b)Arrasto médio..... 166	
Figura 6.70 – Convergência de Malha - Edifício 130x30x20 (5d): a) Arrasto instantâneo;	

b)Arrasto médio.....	166
Figura 6.71 – Erro da Simulação: a)Edifício 30x10x10m, b)Edifício 40x05x10m, c) Edifício 40x10x5m, d)Edifício 130x30x20m.	167
Figura 6.72 – Ângulo de Incidência do vento. Edifício Real.	169
Figura 6.73 – Dimensões do domínio para o Edifício Real. a) genérica, b) Exata (Escala 1:10)	170
Figura 6.74 –a) Domínio da edificação. b) Detalhe dos pavimentos.	170
Figura 6.75 –Interfaces do domínio computacional- Edifício Real.....	171
Figura 6.76 – Detalhes das malhas- Edifício Real.....	171
Figura 6.77 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)- Edifício Real.....	172
Figura 6.78 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Edifício Real.....	172
Figura 6.79 – Elementos com maiores ortogonalidade (Na Regiões de interesses)- Edifício Real.....	173
Figura 6.80 – Elementos com menores ortogonalidade (Fora da Regiões de interesses)- Edifício Real.....	173
Figura 6.81 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Edifício Real.....	174
Figura 6.82 – Convergência de Malha - Edifício Real - Incidência do vento $\phi = 0^\circ$ e $\phi = 90^\circ$	177
Figura 6.83 – Simplificação do Modelo (Edifício Real).	178
Figura 6.84 – Tempo de simulação (Edifício Real) Vento a 0° e 90°	183
Figura 6.85 – Streamlines- Escoamento em torno dos Edifícios Idealizados (5.a).....	184
Figura 6.86 – Streamlines- Escoamento em torno dos Edifícios Idealizados 5b a 5d.....	185
Figura 6.87 – Streamlines - Escoamento em torno do Edifício idealizado (5.c)- Domínio Total - Esteira.....	185
Figura 6.88 – Streamlines - Escoamento em torno do Edifício Real. a) 0° e b) 90°	186

Figura 6.89 – Streamlines- Escoamento em torno do Edifício Real- Domínio Total - Esteira.	186
Figura 6.90 – Streamlines Análise da Esteira - Seção quadrada	187

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Linha do tempo- Estudo da Aerodinâmica das construção	28
Quadro 1.2 - Síntese das principais contribuições da literatura	36
Quadro 2.1 - Volume de controle.	54
Quadro 2.2 –Fluxo de massa no volume de controle elementar.....	67
Quadro 2.3 –Fluxo de quantidade de movimento no VC elementar.	69
Quadro 2.4 - Fluxo de calor no VC elementar.	72
Quadro 6.1 - Coeficiente de arrasto em estruturas de seção quadrada submetida ao escoamento do vento	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Constantes para o k-ε. Fonte: Ferreira (2013).	92
Tabela 3.2 – Constantes para o Modelo SST. Fonte: Angelo (2013).....	96
Tabela 6.1– Refinamento da malha nos subdomínios - Tamanho dos elementos em metros (m).	122
Tabela 6.2– <i>Skewness</i> da malha 03- Seção quadrada	124
Tabela 6.3– <i>Orthogonal Quality</i> da malha 03- Seção quadrada.....	125
Tabela 6.4– Convergência do número de Courant- Seção quadrada.....	129
Tabela 6.5- Interpolação linear do arrasto a partir de uma tabela 11.1 em Çengel e Cimbala (2007)	133
Tabela 6.6– Refinamento da malha nos subdomínios - Tamanho dos elementos em metros (m)	135
Tabela 6.7– <i>Skewness</i> da malha 03- Aqueduto.....	136
Tabela 6.8– <i>Orthogonal Quality</i> da malha 03- Aqueduto	137

Tabela 6.9– Convergência do Número de Courant- Aqueduto com Ventos Reais.	143
Tabela 6.10– Resumo das simulações- escoamento Bidimensional.	145
Tabela 6.11– Refinamento da malha nos subdomínios - Tamanho dos elementos em metros (m).....	150
Tabela 6.12– Skewness da malha 03- Cubo.	151
Tabela 6.13– Orthogonal Quality da malha 03- Cubo.	151
Tabela 6.14– Convergência do número de Courant- Cubo	153
Tabela 6.15–Características dos Edifícios e coeficiente de arrasto de acordo com a NBR6123/1988.....	157
Tabela 6.16– Refinamento malha - Edifício idealizado - Tamanho dos elementos em metros (m).	159
Tabela 6.17– Skewness da malha 03- Edifício idealizado.	160
Tabela 6.18– Orthogonal Quality da malha 03- Edifício idealizado.....	161
Tabela 6.19– Convergência do número de Courant- Edifício idealizado.....	163
Tabela 6.20–Característica do edifício real e seu respectivo modelo simplificado.....	168
Tabela 6.21– Refinamento de malha - Edifício Real- Tamanho dos elementos em metros (m)	172
Tabela 6.22– Skewness da malha 03- Edifício Real	173
Tabela 6.23– Orthogonal Quality da malha 03- Edifício Real	173
Tabela 6.24– Influência da Rugosidade- Edifício Real	175
Tabela 6.25– Força nodal para o vento incidente a 0° e 90° - Método simplificado.	180
Tabela 6.26– Tabela comparativa- Força nodal para o vento incidente a 0°	181
Tabela 6.27– Tabela comparativa- Força nodal para o vento incidente a 90°	182
Tabela 6.28– Tabela comparativa- Força total para o vento incidente a 0° e 90°	183
Tabela 6.29– Resumo das simulações- escoamento Tridimensional.....	184

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLOS

A	Área
B	Propriedade arbitrária qualquer
C_A	Coefficiente de Arrasto
C_S	Coefficiente de sustentação
d	Densidade
D	Comprimento característico
D_s	Comprimento infinitesimal
e	Energia cinética ou potencial
E	Energia Total
F	Força
F_A e F_S	Força de arrasto e sustentação respectivamente
g	Gravidade
H	Quantidade de movimento angular do sistema em relação ao seu centro de massa.
k	Energia cinética turbulenta
K	Coefficiente de condutividade térmica
L	Comprimento (Diâmetro) característico
m	Massa
M	Momento
p	Pressão em um ponto
P	Campo de Pressão
$q(z)$	Pressão dinâmica do vento
Q	Vazão volumétrica
R	Constante do gás
Re	Número de Reynolds
S	Entropia de um sistema
SC	Superfície de Controle
ST	Seção transversal
S_t	Número de Strouhal
SVC	Subvolume de controle
t	Tempo

T	Temperatura
U	Valor Instantâneo qualquer da variável U
u,v,w	Componentes da velocidade em cada eixo cartesiano respectivamente
V_0	Velocidade básica do vento
VC	Volume de Controle
V_k	Velocidade Característica do vento
W	Peso
x,y,z	Componentes cartesianas
ε	Taxa de dissipação de energia cinética por unidade de massa
θ	Ângulo de rotação
ρ	Massa específica
τ	Tensão cisalhante
ϕ	Ângulo de Incidência do Vento
Φ	Função dissipativa
$\cos\theta$	Cosseno de um ângulo θ qualquer
$\sen\theta$	Seno de um ângulo θ qualquer
u	Flutuação da variável U
\mathcal{V}	Volume
\mathcal{W}	Trabalho
γ	Peso específico
δ	Espessura da Camada limite
ν	Viscosidade cinemática do fluido
ω	Velocidade angular
$\beta', \alpha'_1, \beta'_1, \sigma_k$ e σ_{ω_1}	Constantes do modelo k- ω
\bar{u}_t	Viscosidade artificial turbulenta
\hat{h}	Entalpia de um Sistema
\vec{q}	Fluxo de calor
C_p e C_v	Calor específico do gás à pressão constante e volume constante, respectivamente.
F_r	Fator de Rajada do vento
I_x, I_y, I_z	Momento de inércia em torno de x, y e z respectivamente
L_{vk}	Primeiro comprimento de Von Karman

Q_{Calor}	Quantidade de calor
S_1	Fator topográfico de acordo com a NBR6123/1988
S_2	Fator de Rugosidade de acordo com a NBR6123/1988
S_3	Fator estatístico de acordo com a NBR6123/1988
\bar{U}	Média do valor instantâneo U
\vec{V}	Campo de velocidade
\vec{a}	Aceleração
\dot{m}	Fluxo de massa
\vec{n}	Vetor unitário normal à superfície
\vec{r}	Vetor deslocamento
\hat{u}	Energia Interna
$\vec{\zeta}$	Vorticidade
σ_{ij}	Tensor de tensões de superfície
$\sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_\theta, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$	Constantes do modelo k- ϵ
ν_t	Viscosidade cinemática turbulenta
ϕ'	Fator de correção da matriz
Δ	Varição de uma grandeza qualquer
∇	Gradiente
μ	Viscosidade dinâmica do fluido

SIGLAS

ASM	Algebraic Stress Model
BSL	Baseline
CA	Coefficiente de Arrasto
CAARC	Commonwealth Advisory Aeronautical Council
CESUP	Centro de Supercomputação
CFD	Computational Fluid Dynamicy
CVFEM	Control-Volume Finite Elemennt Method
CTMetro	Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos

DES	Detached Eddy Simulation
DFC	Dinâmica dos fluidos computacional
DNS	Direct Numerical Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
EdFVM	Element-Based Finite Volume Method
ILU	Incomplete Lower Upeer
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LES	Large Eddy Simulation
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
<i>MG</i>	Multigrid
MVF	Método dos Volumes Finitos
RAM	Random Access Memory
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMS	Root Mean square
RNG	Reynolds Normalization Group
RSM	Reynolds Stress Model
SAS	Scale-Adaptative Simulation
SI	Sistema Internacional de Unidades
SSG	Speziale Sarkar Gatski
SST	Shear Stress Transport
TMD	Tuned Mass Damper
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WTC	World Trade Center

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	26
1.1 LINHA DO TEMPO DA AERODINÂMICA EM EDIFICAÇÕES	28
1.2 SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES SOBRE TÚNEIS DE VENTO NUMÉRICO	29
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	37
1.3.1 Objetivo geral	37
1.3.2 Objetivos específicos	37
1.4 METODOLOGIA PROPOSTA	37
1.5 LIMITAÇÕES	40
1.5.1 Erros	40
1.5.2 Capacidade computacional	41
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	42
2. ELEMENTOS BÁSICOS DA MECÂNICAS DOS FLUIDOS	43
2.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO	43
2.2 DEFINIÇÕES E PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	43
2.2.1 Massa Específica	44
2.2.2 Peso Específico	44
2.2.3 Densidade	45
2.2.4 Pressão	45
2.2.5 Temperatura	45
2.2.6 Velocidade	45
2.2.7 Viscosidade	47
2.2.8 Vorticidade e rotacionalidade	49
2.2.9 Número de Reynolds	50
2.3 ABORDAGEM INTEGRAL DO ESCOAMENTO	51
2.3.1 Sistema e Volume de Controle (VC)	51
2.3.2 Vazão de Massa	53
2.3.3 Teorema de Transporte de Reynolds	54
2.3.4 Conservação de massa	57
2.3.5 escoamento Incompressível	58

2.3.6	Conservação do momento linear (2ª Lei de Newton)	59
2.3.7	Observações sobre a quantidade de momento linear	60
2.3.8	Teorema da quantidade de Movimento angular.	61
2.3.9	Equação da conservação de Energia	62
2.3.10	Escoamento sem atrito: A equação de Bernoulli	63
2.4	ABORDAGEM DIFERENCIAL DO ESCOAMENTO- EQUAÇÃO DE NAVIER- STOKES PARA ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL E ISOTÉRMICO	66
2.4.1	Equações diferenciais da conservação de massa	67
2.4.2	Equações diferenciais da conservação de Momento Linear	68
2.4.3	Equações diferenciais da conservação de momento angular	71
2.4.4	Equações diferenciais da conservação de Energia	71
2.4.5	Equações de Navier-Stokes	73
2.4.5.1	Condições de contorno	75
2.5	ARRASTO E SUSTENTAÇÃO	75
2.6	Turbulência	79
2.7	Esteiras	81
2.8	Resolução do Escoamento Numericamente	81
2.8.1	Métodos dos Diferenças Finitas	82
2.8.2	Métodos dos Elementos Finitos	82
2.8.3	Métodos dos Volumes Finitos	83
2.8.3.1	Conceitos iniciais	83
2.8.3.2	Método dos volumes finitos Baseados em Elementos	84
2.8.4	Comentários adicionais sobre os Métodos Numéricos	86
2.8.4.1	Tratamento das não linearidades	86
2.8.4.2	Erros de truncamento	86
3.	<i>DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (DFC)</i>	87
3.1	APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO	87
3.2	Conhecimentos iniciais da DFC e suas aplicações	87
3.3	Modelos de Turbulência	87
3.3.1	Modelos baseados na teoria da viscosidade turbulenta	90
3.3.1.1	Modelo zero equação	90

3.3.1.2 Modelo de uma equação: Transporte da viscosidade turbulenta	90
3.3.1.3 Modelo de duas equações: k- ϵ Padrão	91
3.3.1.4 Modelo de duas equações: k- ϵ (RNG)	93
3.3.1.5 Modelo de duas equações: k- ω	93
3.3.1.6 Modelo de duas equações: Shear Stress Transport- SST	94
3.3.1.7 Modelo baseado nas tensões de Reynolds (SSG Reynolds Stress)	96
3.3.1.8 Baseline Model (BSL)	97
3.3.2 Large Eddy Simulation (LES)	98
3.3.3 Detached Eddy Simulation (DES)	98
3.4 Camada Limite	98
4. ASPECTOS DA NORMA DE VENTO APLICADA A EDIFICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE ARRASTO	101
4.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO	101
4.2 CONCEITOS PRELIMINARES SOBRE A NORMA	101
4.3 PRESSÃO DINÂMICA	102
4.4 COEFICIENTE DE PRESSÃO	102
4.5 VELOCIDADE CARACTERÍSTICA	102
4.6 VENTO EM BAIXA TURBULÊNCIA	104
4.7 COEFICIENTE DE ARRASTO	104
5. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS PARA A MODELAGEM EM CFD DE EDIFICAÇÕES.	105
5.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO	105
5.2 SOFTWARE UTILIZADO	105
5.2.1 Geometria	106
5.2.2 Malha	107
5.2.3 Setup	109
5.2.4 Solver	113
5.2.5 Resultados	115
6. ESTUDO DE CASOS: AQUEDUTO DA TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO E EDIFICAÇÃO REAL	117

6.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO	117
6.2 ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL	117
6.2.1 Seção Quadrada- Modelo 01	118
6.2.1.1 Domínio computacional - Seção Quadrada - escoamento bidimensional	119
6.2.1.2 Malha Computacional - Seção Quadrada - escoamento Bidimensional	121
6.2.1.3 Qualidade de malha	123
6.2.1.4 Setup - Seção quadrada - escoamento bidimensional	125
6.2.1.5 Resultados - Seção quadrada - escoamento bidimensional	131
6.2.2 Seção retangular- Aqueduto do São Francisco com vento idealizado- Modelo 02	132
6.2.2.1 Coeficiente de arrasto disponível na literatura- Aqueduto	133
6.2.2.2 Coeficiente de arrasto Disponível na norma vigente- Aqueduto	133
6.2.2.3 Domínio Computacional- Aqueduto - escoamento bidimensional	134
6.2.2.4 Malha Computacional - Aqueduto Idealizado- escoamento Bidimensional	135
6.2.2.5 Qualidade de malha	136
6.2.2.6 Setup - Aqueduto Idealizado- escoamento Bidimensional	138
6.2.2.7 Resultados - Aqueduto Idealizado- escoamento Bidimensional	139
6.2.3 Seção retangular - Aqueduto do São Francisco com vento real - Modelo 03	140
6.2.3.1 Domínio Computacional - Aqueduto- vento real - escoamento Bidimensional.	141
6.2.3.2 Malha Computacional - Aqueduto com vento real- escoamento Bidimensional	141
6.2.3.3 Setup - Aqueduto com vento real- escoamento Bidimensional	141
6.2.3.4 Resultados - Aqueduto com vento real - escoamento Bidimensional	143
6.2.4 Resumo das simulações - Bidimensional	145
6.2.5 Streamlines das simulações - escoamento bidimensional	145
6.3 ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL	147
6.3.1 Cubo - Modelo 04- escoamento Tridimensional	147
6.3.1.1 Domínio Computacional - Cubo - escoamento Tridimensional	147
6.3.1.2 Malha Computacional - Cubo - escoamento Tridimensional	148
Para o teste de convergência foram utilizadas malhas refinadas e verificada a tendência para o arrasto, tomando-o como uma assíntota horizontal.	150
6.3.1.3 Qualidade de malha	150
6.3.1.4 Setup - Cubo - escoamento Tridimensional	152
6.3.1.5 Resultados - Cubo - escoamento Tridimensional	155
6.3.2 Edifícios idealizados de acordo com a NBR6123/1988- Modelo 05	156

6.3.2.1 Domínio Computacional - Edifício idealizado - escoamento Tridimensional	157
6.3.2.2 Malha Computacional - Edifício idealizado - escoamento Tridimensional	158
6.3.2.3 Qualidade de malha	160
6.3.2.4 Setup - Edifício idealizado - escoamento Tridimensional	161
6.3.2.5 Resultados - Edifícios idealizados - escoamento Tridimensional	165
6.3.3 Edifício Real - Modelo 06	168
6.3.3.1 Domínio Computacional - Edifício Real - escoamento Tridimensional	168
6.3.3.1.1 Simplificações Adotadas	169
6.3.3.2 Malha Computacional - Edifício Real - escoamento Tridimensional	171
6.3.3.3 Qualidade de malha	172
6.3.3.4 Setup - Edifício Real - escoamento Tridimensional	174
6.3.3.5 Resultados - Edifício Real - escoamento Tridimensional	176
6.3.3.6 Cálculo segundo a NBR 6123/1988.	178
6.3.3.7 Considerações sobre o Ensaio em túnel de vento.	179
6.3.3.8 Resultados comparativos - Edifício Real - escoamento Tridimensional	181
6.3.3.9 Tempo de simulação	183
6.3.4 Resumo das simulações - escoamento tridimensional	184
6.3.5 Streamlines das simulações - escoamento tridimensional	184
6.4 Comentários sobre o escoamento em regime turbulento	187
7. CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E RECOMENDAÇÕES	188
7.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO	188
7.2 CONCLUSÕES GERAIS	188
7.3 CONCLUSÕES PARA O ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL	188
7.4 CONCLUSÕES PARA O ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL	189
7.5 CONTRIBUIÇÕES	190
7.6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	190
REFERÊNCIAS	191
ANEXO A – PLANTA BAIXA E ELEVAÇÃO DO EDIFÍCIO REAL	199
ANEXO B – IMAGENS DO ENSAIO DE TÚNEL DE VENTO- EDIFÍCIO REAL	200

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil as estruturas são dimensionadas com base em diferentes cargas e combinações de carregamento, dentre essas, há as verticais oriundas do peso próprio e também acidentais, valores que são previamente conhecidos e estabelecidos através de normas vigentes. Exemplos práticos disto podem ser citados como o peso próprio da estrutura, que é de fácil cálculo com grande precisão. Cargas estáticas verticais em uma passarela ou em uma edificação podem facilmente ser calculadas apresentando boa precisão da estimativa. Entretanto, cargas horizontais resultantes do vento são de grande complexidade, pelo fato de pertencerem a um evento aleatório e avaliadas através de levantamento estatístico da velocidade e direção do vento. Outros agravantes nas incertezas das cargas aerodinâmicas são a quantidade de variáveis, como a topografia, influência de edificações nas proximidades, geometria da estrutura, entre outras. Na Figura. 1.1 é possível ver o escoamento de uma massa de água (vapor condensado) na costa da cidade do Panamá, onde a influência do vento se torna bastante evidente na ação de cargas horizontais em tais construções



Figura 1.1 –Escoamento do vento em torno de prédios na beira mar da cidade do Panamá.

Fonte: Agência EFE JR Hott.

Entretanto, o vento nem sempre foi motivo de preocupação na engenharia civil. Billah

e Scanlan (1940) destacam que a ciência da aerodinâmica aplicada à construção civil nasceu após o colapso da ponte Tacoma Narrows que ocorreu em uma tempestade de vento moderado em 1940 em Washington, Estados Unidos. Devido à ocorrência de acidentes causados pela força do vento e ensaios experimentais realizados atualmente já se torna bastante evidente os efeitos do vento nas edificações. Verifica-se ainda que o efeito do vento torna-se mais danoso quando incidente em estruturas esbeltas.

Destaca-se que a aerodinâmica é uma área bastante explorada pela indústria aeroespacial e automobilística, objetivando o menor consumo de energia e também a segurança dos usuários. De maneira semelhante, a aerodinâmica aplicada a construções objetiva atenuação de efeitos estáticos e dinâmicos na estrutura e consequentemente garantir segurança e conforto aos usuários, além de manter a integridade estrutural.

Para mensurar ações do vento em edificações, no Brasil, dispõe-se da NBR 6123/1988-Forças devidas ao vento em edificações. Esta norma propõe valores para coeficientes de pressão e arrasto para edificações conforme tabelas e ábacos, de acordo com geometrias previamente estabelecidas. Quando as estruturas fogem dessas características geométricas ensaios em túnel de vento devem ser realizados. Nestes ensaios, erros devem ser levados em consideração, uma vez que se trata de modelos reduzidos e dependem de sensores para medir as pressões, velocidades e deslocamentos. Outra forma de aquisição de parâmetros aerodinâmicos é através da dinâmica dos fluidos computacional - DFC (Computational Fluid Dynamic-CFD). A indústria aeroespacial e automobilística já faz uso desta ferramenta com maior frequência, devido a impossibilidade de realização de muitos ensaios em túnel de vento para uma mesma estrutura, requerendo apenas a calibração com o túnel de vento através de poucos ensaios. Segundo Kundun e Cohen (2002) os benefícios destas simulações são:

- a) Rapidamente se produz resultados e de forma econômica. Enquanto o preço da maior parte dos produtos aumenta, custos computacionais diminuem. De acordo com a lei de Moore, o poder de CPU vai dobra a cada 18 meses no futuro próximo;
- b) permite mudança fácil dos parâmetros de entrada, otimizando o projeto;
- c) pode simular escalas reais, diferentemente de experimentos onde são utilizados modelos em escala reduzidas;
- d) pode simular condições ideais, desprezando termos das equações governantes e focando apenas nos parâmetros essenciais;
- e) permite a exploração de evento não natural, como explosões.

Ribeiro (2009) afirma que se as equações de Navier-Stokes tridimensionais em regime transiente fossem resolvidas com precisão, tornaria a simulação numérica uma solução perfei-

ta para o escoamento. Destaca ainda que as soluções das equações de conservação são extremamente difíceis para a maior parte dos escoamentos que ocorrem na Engenharia. As simulações devem ter uma relação entre acurácia e tempo de processamento, uma vez que se trata de casos práticos e este tempo deve ser compatível para auxiliar no projeto e tomada de decisão.

1.1 LINHA DO TEMPO DA AERODINÂMICA EM EDIFICAÇÕES

A partir de Chaves (2006) e Baals e Corliss (2015) foi elaborado o Quadro 1.1 com as principais contribuições referentes ao estudo de vento em edificações.

ANO	AUTOR	EVENTO
1707 1751	Robins	Empregou o braço giratório objetivando estudo do escoamento entorno de objetos. Verificou as diferentes resistências do ar de acordo com as formas dos objetos. Foram obtidas baixas velocidades.
1773 1857	Cayley	Aprimorou o braço giratório obtendo velocidades entre 10 e 20 pés por segundo. O pesquisador já introduz conceitos de arrasto e sustentação. Em 1804 criou e voou um planador não tripulado.
1871	Wenham	Primeiro túnel de vento. Elaborado a partir de um tronco de madeira com 12 pés de comprimento e 18 polegadas de área, utilizava um motor a vapor para impulsionar o ar na entrada.
1842 1912	Reynolds	Demonstrou que um fluxo de ar em um modelo em escala reduzida seria o mesmo para um objeto em tamanho real considerando um determinado parâmetro, o número de Reynolds.
1904	Prandtl	Introduziu conceitos sobre a camada limite
1912	Von Kármán	Identificou o desprendimento de vórtices.
1935	Taylor	Identificou a teoria estatística da turbulência
1940	Rathbun	Medições de deformação em escala real no edifício Empire State.
1954	Cermak	Construiu o primeiro túnel de vento para a camada limite
1957	Van der Hoven	Compilou um espectro de banda larga de frequência do vento
1961	Davenport	Desenvolveu os conceitos referentes à estatística da carga do vento
1963		I Conferência internacional sobre o efeito do vento em edifícios.
1964	Cermak e Davenport	Primeiro estudo de uma edificação em túnel de vento. Análise do The World Trade Center Twin Tower, situado em Nova York.
1964 1973	Blessmann	Estudou o problema de vento em edificações no Brasil apontando resultados experimentais em túnel de vento.
1976	Deaves e Harris	Foi desenvolvido um modelo matemático para ventos fortes
1979	Melbourne	Demonstrou os efeitos e importância da turbulência em corpos aerodinâmicos de diversas formas
1992	Murakami	I Simpósio computacional de engenharia do vento - Tóquio

Quadro 1.1 - Linha do tempo - Estudo da Aerodinâmica de construções

1.2 SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES SOBRE TÚNEIS DE VENTO NUMÉRICO

Lima (2000) realizou simulações computacionais em torno de edificações residenciais e galpões industriais com o auxílio dos softwares comerciais Ansys/ Flotran e Floplus 4.0. O autor objetivou em suas análises a redução do custo computacional, buscando a simulação em computadores doméstico com durações médias de 12h. Lima (2000) utilizou malhas com aproximadamente 8500 nós e 40.000 elementos. O autor ainda realiza algumas simulações para o conforto térmico. Lima(2000) destaca algumas dificuldades enfrentadas durante as simulações, dentre elas o tempo excessivo das simulações, base de dados de manipulações complexas, convergência de soluções e dificuldades em manipular e visualizar os resultados. O autor compara os resultados com valores propostos na NBR6123/1988 e desta forma aponta a dinâmica dos fluidos computacional como uma ferramenta bastante promissora para a obtenção de parâmetros aerodinâmicos na construção civil.

Seraphim (2004) realizou uma análise aerodinâmica em uma estrutura, um aerofólio. As simulações partiram de um ensaio de túnel de vento a fim de obter os coeficientes de pressão. Foi utilizado o software comercial Ansys/Flotran para as simulações numéricas, no qual foi determinado o coeficiente de arrasto e sustentação do perfil. O autor conclui indicando uma aceitação na discrepância máxima de cerca de 20% entre o método experimental e computacional. Destaca ainda que esta diferença resulta da forma de leitura dos manômetros e aproximações do método numérico, onde foi utilizado o método dos elementos finitos.

Chavez (2006) analisou, dinamicamente, deslocamentos, acelerações e esforços em um edifício alto para o carregamento do vento. O efeito turbulento do vento foi simulado levando em conta as características da estatística relacionadas à natureza e aos parâmetros dependentes da superfície do terreno. Foi utilizado o software comercial Ansys. O carregamento do vento foi obtido por superposição de funções harmônicas, aplicando técnicas de Monte Carlo para avaliação estatística das respostas. Os resultados obtidos foram comparados com os indicados na norma brasileira NBR 6123/1988 e os níveis de conforto dos usuários foram avaliados com os índices de percepção humana das acelerações. A autora apresenta os resultados de deslocamento do edifício para três abordagens distintas: norma pelo método estático, método do vento sintético e análise dinâmica simplificada. Dentre as quais foi encontrada uma discrepância de aproximadamente 4% para a análise dinâmica e 3,6% para a estática. Destaca-se ainda que, no que se refere ao vento sintético, a análise dinâmica simplificada para esforços apresentou uma diferença significativa (aproximadamente 18%). Chavez (2006) salienta ainda que as acelerações e deslocamentos tem valores aceitáveis e muito próximos da

resposta característica. Outro ponto apontado é que os momentos máximos possuem uma divergência, e não podem representar o comportamento adequado. Esforços nas colunas são bem representados para valores máximos pela resposta do carregamento característico, mas isso não atende os valores mínimos. A pesquisadora ressalta que o carregamento característico não representa uma avaliação adequada dos esforços devido a uma excitação randômica, como é o caso da pressão do vento. Destaca ainda que o método estático da norma é o mais prático para dimensionamento de um edifício, entretanto só poderá ser usado em casos onde o efeito de flutuação do vento não cause vibrações e também não haja risco de ressonância, como é possível em pontes de grandes vãos e estruturas altas e esbeltas.

Manfrim (2006) objetivou em seu trabalho estimar os valores das distribuições de pressão nas paredes e telhados de uma edificação industrial sujeita a ação do vento. O autor utilizou o software comercial Ansys 9.0 considerando a interação fluido estrutura, ou seja a estrutura é deformável. Manfrim simulou a estrutura tridimensionalmente, sem nenhuma abertura. Foram determinadas distribuições de pressão para diferentes relações geométricas das dimensões da edificação. A inclinação do telhado foi mantida constante. As comparações dos resultados foram feitas com a NBR 6123/1988, objetivando verificar a viabilidade das simulações numéricas. O pesquisador conclui que os resultados apresentados pelo software para determinada edificação se mostraram coerentes aerodinamicamente. Os coeficientes de pressão a barlavento se mostraram bem próximos daqueles normatizados. Desta forma o autor conclui indicando a aplicação deste software em análise de interação fluido estrutura.

Borges, Paulo Junior e Rade (2007) apontam a utilização do software Ansys para interação fluido estrutura em diversas áreas da engenharia, uma vez que com o avanço da computação é possível realizar o acoplamento total dos efeitos. Os autores apresentam técnicas de modelagem fluido-estrutural e principais formas de realizar uma análise multi-física utilizando o software. Foi utilizado um modelo em que o escoamento aplicou uma única base de dados e múltiplos ambientes físicos. Borges et al destacam que em algumas simulações preliminares se observou a transferência dos dados entre o meio fluido e estrutural.

Cezana (2007) utilizou o software comercial Ansys- CFX em simulações de dispersão de poluentes em torno de um obstáculo cúbico. Foram utilizadas as equações de conservação (massa, momento, energia e espécie química). Os modelos de turbulência utilizados foram o $k-\epsilon$ padrão e o modelo de tensões de Reynolds baseado na equação de ω . Foi utilizado o método dos volumes finitos com malha não estruturada. Os resultados da simulação foram comparados com dados experimentais e simulações em túnel de vento existentes na literatura. A autora destaca que o modelo das tensões de Reynolds baseado na equação de ω , obteve de-

sempenho melhor do que o outro modelo, sendo o campo velocidade predito com maior acurácia no modelo de tensões de Reynolds. Neste trabalho é feito um teste de qualidade de malha onde sucessivos refinamentos locais nas proximidades do objeto são realizados de tal forma que o domínio fique com 100.000, 200.000 e 400.000 nós, destacando a autora as últimas malhas se mostrou dentro da acurácia.

Mendis et al (2007) destacam que o tratamento quasi-estático dado a edificações com pequenas alturas não pode ser utilizado em projetos de edifícios altos, uma vez que este tratamento pode resultar em erros e subestimativas, não levando em consideração efeitos dinâmicos da estrutura (efeitos de ressonância, aceleração, amortecimento, rigidez estrutural, entre outros), influência de outras estruturas, direção do vento e vento cruzado, que são fatores de grande importância no projeto das estruturas. Mendis et al(2007) ressaltam características de projeto de edifícios altos com complexidade levando em consideração efeitos do vento utilizando o código de vento australiano. Também foram destacados os ensaios em túnel de vento, e os efeitos deste em projetos de edifícios. Na simulação computacional foi utilizado o software comercial Ansys CFX 10.0. A velocidade do vento escoando foi de 40m/s e o modelo de turbulência adotado foi o SST (Shear Stress Transport). Os autores concluem que os efeitos do vento em edifícios altos podem resultar em ações dinâmicas. Respostas de vibrações lateral podem ser perceptíveis para os ocupantes da edificação, sendo possível a indicação, em projeto, de sistemas de amortecimentos de modo a reduzir estas vibrações para níveis aceitáveis. Níveis de resposta dinâmica também desempenham um papel importante no projeto da fachada.

Ferreira (2008) aborda uma série de conceitos sobre a ação do vento em edifícios altos, passando desde a circulação do vento na camada limite atmosférica até a interação com a estrutura. O estudo de caso foi um edifício real torre 01 do World Trade Center (WTC) e o software utilizado para as simulações computacionais foi o "ROBOT MILLENIUM v16.5". Foram aplicados os dois regulamentos do EUROCODE 1 para determinação de esforços e deslocamentos. Metodologias simplificadas foram utilizadas para quantificar os efeitos dinâmicos da estrutura com vista ao estudo do controle de vibrações naturais de edifícios altos excitados dinamicamente pela ação do vento. Algumas técnicas de controle de vibração são utilizadas, dentre elas, os amortecedores de massas sintonizadas (Tuned Mass Damper-TMD). Neste trabalho foi obtida a resposta ao longo do tempo e comparado a resposta dinâmica de um edifício sem sistema de controle de vibrações. A velocidade do vento considerada foi de 28m/s, a utilização de simplificações de ação das forças foi necessária, considerando a ação do vento como um vetor e aplicado em cada nó da estrutura. O autor destaca que em edifícios

altos, as forças de arrasto provocadas pela ação do vento podem atingir valores consideráveis, devendo desta forma, o projetista dedicar atenção especial à seu dimensionamento para o estado limite último. Ferreira conclui indicado a eficácia dos TMDs conseguindo uma redução nas acelerações e deslocamentos da edificação frente a ação do vento.

Braun e Awruch (2009) realizaram simulações aeroelásticas e aerodinâmicas em um edifício modelo utilizando técnicas de CFD de forma a demonstrar a aplicabilidade desta técnica na engenharia do vento. Os resultados do trabalho foram comparados com ensaios de túnel de vento. Na modelagem da turbulência os autores utilizaram o modelo LES para representar o escoamento incompressível do vento. Formulações em elementos finitos foram realizadas para análise estrutural e também para o escoamento. Para a interação fluido estrutura foi utilizado um acoplamento particionado. Em relação à análise aerodinâmica, coeficientes aerodinâmicos e medidas de pressão mostraram resultados satisfatórios à baixa turbulência. Braun e Awruch (2009) salientam que os resíduos (Root Mean Square - RMS) são mais sensíveis às condições de contorno no fluxo de entrada. As respostas encontradas foram melhores para modelo aeroelástico. O amortecimento estrutural gerou um maior resíduo (RMS) quando comparado a simulação sem o mesmo.

Dagnew, Bitsuamalk e Merrick (2009) aponta que as ferramentas da engenharia dos ventos ligadas a túneis de vento aplicada em modelos em escala reduzida são limitadas a testes em larga escala, medições em campo, testes de carga e pressão mecânica. Os autores destacam que a dinâmica dos fluidos computacional está sendo utilizada para realizar avaliação numérica do carregamento do vento na Engenharia do Vento computacional. Os pesquisadores salientam a atual possibilidade de realizar essas simulações devido ao avanço dos software e hardware e também avanço da modelagem numérica de avaliação de pressão de vento em edifícios altos. Foi usado o modelo CARRC (Commonwealth Advisory Aeronautical Council) indicado por Melbourne (1980) que é amplamente aplicado para estudar carga em edifícios altos em túnel de vento e geralmente é utilizado para calibração de técnicas experimentais. A simulação realizada utilizou modelo com as Equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS) e também simulações em larga escala (Large Eddy Simulation-LES). Testes iniciais são apontados de um escoamento em torno de um cubo, onde coeficiente de pressão calibrado com valores da literatura. Os autores destacam que a simulação em LES fornece resultados superiores que corroboram com os valores experimentais. Destacam ainda que o modelo RANS, k- ϵ RNG (Reynolds Normalization Group), apresentou melhores resultado que o k- ϵ padrão, além da precisão, ressaltam ainda a menor demanda computacional em comparação ao LES. Os pesquisadores apontam que em

fluxos com alto número de Reynolds, é indicado o uso de condição de não deslizamento (No-Slip) nas paredes do objeto, e ressaltam que o tratamento próximo a parede é de grande relevância para este tipo de simulação, sendo necessário o refino de malha nesta região. Dagnew, Bitsuamalk e Merrick ressaltam a constante discussão entre os resultados obtidos pela dinâmica dos fluidos computacional e também pelos ensaios em túnel de vento para a compreensão do estado da arte atual, sendo possível avaliar e prever o potencial numérico de carga do vento em abordagens para a utilização prática. Destacam ainda que o tempo de simulação tem relação com a acurácia, e que simulações em LES, são de grande importância.

Ribeiro (2009) realizou uma análise aerodinâmica em um edifício utilizando a dinâmica dos fluidos computacional comparando os valores de pressão com valores do edifício real. O caso real adotado pelo autor foi o edifício do Texas Tech nos Estados Unidos. De acordo com a altura do edifício, o autor considerou um número de Reynolds de $2,35 \times 10^6$. Ribeiro (2009) destaca que foi realizada uma análise de independência de malhas por método de extrapolação de Richardson, não detalhando como foi tal procedimento. O autor realizou simulações permanentes usando o modelo de turbulência k- ϵ RNG, nas quais indica uma precisão quando comparados aos valores reais. Em regime transiente, o pesquisador utilizou simulações de grandes escalas e o modelo de Smagorinsky. É destacada a impossibilidade de realizar simulações em DNS (Direct Numerical Simulation) devido ao alto custo computacional, devendo ser utilizado apenas em caráter teórico. O desvio padrão do coeficiente de pressão foi função da velocidade na entrada do domínio. O autor conclui que o tempo de processamento é fator oneroso e não permite variações de turbulência na entrada.

Maia (2011) estudou o comportamento de edifícios tipo pavilhões industrial (em aço) aplicando o software Ansys e implementando uma linguagem de programação como ferramenta para análises paramétricas. O trabalho se baseou na análise de uma viga para cargas estáticas e também na comparação de dois arranjos geométricos da viga analisada para a ação do vento. O autor optou por apenas dois dos 104 arranjos diferentes devido à sua importância nas simulações frente as demais. O objetivo do estudo foi a otimização de massa do elemento estrutural.

Pasqual (2011) aborda a interação fluido estrutura devido a ação do vento que resulta em instabilidades elásticas de estruturas flexíveis Neste trabalho foram utilizadas as membrana. O vento foi utilizado de acordo com o que prescreve a NBR 6123/1988, entretanto não há nesta norma esse tipo de estrutura (membrana). Para resolver este problema o autor simulou computacionalmente utilizando o software comercial Ansys 11.0. Para o acoplamento do vento foi utilizado um método parcial onde inicialmente o fluido escoou sobre a estrutura, que se

manteve rígida, em segundo instante os campos de pressões encontrados foram aplicados à estrutura, obtendo-se assim as tensões estáticas e deslocamentos, após isso foi atualizado o domínio do vento para a nova configuração (geometria) deformada e realizados novos processamentos, sucessivamente até que a variável de saída (deslocamentos e tensões) obtivesse um resíduo mínimo e desprezível. O autor conclui que devido a não existência de estruturas de membrana na norma vigente de ação do vento, e na impossibilidade de realizar ensaios em túneis de vento, os programas computacionais se mostraram bastante viáveis. O autor relata a desvantagem da simulação quanto ao tempo de processamento devido à necessidade de atualizações de malha e ajuste nos parâmetros de convergência, mas destaca que com o avanço computacional, novos métodos e novos software podem reduzir este problema. O autor aponta a necessidade de aplicar uma relação fluido estrutura com acoplamento total para calibrar este método.

Costa (2012) utilizou a dinâmica dos fluidos computacional para a simulação de um escoamento em um terreno variando a altura da rugosidade superficial para um escoamento de vento sobre uma geometria complexa. O autor utilizou escalas reduzidas para diminuição do custo computacional. Diferentes modelos de turbulência foram comparados para análise da convergência. Costa (2012) aponta um estudo de caso de determinado morro localizado em Vitória - ES. Foram utilizadas equações fundamentais da mecânica dos fluidos para resolução do escoamento. Neste trabalho foi utilizado o Software comercial Ansys Fluent 13.0 através do centro de supercomputação (CESUP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. O autor aponta a vantagem do software em simular formas complexas. Destaca ainda acurácia quando comparado a trabalhos de outros autores.

Guerra e Pravia (2012) utilizaram o software comercial Ansys-CFX em sua versão 12.1 para simular um edifício industrial sujeito a ações do vento cuja velocidade foi adotada conforme os valores preconizados na NBR6123/1988. Os autores defendem a velocidade do vento como um importante dado de entrada no projeto estrutural. Para o fluido no qual a edificação está inserida (ar), foram consideradas a incompressibilidade e isoterma do fluido. Os elementos de malha utilizados foram tetraédricos e o modelo de turbulência adotado foi o k-ε padrão. Como resultado foram feitas comparações entre os dados de resposta do Ansys e os valores apresentados por Blessmann (2004) para efeitos em telhados a quatro águas. Os resultados apresentados pelos autores foram de coeficientes de pressão, onde concluem que não houveram grandes discrepâncias com os dados apresentados por Blessmann (2004), entretanto, apontam discrepâncias para ventos de 60° e 90°. Com isto Guerra e Paiva apontam a eficiência do CFD na simulação numérica para obtenção de pressão na edificação.

Silva Filho (2012) objetivou a análise do comportamento estrutural estático e dinâmico de um edifício misto (aço e concreto) de 20 pavimentos submetido à ação dinâmica do vento não determinística. No modelo computacional foram utilizadas técnicas de discretização via métodos dos elementos finitos. O autor utilizou para este trabalho o programa Ansys. No estudo foi realizada a análise não linear geométrica para ações de serviço. A resposta dinâmica de deslocamentos e acelerações, obtida por solução numérica foi comparada a valores propostos em norma. O autor conclui seu trabalho apontando o modelo de carregamento que leva em conta o caráter não determinístico do vento, pois é o que melhor representa o comportamento complexo das ações do vento. Ou seja, as parcelas flutuantes da velocidade do vento são determinadas a partir dos espectros de potência do vento, desta forma, se torna possível estabelecer os históricos de carregamentos. Silva Filho destaca que o modelo utilizado representa bem o carregamento real do vento, uma vez que os valores foram confrontados com outros da literatura e encontrado resultado com boa acurácia.

Garcia (2013) realizou uma análise numérica e experimental do comportamento de estruturas em casca sobre ação do vento. A autora utilizou o software computacional Ansys CFX, aplicando o modelo de turbulência SST com vento incidente a 0, 90 e 180°. Foram confrontados os resultados da simulação computacional com modelos físicos construídos em laboratórios (túnel de vento). Garcia (2013) destaca que os dados numérico se mostraram bastante próximos aos experimentais, entretanto, aponta uma discrepância nas regiões de separação da camada limite. A autora ressalta como desvantagem o alto tempo computacional, envolvendo atualização de malhas e ajuste de parâmetros de convergência.

Toassi (2013) apresentou uma metodologia para obtenção de esforços devidos ao vento por meio de uma simulação transiente do escoamento a diferentes números de Reynolds (100; 150 e 200), utilizando a fluidodinâmica computacional. O autor comparou seus resultados com valores existentes na literatura, assim como na NBR 6123/1988. Neste trabalho foi utilizado o software comercial Ansys. Toassi simulou uma seção circular confrontando com trabalhos de Najafi et al (2012) indicando proximidades nos resultados. Nesta simulação o autor ressaltou as dificuldades com a parcela transiente, sendo necessário redução no passo de tempo (de 0,05s para 0,01s) . Em seguida o autor simulou o escoamento em torno de uma seção assimétrica em "L" (cantoneira). Toassi aponta a dificuldade em comparar com resultados, devido à indisponibilidade na literatura.

Diante deste levantamento, foi realizada a elaboração do Quadro resumo 1.2.

ANO	AUTOR	SÍNTESE DA OBRA
2000	Lima	Simulação em edificações tipo prédios residenciais e galpões industriais utilizando o Ansys/Flotran. Resultados foram comparados a valores de norma
2004	Seraphin	Simulação em aerofólio utilizando o Software comercial Ansys/Flotran, os resultados foram confrontados a valores experimentais.
2006	Chavez	Análise dinâmica de edificação sob ação do vento utilizando software Ansys. Os resultados foram comparados a valores prescritos em norma.
2006	Mafrim	Simulação computacional do vento em um galpão industrial utilizando o software Ansys. Os resultados foram comparados a valores de norma.
2007	Borges et al	Elaboração de um banco de dados para a avaliação da iteração fluido estrutura utilizando o Ansys.
2007	Cezana	Simulação da dispersão de poluentes com o software Ansys- CFX. Os resultados foram comparados a dados experimentais.
2007	Mendis et al.	Simulação computacional utilizando o Ansys -CFX para análise do tratamento quasi-estático. Resultados foram comparados à experimentais.
2008	Ferreira	Utilização do software Robot Millenium v16.5 para realizar simulações da ação do vento em edificações reais sob efeito de amortecedores. Foram utilizados dados experimentais para validação dos resultados.
2009	Braun e Awruch	Aplicação de código computacional próprio para simulação do escoamento do vento em torno de edifícios utilizando formulações em elementos finitos. Os resultados foram validados com ensaios de túnel de vento.
2009	Dagnew et al.	Elaboração de códigos próprios utilizando CFD, aplicada a um edifício modelo com valores experimentais.
2009	Ribeiro	Simulações em edificações modelo utilizando o software Ansys CFX. Os resultados foram validados com dados experimental.
2011	Maia	Simulação em edifícios industriais tipo Pavilhão utilizando o Ansys-CFX.
2011	Pasqual	Análise da iteração fluido estrutura em corpo flexíveis simulando através do software Ansys 11.0.
2012	Costa	Simulação de escoamento em terreno para análise da rugosidade superficial utilizando o software comercial Ansys fluent. Resultados foram comparados à dados de medições no local.
2012	Guerra e Pravia	Simulação de ação do vento em edifício industrial tipo galpão utilizando o Ansys CFX. Os resultados foram comparados com valores prescritos na NBR6123/1988.
2012	Silva Filho	Análise do escoamento do vento em torno de um edifício misto (aço e concreto) utilizando o software comercial Ansys. Valores foram confrontados com disponíveis os na literatura.
2013	Garcia	Simulação do vento entorno de estruturas tipo casca, utilizando o software Ansys CFX e confrontado com ensaios de túnel de vento.
2013	Toassi	Escoamento do vento em torno de diversas estruturas utilizando o Ansys CFX. Os resultados foram comparados com valores de norma e resultados obtidos por outros autores.

Quadro 1.2 - Síntese das principais contribuições da literatura

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos deste trabalho foram classificados como geral e específico conforme:

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo o cálculo, através da dinâmica dos fluidos computacional, de coeficientes aerodinâmicos para estruturas sob escoamento do vento.

1.3.2 Objetivos específicos

Busca-se também neste trabalho aplicações práticas e criações de procedimentos para simulações conforme indicam os objetivos secundários:

- Realizar simulações de escoamento do vento em torno de estruturas, objetivando aquisição de: força nodal e global da estrutura e coeficiente de arrasto na estrutura utilizando ferramentas computacionais;
- Elaborar uma metodologia progressiva para simulação computacional de escoamento em torno de estruturas bidimensionais e tridimensionais utilizando a dinâmica dos fluidos computacional;
- Simular seções típicas usadas na literatura;
- Simular escoamentos em estruturas cujas dimensões não são conhecidas na literatura e posterior confronto com valores de ensaios em túnel de vento e também normatizados.

1.4 METODOLOGIA PROPOSTA

Buscando-se alcançar os objetivos citados anteriormente, a simulação partirá de uma situação simples, escoamento bidimensional em um sólido idealizado, e evoluindo nos modelos até atingir o caso real, uma edificação submetida ao vento preconizado em norma. Para adquirir confiança nos modelos foi realizada um procedimento progressivo, conforme ordem descrita abaixo.

ETAPA 1- Escoamento bidimensional:

- 1- Escoamento em torno de um sólido bidimensional com dimensões ideais e vento idealizado, objetivando facilitar a calibração de acordo com valores existentes na literatura;
- 2- Escoamento em torno de um sólido bidimensional com dimensões reais de uma estrutura (aqueduto), entretanto com o mesmo vento idealizado citado no item anterior;
- 3- Escoamento em torno da estrutura real citado no item anterior, entretanto desta vez com valores reais para o vento, aproximando-o da situação real.

ETAPA 2- escoamento tridimensional:

4- Escoamento em torno de um sólido tridimensional com dimensões ideais unitárias, ou seja, um cubo. Sujeito a um escoamento idealizado, com ventos idealizados objetivando a calibração de acordo com valores existentes na literatura, similar ao item 1.

5- Escoamentos em torno de um sólido com dimensões reais da estrutura (Edifício), entretanto com vento idealizado, conforme o item anterior (4).

6- Escoamento em torno da estrutura com dimensões reais e submetida a ventos reais.

Considera-se:

Dimensões ideais: Sólido com dimensões unitárias, todos os lados tem 1,00 m.

Dimensões reais: Sólido com dimensões reais, ou seja, é a estrutura propriamente dita, neste trabalho foi utilizado um aqueduto e um edifício.

Ventos ideais: Consideração de uma massa de ar a 25°C com todos os parâmetros unitários, dentre eles, a massa específica, viscosidade, etc. A velocidade do fluido terá seu valor a depender de cada escoamento, para reproduzir o número de Reynolds desejado.

Ventos reais: Considera todas as informações reais de acordo com o vento ao qual a estrutura estará submetida, para mensurar a velocidade utiliza-se os valores de norma.

A Figura 1.2 descreve a evolução da modelagem para o escoamento bidimensional.

Características do Escoamento	Geometria submetida à ação do vento	
Escoamento Bidimensional		
Escoamento do vento em torno de uma geometria quadrada. Foi possível verificar a consistência dos resultados obtidos a partir de valores disponíveis na literatura conforme Çengel e Cimbala (2007).		1
Escoamento do vento em torno de uma geometria retangular. Foi possível verificar os resultados obtidos com valores indicados na NBR 6123.		2
Escoamento do vento em torno do objeto de estudo bidimensional, neste caso um aqueduto. Este caso não possui referencial para o valor do coeficiente de arrasto.		3

Figura 1.2 –Evolução na Modelagem- Escoamento bidimensional

A partir deste escoamento, foi possível avançar para o modelo para um escoamento tridimensional, conforme os modelos propostos na Figura 1.3.

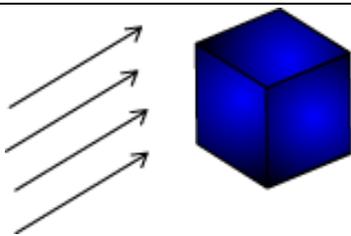
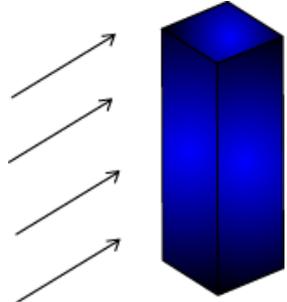
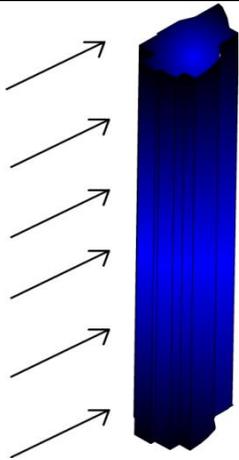
Características do Escoamento	Geometria submetida à ação do vento	
Escoamento Tridimensional		
Escoamento do vento em torno de um cubo. Foi possível verificar a consistência dos resultados obtidos a partir de valores disponíveis na literatura conforme Çengel e Cimbala (2007).		4
Escoamento do vento em torno de uma geometria tetragonal. Nesta etapa foram elaborados Figuras simulando edifícios com geometria simples. Foi possível verificar os resultados obtidos com valores indicados na NBR 6123.		5
Escoamento do vento em torno do objeto de estudo tridimensional, neste caso um edifício real. Foi possível verificar os resultados com aqueles obtidos em ensaio de túnel de vento e valores de acordo com a NBR6123/1988 para tal edificação.		6

Figura 1.3 –Evolução na Modelagem- Escoamento tridimensional

A simulação do escoamento considera a resolução completa das equações de Navier-Stokes. Neste trabalho será utilizado o software comercial Ansys-CFX, escolhido a partir da vasta utilização conforme o quadro 1.1. Este software utiliza o método dos volumes finitos baseado em elementos. Além de resolver as equações de Navier-Stokes, também é possível acrescentar termos para resolver os efeitos da turbulência. Conceitos referentes ao Ansys serão aprofundados nas próximas seções.

1.5 LIMITAÇÕES

As simulações numéricas possuem limitação inerentes, dentre elas, destaca-se o custo computacional. Para a simulação das menores escalas de comprimento, bastante tempo de processamento seria necessário, entretanto neste trabalho se buscou o uso de computadores domésticos para realizar tais simulações, requerendo desta forma simplificações quando possíveis e isentas de influenciar nos resultados.

Post (2013) destaca que os códigos computacionais atuais possuem uma enorme quantidade de dados produzidos, e devem ser escolhidas as regiões de interesses para se expressar os resultados corretos.

1.5.1 Erros

Quanto aos erros, esses tipos de simulação constam basicamente de procedimentos suscetíveis, que são: modelagem, discretização e interação. Onde podem haver:

- a) Erros no modelo adotado;
- b) Erros nos dados do problema (condições de contorno, propriedades dos materiais entre outras físicas do problema.);
- c) Erros de descuido (ou fortuito);
- d) Erro de arredondamento;
- e) Erros de aproximação ou numérico (associado a discretização);
- f) Representação de geometrias complexas;
- g) Interpretação dos resultados.

Os erros numéricos, conforme aponta Post (2013) são oriundos da discretização das células das malhas que possuem dimensão finita e são utilizadas para mapear funções contínuas. Já os erros de modelagem, o autor descreve que, surgem a partir de casos em que a mecânica dos fluidos básica não está completa, tais como a turbulência, o comportamento da viscosidade de fluidos complexos, e a interação entre múltiplos fluidos.

Segundo Ribeiro (2009) os erros sistemáticos das soluções numéricas causados pela modelagem são oriundos da diferença entre o escoamento real e a solução exata do modelo matemático. O autor aponta ainda os erros de iteração causa pela diferença entre as soluções iterativas e as soluções exatas do sistema algébrico.

Para Ribeiro (2009) os erros causados pela modelagem da turbulência são de grande importância relacionadas ao custo-benefício da simulação, uma vez que maiores refinamentos de malha acarretarão maiores custos computacionais.

1.5.2 Capacidade computacional

Conforme já citado anteriormente, para a execução das simulações numéricas desta dissertação foram utilizados dois computadores domésticos. Sendo o primeiro para as malhas com menor número de elementos como foram os casos bidimensionais, já o segundo foi aplicado às simulações tridimensionais. O tempo de processamento relatado neste trabalho será computado com base no computador 2, sendo feita uma correlação aproximada apenas para mensurar o custo computacional. A correlação foi realizada a partir de duas simulações idênticas realizadas em ambas as máquinas, que trabalharam em regime exclusivo para o software, a primeira com 3 núcleos e a segunda com 7 núcleos, ao final foi verificado que o tempo de processamento da CPU 01 é o dobro da 02. Logo, será utilizada a 02 apenas para explicar o tempo, sabendo que na pior situação (Computador 01) gastaria o dobro do tempo.

1- Processador Core (TM) i5 - 3337U 1.80GHz com 4 núcleos de processamento

Memória de 6,00GB

Sistema operacional de 64Bits

Hd de 500GB

2- Processador Core (TM) i7 - 4770 3.40GHz com 8 núcleos de processamento

Memória de 8,00GB

Sistema operacional de 64Bits

Hd de 1TB

Mesmo em máquinas com grandes números de núcleos de processamento não se pode utilizar todos na simulação computacional, pois o sistema operacional requer o funcionamento enquanto o Software de simulação está processando, desta forma foram dedicados nas simulações 3 núcleos para a primeira máquina e 7 núcleos para a segunda.

Este trabalho objetivou realizar simulações simplificadas com duração aproximada de um dia. Muitas vezes se encontra na literatura citações de tempo de simulação da ordem de dezenas de horas em computadores de alto desempenho, entretanto não foi possível utilizar dessa metodologia, uma vez que estes computadores não são utilizados por projetistas. Conforme cita Lima (2003) uma simulação computacional com esta finalidade deve fornecer resultados para 4 a 8 horas de processamento, sendo que o primeiro intervalo de tempo permite ao analista utilizar os dados no mesmo dia, já as maiores simulações devem ser preparadas em uma tarde com processamento até o dia seguinte, e desta forma na manhã deste dia, já irão existir os dados suficientes para a análise.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste tópico será detalhada a estrutura escolhida para melhor abordar este trabalho de maneira a torná-lo mais acessível ao leitor.

Neste capítulo foi explanada a introdução ao estudo aerodinâmico de edificações, destacando a necessidade de seu estudo. Também foi destacada a síntese das principais contribuições de autores sobre tal tema. Foram explanados ainda os objetivos específicos e geral. Em seguida foi descrita a metodologia adotada para o trabalho, ou seja, quais os modelos criados para as simulações computacionais. Posteriormente foram descritas as limitações do método, dentre elas os erros e capacidade computacional.

No capítulo 2 será realizado o referencial teórico, conforme os principais autores, onde serão descritos todos os conceitos ligados ao fluido, partindo de sua definição e chegando ao escoamento descritos pelas equações de Navier-Stokes. Ainda neste escoamento destacaremos fenômenos importantes neste estudo como o arrasto, sustentação e turbulência. Por último serão descritos métodos de solução numérica do sistema de equação.

No capítulo 3, será aprofundado conceitos da dinâmica dos fluidos computacional, passando pelos conhecimentos iniciais e chegando aos modelos de turbulência. Ainda neste Seção, será analisada a influência da camada limite.

No capítulo 4 será analisado o que prescreve a atual norma brasileira de ação do vento, a NBR 6123/1988. Serão verificados os principais conceitos da norma e explanado suas prescrições quando ao estudo aerodinâmico de edificações.

No capítulo 5 serão descritas as características do software, relatando todas as suas etapas. Todos os passos serão detalhados objetivando uma futura repetição por uma pessoa, que não necessariamente seja da área da dinâmica dos fluidos.

O capítulo 6 conterà detalhes da simulação computacional. Neste serão relatados os passos a partir dos modelos adotados, ou seja, estruturas idealizadas (criadas) e reais, tanto bidimensional quanto tridimensional. Serão realizados testes de convergência e independência de variáveis, dentre elas, geométricas, físicas e malhas. Em seguida os resultados serão analisados.

O trabalho será concluído com o capítulo 7, com uma análise global das simulações e as considerações sobre seus resultados. Contribuições e recomendações serão apontadas neste capítulo.

2. ELEMENTOS BÁSICOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

2.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo serão abordados os conceitos iniciais sobre os fluidos em escoamentos. As propriedades também serão detalhadas para este estado da matéria, bem como os movimentos das partículas e as tensões atuantes. Para o escoamento, o estudo será direcionado para os fluidos Newtonianos incompressíveis e isotérmicos em estado transiente.

2.2 DEFINIÇÕES E PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

Conforme aponta White (2011), Çengel e Cimbala (2007), acerca da mecânica dos fluidos, na natureza a matéria se apresenta em dois estados: o sólido e o fluido (líquido e gasoso a depender da pressão e temperatura). Sendo o sólido o único capaz de resistir a tensões de cisalhamento (ou tangencial) por deflexões estáticas. O fluido sujeito a uma tensão de cisalhamento, não importando o quão pequena ela seja, é deformado continuamente. Nos sólidos a tensão de cisalhamento é proporcional à deformação, enquanto que nos fluidos ela é proporcional à taxa de deformação. Pode-se analisar que uma tensão de cisalhamento constante aplicada a um sólido cessará a deformação em um determinado ângulo de deformação fixo enquanto que o fluido continuará deformando, tendo sua taxa tendendo a um valor constante. Um fluido, quando em repouso, está em um estado de tensão de cisalhamento igual a zero, em análise estrutural este estado é denominado: Estado Hidrostático de Tensão. Segundo White (2011), os líquidos são compostos por moléculas relativamente agrupadas com forças coesivas fortes, que tendem a manter o volume e quando não confinados na parte superior, formam uma superfície livre e são dominadas pelo campo gravitacional. Já os gases possuem suas moléculas amplamente espaçadas e com forças coesivas desprezíveis, isto torna o gás um estado livre para a expansão, sendo limitado pela parede que o confina. Quando o gás não tem volume definido formará uma atmosfera essencialmente hidrostática. Outra denominação comumente utilizada na literatura é o termo "vapor", que significa um gás acima da temperatura crítica e próximo do estado de condensação. White (2011) salienta que o ar a temperatura ambiente é considerado gás, por ter em sua composição a maior parte de nitrogênio cujo ponto crítico é a temperatura $T_C = 647\text{K}$ e pressão $p_C = 34\text{atm}$.

Çengel e Cimbala (2007) apontam que nos sólidos as ligações intermoleculares são mais fortes devido ao agrupamento próximo, já nos gases são mais fracas devido ao espaçamento molecular. As moléculas em um sólido são arranjadas num padrão que se repete por todo o corpo, devido ao pequeno espaço e grande força entre moléculas. Similar ao sólido, no

estado líquido as moléculas possuem forças de atração intermolecular, entretanto não mais posições fixas, podendo girar e transladar a qualquer instante. Nos gases não existe ordem das moléculas, pois estão distantes umas das outras, considerando distante em relação ao tamanho da molécula. O movimento molecular e aleatório dos gases proporciona a colisão das moléculas umas contra as outras e contra as paredes do recipiente que as confina.

A matéria é constituída de átomos, e em alguns estados, esses possuem espaçamentos, como nos gases. Sendo assim é conveniente considerar uma parte da matéria como contínua, homogênea e sem vazios, isto é denominado de meio contínuo. Esta hipótese é válida contanto que o tamanho da escala de interesse seja suficientemente superior ao espaço entre moléculas. Este conceito está implícito na maioria das aplicações práticas em engenharia, isso pode ser visto ao considerar a densidade do concreto uniforme em qualquer ponto.

Dentre as propriedades de um fluido se destaca as variáveis termodinâmicas (pressão, temperatura e massa específica) e as variáveis secundárias que caracterizam os comportamentos mecânicos dos fluidos. As principais propriedades serão descritas a seguir:

2.2.1 Massa Específica

A massa específica é representada pela letra grega ρ , é a massa de um fluido pela sua unidade de volume. Nos gases a massa específica é muito variável e mantém relação proporcional com a pressão e temperatura. White (2010) destaca que a massa específica para o fluido macroscópico (Meio contínuo) deverá ser considerada conforme a Eq. (2.1) já mencionado anteriormente. A unidade da massa específica no Sistema internacional de Unidade (SI) é dada em Eq. (2.1).

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad [\rho] = \left[\frac{kg}{m^3} \right] \qquad (2.1)$$

2.2.2 Peso Específico

O peso específico de um fluido é representado pela letra grega γ , esta grandeza é a relação entre o peso e o volume, dado pela Eq. (2.2).

$$\gamma = \frac{W}{V} \qquad (2.2)$$

A unidade do peso específico no S.I. é $[\gamma] = \left[\frac{N}{m^3} \right]$. O peso específico pode ser relacionado com a massa específica conforme a Eq. (2.3), sendo a gravidade uma razão de proporcionalidade entre ambos e cujo valor considerado é de $g = 9,807m/s^2$.

$$\gamma = \rho \cdot g \qquad (2.3)$$

2.2.3 Densidade

Representado pela letra d , a densidade é a relação entre a massa específica do fluido e a massa específica de um fluido padrão. Nos líquidos comumente se utiliza a água a 4°C, nos gases, se utiliza o ar a 25°C. Desta forma é possível escrever as equações (2.4) e (2.5). Nota-se, como as massas específicas detêm a mesma unidade, a densidade é adimensional.

$$d_{gás} = \frac{\rho_{gás}}{\rho_{ar}} = \frac{\rho_{gás}}{1,205 \text{ kg/m}^3} \quad (2.4)$$

$$d_{Líquido} = \frac{\rho_{Líquido}}{\rho_{água}} = \frac{\rho_{gás}}{1.000 \text{ kg/m}^3} \quad (2.5)$$

2.2.4 Pressão

Çengel e Cimbala (2007) salientam que a pressão em fluidos é uma força normal por unidade de área. Esta grandeza se refere a tensão de compressão em um ponto no fluido estático. White (2010) destaca que a pressão, assim como a velocidade são as variáveis mais importantes na mecânica dos fluidos. O autor salienta que em escoamento de fluidos em conduto fechado, a pressão tem relação direta para escoamento em altas velocidades.

2.2.5 Temperatura

Nível de agitação das moléculas. Esta medida representa uma ordem de grandeza da energia molecular oriunda da energia térmica fornecida aos fluidos. Sua unidade é K (Kelvin) no SI e °C (Celsius) comumente encontrado em equipamentos e instrumentos de medição.

2.2.6 Velocidade

Para uma correta definição de velocidade, se faz necessário considerarmos inicialmente o referencial. Çengel e Cimbala (2007) apontam as descrição lagrangeana e euleriana. Na primeira, as leis de Newton descrevem o movimento e é possível prever suas trajetórias e como ocorrerão as trocas de energia e momento. Nesta abordagem, a cinemática acompanha o vetor posição do objeto, $\vec{x}_a, \vec{x}_b, \vec{x}_c$ e o vetor velocidade $\vec{V}_a, \vec{V}_b, \vec{V}_c$ que é uma função do tempo. Salientando que a velocidade de um corpo (com componentes cartesianas u, v, w) é a variação do espaço por variação de tempo, de acordo com a Eq. (2.6). No caso dos fluidos, a velocidade é influenciada pela distância à parede em movimento ou em repouso. Esta propriedade será tratada mais detalhadamente adiante em tópicos especiais.

$$u = \frac{dx}{dt}; v = \frac{dy}{dt}; w = \frac{dz}{dt} \quad (2.6)$$

Os vetores espaço e velocidade podem ser vistos conforme a Figura 2.1.

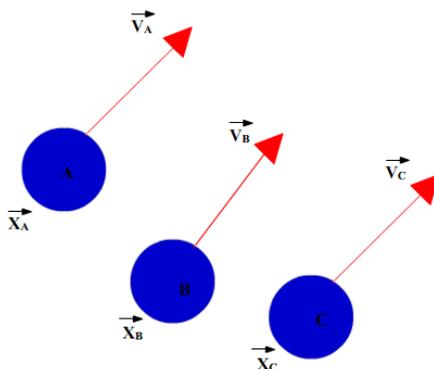


Figura 2.1 – Vetor velocidade e espaço.

Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2007)

A descrição lagrangeana é semelhante à análise de sistemas onde segue-se uma massa de identidade fixa. Os autores apontam uma dificuldade deste método para descrever o movimento dos fluidos, uma vez que não é possível prever a identidade de partículas em movimento, assim como é possível prever o deslocamento de um automóvel, uma queda de um objeto ou até mesmo a trajetória de um projétil. Outra dificuldade enfrentada é que o fluido, do ponto de vista macroscópico, é um contínuo, conforme já citado anteriormente, isto dificulta as interações entre objetos, mais facilmente seria descrito em objetos distintos, como um projétil colidindo em um obstáculo. Outra dificuldade enfrentada no movimento dos fluidos é a deformação de suas porções, que ocorrem continuamente ao movimento. Mesmo com essas dificuldades, a descrição lagrangeana é bastante utilizada para controles de escalares passivos em um escoamento, reentrada de nave espacial na terra, dinâmica de gases rarefeitos, medição de escoamento com base na imagem de partículas entre outros.

Mesmo a descrição lagrangeana sendo bastante útil, um método mais comum e eficaz no escoamento de fluidos, de acordo com Çengel e Cimbala (2007), é a descrição euleriana. Nesta há a definição de um volume finito, chamado volume de controle (VC) ou domínio de escoamento, onde o fluido escoava para dentro ou para fora. Com isto não é necessário acompanhar uma identidade de massa, apenas as variáveis de campo, funções do espaço e do tempo dentro do volume de controle. O autor salienta que o campo de pressão Eq. (2.7) é uma variável de campo escalar e que em escoamentos tridimensionais em regime não permanente podem ser explicitados em coordenadas cartesianas. Como variável de campo vetorial, temos o campo de velocidade e campo de aceleração conforme Eqs. (2.8) e (2.9) respectivamente.

$$P = P(x, y, z, t) \quad (2.7)$$

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t) \rightarrow \vec{V} = \vec{V}(u, v, w) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k} \quad (2.8)$$

$$\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t) \quad (2.9)$$

A Figura 2.2 apresenta o volume de controle para análise do escoamento.

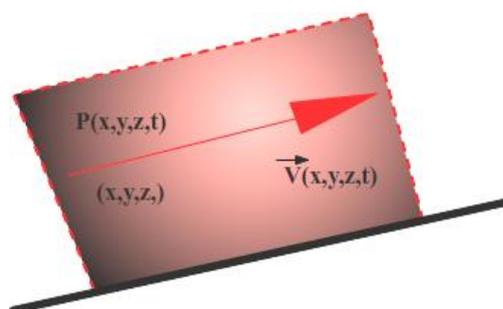


Figura 2.2 – Distribuição dos campos vetoriais e escalares no volume de controle.

Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2007)

2.2.7 Viscosidade

Segundo White (2010) esta propriedade é a mais importante do fluido. É uma medida quantitativa da resistência ao escoamento neste estado. Para um dado fluido em movimento, sua taxa de deformação por cisalhamento pode ser relacionado a tensões locais em um elemento do fluido.

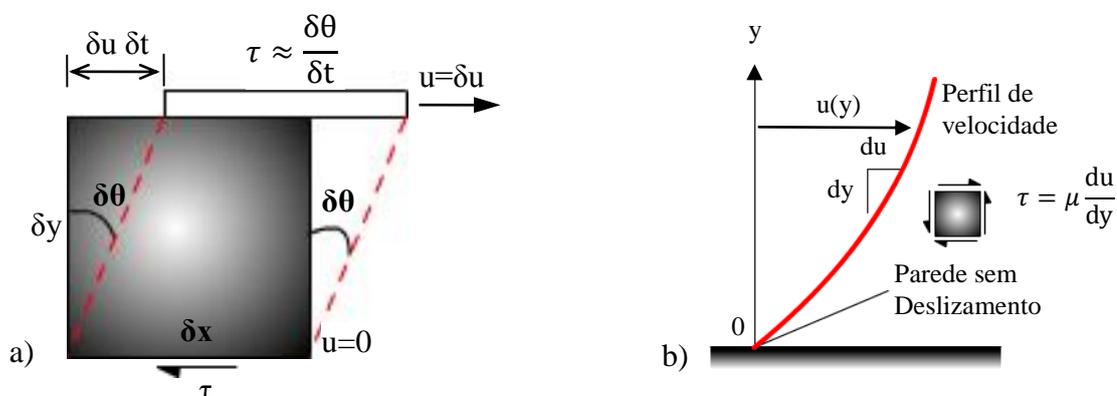


Figura 2.3 – Deformações Tangenciais causadas pela tensão de cisalhamento: a) elemento de fluido deformado; b) Distribuição de velocidade.

Fonte: Adaptada de White (2010)

Para uma certa tensão de cisalhamento (τ) em um plano de um fluido conforme a Figura 2.3.a, seu ângulo de deformação ($\delta\theta$) aumentará continuamente resultando no deslocamento da superfície deste a uma velocidade (δu) que será maior que a velocidade da superfície oposta. No ar, água e óleo por exemplo, há uma proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e as demais grandezas citadas, conforme a Eq. (2.10).

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta u} \quad (2.10)$$

Da Figura 2.3.a é possível obter a tangente de $\delta\theta$ analisando a variação infinitesimal:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\delta\theta) &= \frac{\delta u \delta t}{\delta y} \\ \operatorname{tg}(\theta) &\approx \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{du}{dy} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Fluidos lineares são chamados de Newtonianos quando seguem a equação da tensão de cisalhamento como descrito na Eq. (2.12). Esses fluidos são análogos aos sólidos elásticos regidos pela lei de Hooke, onde a tensão é proporcional a deformação. Çengel e Cimbala (2007) destacam que muitos fluidos podem ser considerados como Newtonianos, tais como, o ar e outros gases, a água, querosene, gasolina e outros líquidos à base de óleo.

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.12)$$

Sendo μ a viscosidade do fluido cuja dimensão é dada por $[\mu] = \left[\frac{kg}{m.s} \right]$. Esta grandeza é conhecida também por viscosidade dinâmica ou absoluta. A viscosidade é função da pressão e temperatura. Para um mesmo fluido a pressão e temperatura constantes, a viscosidade também se comportará como tal.

Na mecânica dos fluidos o ângulo θ não é considerado, objetivando os estudos para a distribuição de velocidade $u(y)$ ou sendo explicitado $V(x,y,z,t)$ em um fluido.

Na Figura 2.3.b é possível observar ainda a indicação de uma camada limite, que é uma região onde os efeitos viscosos são acentuados, gerada próximas as paredes, quanto mais próxima destas, maior será a tensão cisalhante, sendo proporcional a inclinação do perfil de velocidade. Na parede a velocidade (u) do fluido é nula, essa condição é chamada de “Condição de não escorregamento”. Segundo Ferreira (2008) a camada limite é uma característica muito importante no estudo de escoamentos de fluido. Destaca o autor que para uma seção transversal qualquer a velocidade do fluido varia de zero, nas proximidades do objeto, à U distante deste, que é a velocidade à montante do objeto e longe de sua influência. O autor afirma que esta variação de velocidade e desaceleração ocorrem por ação da viscosidade que influencia as camadas sucessivas do fluido, e desta forma deve ser considerada uma região de influência viscosa. No caso da engenharia do vento, o fluido em questão é o ar, e tem baixa viscosidade. Ferreira (2008) destaca que com o aumento do número de Reynolds, haverá uma redução da zona afetada pela viscosidade o que resulta em maiores gradientes de velocidade e tensões de cisalhamento nas proximidades do objeto. Essa zona, quando atinge pequenas espessuras toma a forma de uma camada, isto justifica sua denominação.

Çengel e Cimbala (2007) destacam que analogamente à viscosidade representar a dificuldade de escoamento nos fluidos, o coeficiente de atrito representa a dificuldade de movimento entre sólido e sólido. A dificuldade de escoamento de um corpo imerso em um fluido ou seja, movimento sólido e líquidos surgem forças resistivas denominada Força de Arrasto, presente na navegação de uma embarcação, o ar percorrendo a asa de um avião, um misturador de determinado fluido, entre outros casos.

2.2.8 Vorticidade e rotacionalidade

Conforme cita Çengel e Cimbala (2007), um elemento de fluido ao ser deformado e rotacionado em torno de um ponto P, pode ser analisado a partir da Figura 2.14. Nessa figura α_a e α_b refere-se aos ângulos formados entre as retas a e b, respectivamente e as componentes do elemento após sua rotação

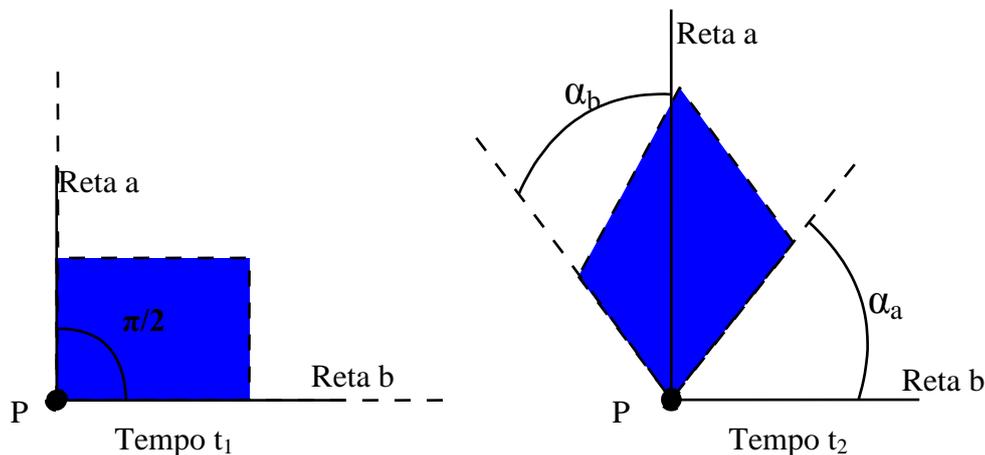


Figura 2.4 –Rotação em um elemento de fluido.

Fonte: Adaptada de Çengel e Cimbala (2007)

A taxa de rotação do elemento de fluido, pode ser obtida com a Eq. (2.13). Nesta equação o termo $(\alpha_a + \alpha_b)/2$ representa o ângulo médio de rotação e ω a velocidade angular no plano xy. Expandindo para uma situação tridimensional, é possível analisar o vetor rotação, expresso em coordenadas cartesianas, conforme visto em (2.14).

Segundo os autores, a vorticidade é a medida da rotação de uma partícula fluida. Esta grandeza é definida matematicamente pela Eq. (2.15).

$$\omega = \frac{d}{dt} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.13)$$

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2.14)$$

$$\vec{\zeta} = \vec{\nabla} \times \vec{V} = \text{rot}(\vec{V}) = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (2.15)$$

Çengel e Cimbala (2007) destacam que a vorticidade é o dobro da velocidade angular ($\vec{\omega}$) de uma partícula de fluido, podendo ser descrita pela Eq. (2.16).

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} \times \vec{V} = \frac{1}{2} \text{rot}(\vec{V}) = \frac{\vec{\zeta}}{2} \quad (2.16)$$

A partir da Eq. (2.14) é possível escrever o vetor vorticidade em coordenadas cartesianas através da Eq. (2.17).

$$\vec{\zeta} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2.17)$$

2.2.9 Número de Reynolds

White (2010) aponta que comportamentos viscosos de todos os fluidos Newtonianos são correlacionados pelo parâmetro denominado: Número de Reynolds (Re). Este parâmetro é ilustrado na Eq. (2.18).

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.18)$$

Sendo:

ρ - massa específica do fluido;

V - Velocidade média do fluido;

D –Dimensão (ou diâmetro) característico do corpo imerso, alguns autores utilizam a letra L para representar este valor;

μ - viscosidade dinâmica do fluido.

ν - Viscosidade Cinemática do fluido

De acordo com White (2010) a primeira ação de um engenheiro da área de fluidos é estimar o intervalo do número de Reynolds, pois para Re muito baixo indica movimento viscoso muito lento, número de Reynolds moderados indica escoamentos laminares com variação suave. Já para Re alto provavelmente indica escoamentos turbulentos, que mesmo variando lentamente com o tempo, impõe fortes flutuações. Segundo White (2010) e Pereira (2010) não é possível definir qual o número limita a transição entre escoamentos laminares e turbulento, dependendo da geometria do escoamento. Segundo Saito e Morooka (2010) na dinâmica dos fluidos computacional (Conceito que será futuramente abordado neste trabalho) para número de Reynolds abaixo de 2000 pode ser considerado laminar, caso contrário pode ser considerado turbulento.

2.3 ABORDAGEM INTEGRAL DO ESCOAMENTO

White (2011) destaca que ao analisar o movimento de um fluido é possível adotar duas alternativas: abordagem diferencial e integral. Sendo a primeira a descrição detalhada do escoamento em cada ponto (x,y,z) do campo. Já na segunda utiliza-se uma região infinitesimal, realizando-se um balanço dos escoamentos que entram e saem, determinando assim os efeitos globais, entre eles, força, torque e troca de energia. Essa segunda descrição faz referência ao volume de controle.

2.3.1 Sistema e Volume de Controle (VC)

Segundo White (2011), um sistema é uma quantidade de massa de identidade fixada, desta forma essa grandeza conserva-se e não se altera. Ao se analisar um volume de controle (VC), utiliza-se as leis de um sistema, sendo necessário pequenas adaptações para uma região específica que o sistema pode ocupar em determinado instante. Em um escoamento o sistema prossegue e novos sistemas irão ocupar seu lugar. As leis básicas são reformuladas para que se apliquem nesta região local, o VC. Será importante conhecer os campos de pressão e velocidade neste volume, longe dele não será necessário.

As leis da mecânica estabelecem alguns conceitos matemáticos para quando ocorre interação entre o sistema e sua vizinhança, conforme as conceituações a seguir:

- I- Parte-se de um sistema, que por definição detém a conservação da quantidade de massa.

$$m_{sist} = Constante$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (2.19)$$

II- Sabendo que as vizinhanças do sistema exercem uma força \mathbf{F} , a segunda lei de Newton indicará que a massa no sistema é acelerada, conforme Eq. (2.20).

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{V}) \quad (2.20)$$

Na mecânica dos fluidos a segunda lei de Newton é chamada de relação da quantidade de movimento linear. Destaca-se que a força indicada na Eq. (2.20) é uma grandeza vetorial, possuindo componentes conforme a Eq. (2.21), em sistema de coordenadas cartesianas.

$$\begin{aligned}\vec{F} &= (F_x, F_y, F_z) \\ F_x &= ma_x \\ F_y &= ma_y \\ F_z &= ma_z\end{aligned}\tag{2.21}$$

III- Se a vizinhança exercer um momento resultante (\mathbf{M}) em relação ao centro de massa do sistema haverá um efeito de rotação, também denominado de relação da quantidade de movimento angular conforme Eq. (2.22).

$$\vec{M} = \frac{d\vec{H}}{dt}\tag{2.22}$$

Sabe-se que o momento resultante também é uma grandeza vetorial e analogamente a Eq. (2.21) será escrita na Eq. (2.23) para um vetor tridimensional.

$$\vec{M} = (M_x, M_y, M_z)\tag{2.23}$$

Sendo \vec{H} o vetor quantidade de movimento angular do sistema em relação ao seu centro de massa e dado na Eq. (2.24). Nesta equação, \vec{r} é o vetor posição da partícula.

$$\vec{H} = \sum (\vec{r} \times \vec{V})\delta m\tag{2.24}$$

White (2011) destaca que em algumas situações \vec{H} assume valores de grande complexidade e com diversos termos, desta forma o autor destaca que a dinâmica elementar trata o corpo rígido girando apenas em torno de um eixo fixo (adotado o eixo x), reduzindo a Eq. (2.24) para a Eq. (2.25), onde ω_x é a velocidade angular do corpo e I_x é o momento de inércia de massa do corpo em relação ao eixo x.

$$M_x = I_x \frac{d}{dt}(\omega_x)\tag{2.25}$$

IV- Primeira lei da termodinâmica- Ao se transferir uma quantidade de calor δQ_{Calor} ou se um trabalho δW for realizado pelo sistema, a energia dE do sistema irá variar de acordo com a relação de energia conforme visto na Eq. (2.26).

$$\delta Q_{\text{Calor}} - \delta W = dE\tag{2.26}$$

V- Segunda lei da termodinâmica- Esta lei relaciona a variação de entropia dS com o calor transferido δQ_{Calor} e a temperatura absoluta, conforme a Eq. (2.26). White (2011) destaca que esta relação é válida para um sistema, mas pode ser escrita de forma apropriada para um volume de controle.

$$dS \geq \frac{\delta Q_{\text{Calor}}}{T}\tag{2.27}$$

Segundo White (2011), os volumes de controle convertem as leis de um sistema para que seja possível aplicar em uma região, de forma que o sistema possa ocupar em um instante, o sistema prossegue e outros ocuparão aquela região (denominada volume de controle), sem violar as leis básicas, que são reformuladas para tal. Segundo o autor tudo o que precisa conhecer é o campo de escoamento nesta região, logo as informações do escoamento longe do VC serão irrelevantes.

2.3.2 Vazão de Massa

Adotaremos que a superfície da Figura 2.5.b permita o escoamento de fluido sem apresentar resistência, tal que exemplificado por White (2011) possa ser pensado como sendo uma tela (malha metálica). Para determinar a quantidade de fluido que atravessa todo o contorno do volume de controle, denominado superfície de controle, deverá tomar a integral toda a superfície do domínio. Na mesma Figura se nota o vetor \vec{n} que é o vetor unitário normal a dA , orientado para fora do volume de controle por convenção.

Desta forma é possível escrever a quantidade de fluido que escoou através de dA durante o tempo dt conforme a Eq. (2.28).

$$dV = V dt dA \cos\theta = (\vec{V} \cdot \vec{n})dA dt \quad (2.28)$$

Sabendo que a integral dV/dt é a vazão volumétrica total (Q) que escoou através da superfície S , desta forma é possível escrever a Eq. (2.29).

$$Q = \int_S (\vec{V} \cdot \vec{n})dA = \int_S \vec{V}_n dA \quad (2.29)$$

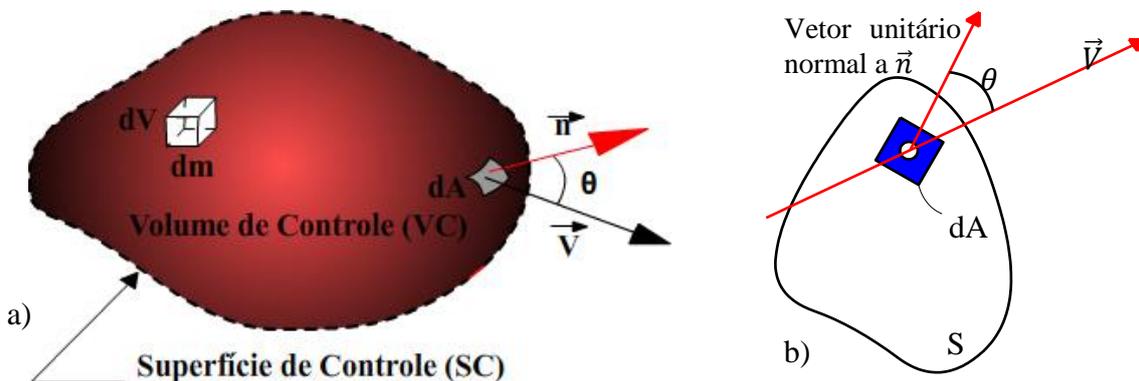


Figura 2.5 –a) Superfície de controle. b) Escoamento por uma seção S .
Fonte: a)Adaptado de Çengel e Cimbala (2007) b)Adaptado de White(2011)

Esta vazão volumétrica pode ser multiplicada pela massa específica obtendo a vazão em massa \dot{m} , conforme a Eq. (2.30).

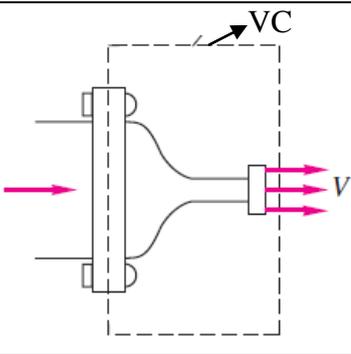
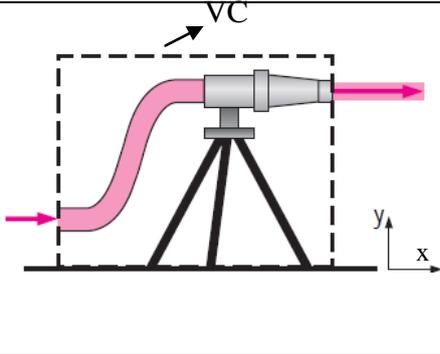
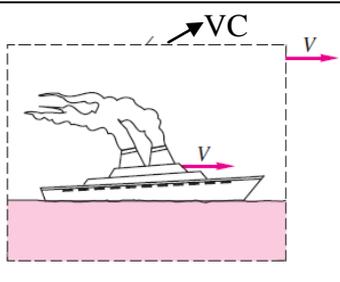
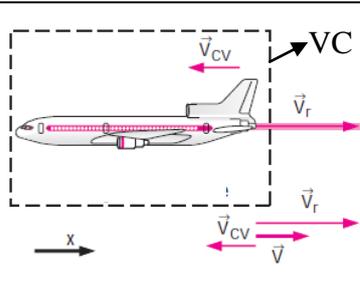
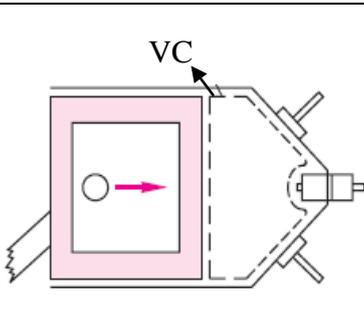
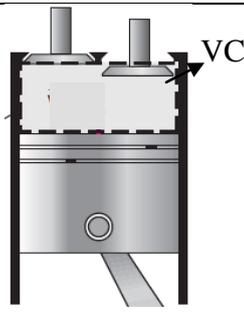
$$\dot{m} = \int_S \rho(\vec{V} \cdot \vec{n})dA = \int_S \rho V_n dA \tag{2.30}$$

Em situações onde a massa específica pode ser tomada como constante por todo o contorno de S, será possível uma redução significativa, obtendo uma proporção direta explicitada na Eq. (2.31), sabendo que \bar{V} é a velocidade média.

$$\dot{m} = \rho Q = \rho A \bar{V} \tag{2.31}$$

2.3.3 Teorema de Transporte de Reynolds

Objetivando converter uma análise de um sistema em análise de volumes de controle, aplica-se os conceitos, até aqui citados, em uma região fixa, não mais a uma massa individual. Essa transformação recebe o nome de *Teorema de Transporte de Reynolds* que se baseia na relação de grandezas do fluido em derivadas temporais à taxa de variação da mesma grandeza no interior de uma determinada região. O volume de controle (VC) pode apresentar três condições: fixo, móvel ou deformável, conforme o Quadro 2.1.

<p>Volume de controle fixo</p>		
<p>Volume de controle móvel</p>		
<p>Volume de controle deformável</p>		

Quadro 2.1 - Volume de controle.
 Fonte: Çengel e Cimbala (2007) e White (2011)

Dependendo das condições deste volume, a fórmula de conversão apresenta pequena divergência. No caso do escoamento do vento sobre edificações, o volume de controle é considerado constante, mas o movimento relativo entre o ar e a edificação deverá ser considerado. White (2011) aponta simplificações na análise se o vento escoar com velocidade V constante, então o movimento relativo assume um padrão de escoamento permanente.

Na Figura 2.6 é possível compreender um volume de controle fixo generalizado, sujeito a um escoamento de padrão arbitrário que o atravessa. O fluxo na entrada e saída pode sofrer variações. Desta forma para cada elemento de área dA , poderão haver diferentes velocidades V . Algumas áreas poderão haver fluxo de entrada ou de saída cujo valores são dados nas Eq.(2.32) e (2.33) respectivamente, outros elementos de área poderão não apresentar fluxo de entrada ou saída ($V=0$).

$$(VA\cos\theta)_{Ent}dt \quad (2.32)$$

$$(VA\cos\theta)_{Sai}dt \quad (2.33)$$

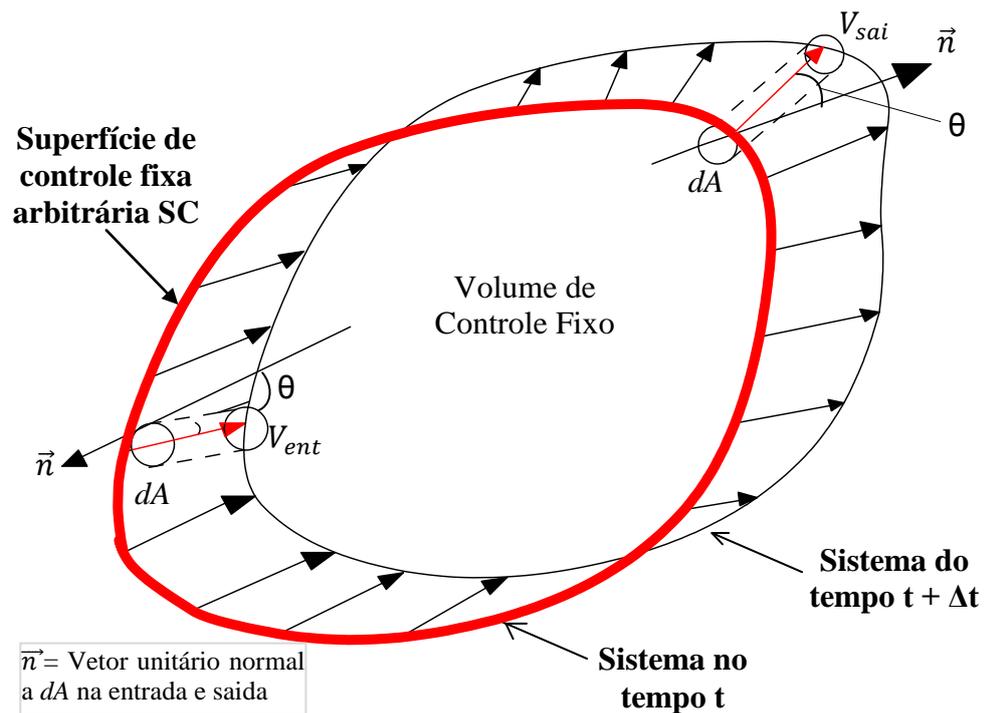


Figura 2.6 –Volume de controle arbitrário em escoamento com um padrão arbitrário.
Fonte: Adaptado de White (2011).

Para uma propriedade B qualquer do fluido, e tomando a derivada desta grandeza em relação a massa do sistema, esta será denominada grandeza intensiva correspondente e será definida pela quantidade de B por unidade de massa em uma porção diferencial do fluido, conforme a Eq. (2.34). Para todo o volume de controle da Figura 2.6, pode ser obtida a integral da curva em todo o domínio conforme a Eq. (2.34).

$$\beta = \frac{dB}{dm} \quad (2.34)$$

$$B_{VC} = \int_{VC} \beta dm = \int_{VC} \beta \rho dV \quad (2.35)$$

Na Figura 2.6 verifica-se a indicação da velocidade que entra e a que sai, definidas conforme as Eqs (2.37).

$$\begin{aligned} dV_{ent} &= -\vec{V} \cdot \vec{n} dA dt \\ dV_{sai} &= \vec{V} \cdot \vec{n} dA dt \end{aligned} \quad (2.36)$$

Em relação ao volume de controle (VC) e superfície de controle (SC) expostos na Figura 2.6 é possível descrever que há três formas de variação em B conforme explicitado em Eq.(2.35). Ainda na mesma Figura é possível destacar que o sistema se moveu, acrescentando uma porção do escoamento na saída e perdendo uma porção do escoamento na entrada.

$$\begin{aligned} \text{Variação no interior do VC} & \quad \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \beta \rho dV \right) \\ \text{Fluxo de saída de } \beta \text{ no VC} & \quad \int_{SC} \beta \rho V \cos \theta dA_{Sai} \\ \text{Fluxo de entrada de } \beta \text{ no VC} & \quad \int_{SC} \beta \rho V \cos \theta dA_{Ent} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Tomando o limite quando $dt \rightarrow 0$, a variação temporal de B no sistema é dada pela soma de sua variação no interior do volume de controle, acrescido do fluxo que sai menos o fluxo que entra neste volume, conforme a Eq. (2.38).

$$\frac{d}{dt}(B_{Sist}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \beta \rho dV \right) + \int_{SC} \beta \rho V \cos \theta dA_{Sai} - \int_{SC} \beta \rho V \cos \theta dA_{Ent} \quad (2.38)$$

Esta expressão é denominada *Teorema de transporte de Reynolds*. Considerando a componente $V \cos \theta$ como a componente normal da velocidade (V_n), e também expressando a Eq. (2.37) em termos da variação de massa, sabendo que $d\dot{m} = \rho \dot{V}_n dA$ surge a Eq. (2.39).

$$\text{Termo de fluxo} = \int_{SC} \beta \rho V_n dA_{Sai} - \int_{SC} \beta \rho V_n dA_{Ent} = \int_{SC} \beta d\dot{m}_{Sai} - \int_{SC} \beta d\dot{m}_{Ent} \quad (2.39)$$

Objetivando escrever de uma forma compacta, adota-se o vetor unitário \vec{n} saindo da superfície de controle, desta forma resultando nas Eq. (2.40).

$$\begin{aligned} \text{Saída} & \quad \vec{V} \cdot \vec{n} = V_n \\ \text{Entrada} & \quad \vec{V} \cdot \vec{n} = -V_n \end{aligned} \quad (2.40)$$

Com isto a Eq. (2.38) pode ser reduzida para a Eq.(2.39),(2.41) e (2.40), levando em conta os fluxos positivos na saída e negativo na entrada.

$$\text{Termo de fluxo} = \int_{SC} \beta \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.41)$$

O teorema de transporte de Reynolds pode ser escrito de forma compacta, substituindo a equação (2.40) na (2.37), resultando a Eq.(2.42).

$$\frac{d}{dt} (B_{Sist}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \beta \rho dV \right) + \int_{SC} \beta \rho (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.42)$$

2.3.4 Conservação de massa

Esta conservação parte do pressuposto de que em um sistema fechado não há a variação de massa. Çengel e Cimbala (2007) destacam que segundo a equação de relação entre massa e energia ($E = m \cdot c^2$) para a maioria de interações de energia da natureza (excetuando as reações nucleares) a variação de massa é extremamente pequena, não conseguindo ser detectada por dispositivos de medição. As vazões totais do escoamento de massa para dentro e para fora do volume de controle são \dot{m}_e e \dot{m}_s respectivamente. Esta vazão é a quantidade de massa que escoar através de uma seção transversal por unidade de tempo. Esta expressão é apontada por Çengel e Cimbala (2007) através da relação:

$$\left(\text{Massa Total entrando} \right)_{\text{no VC durante } \Delta t} - \left(\text{Massa Total saindo} \right)_{\text{no VC durante } \Delta t} = \left(\text{Variação Total de Massa} \right)_{\text{dentro do VC durante } \Delta t}$$

O teorema de transporte de Reynolds estabelece relação entre as taxas de variação do sistema e as integrais de volume e superfície de controle. As derivadas estão relacionadas as leis básicas da mecânica. Ao eliminar as derivadas temporais do sistema, resultam formas de volume de controle ou formas integrais para as leis da mecânica dos fluidos. Desta forma a variável genérica B pode ser admitida considerada para uma grandeza qualquer como a massa, a quantidade de movimento linear, a quantidade de momento angular e a energia, conforme as Eq. (2.43) e (2.44).

$$B = m$$

$$\beta = \frac{dB}{dm} = \frac{dm}{dm} = 1 \quad (2.43)$$

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{Sist} = 0 = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \rho dV \right) + \int_{SC} \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (2.44)$$

Esta é a lei de conservação de massa para um volume de controle deformável, em um caso genérico de um volume de controle fixo, resultaremos na Eq.(2.44). Caso o volume de

controle possua apenas um certo número de entradas e saídas unidimensionais, White (2011) aponta a Eq. (2.45) como determinante à conservação de massa.

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA = 0 \quad (2.45)$$

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{Sai} - \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{Ent} \quad (2.46)$$

Ao se considerar que no volume de controle o escoamento é permanente, a equação (2.44) se reduz a equação (2.46) e a Eq. (2.45) se tornará a Eq. (2.47), uma vez que a derivada temporal será nula, $\partial \rho / \partial t \equiv 0$. Isso é, os fluxos de massa que entram e saem devem se contrabalancear exatamente.

$$\int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (2.47)$$

$$\text{Fluxo na Saída} = \text{Fluxo na Entrada} \quad (2.48)$$

$$\sum_i (\rho_i A_i V_i)_{Sai} = \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{Ent} \quad (2.49)$$

Esta grandeza, $\rho_i A_i V_i$, também é denominada fluxo de massa (\dot{m}), e pode ser reescrita conforme a Eq. (2.50):

$$\sum_i (\dot{m}_i)_{Sai} = \sum_i (\dot{m}_i)_{Ent} \quad (2.50)$$

Se o escoamento na entrada e saída não forem unidimensionais, deverá calcular o \dot{m} por integração na seção transversal (ST) conforme a Eq.(2.51).

$$\dot{m}_{ST} = \int_{ST} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.51)$$

2.3.5 Escoamento Incompressível

São aqueles em que as variações na densidade são desprezíveis. Os líquidos podem ser considerados incompressíveis. White aponta que gases que escoam a 30% da velocidade do som no gás pode ser considerado como incompressível. No caso do ar, ao nível do mar, a velocidade do som é dada por 340m/s, isto quer dizer que se o ar escoar até 102m/s, este poderá ser considerado como incompressível. Cengel e Cimbala (2007) apontam uma subjetividade no conceito de incompressibilidade, um vez que depende do estudo em questão, para os oceanógrafos a variação de 0,1% é significativa, enquanto isso, em estudos aerodinâmico os especialistas desprezam variações de densidade em gases altamente compressíveis. Os autores destacam de maneira geral, escoamentos de gases com velocidade abaixo de 102m/s devem ser considerados incompressíveis.

Neste escoamento serão realizadas simplificações adicionais. Considera-se o volume fixo, ficando o termo $\partial\rho/\partial t \approx 0$, desprezível, com isto a integral de volume pode ser desprezada. Logo, a massa específica constante pode sair da integral conforme a Eq.(2.52).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \frac{\partial\rho}{\partial t} dV \right) + \int_{SC} \rho(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA &= 0 \\ \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA &= \rho \int_{SC} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \end{aligned} \quad (2.52)$$

Se a entrada e saída forem unidimensionais e adotando a vazão como $Q_i = A_i V_i$, vem:

$$\begin{aligned} \sum_i (A_i V_i)_{Sai} &= \sum_i (A_i V_i)_{Ent} \\ \sum_i Q_{Sai} &= \sum_i Q_{Ent} \end{aligned} \quad (2.53)$$

Uma vazão, velocidade média e densidade média na seção transversal podem ser dadas conforme as Eqs. (2.54), (2.55) e (2.56) respectivamente.

$$Q = \int_{ST} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.54)$$

$$V_m = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \int_{ST} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.55)$$

$$\rho_m = \frac{1}{A} \int \rho dA \quad (2.56)$$

Com isto será possível expressar o fluxo médio conforme a Eq.(2.57).

$$(\rho V)_m = \frac{1}{A} \int \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \approx \rho_m V_m \quad (2.57)$$

2.3.6 Conservação do momento linear (2ª Lei de Newton)

Para a quantidade de momento em um volume de controle fixo, a variável será o momento linear, $m\vec{V}$ conforme a segunda lei de Newton. Nesta análise a variável \mathbf{B} será a quantidade de momento linear, desta forma, $\mathbf{B} = m\vec{V}$, e de maneira semelhante ao item anterior, surge $\beta = d\mathbf{B}/dm = \vec{V}$. Com isto o teorema de transporte de Reynolds fornece a Eq. (2.58).

$$\frac{d}{dt} (m\vec{V})_{Sist} = \sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \vec{V} \rho dV \right) + \int_{SC} \vec{V} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.58)$$

White(2011) destaca pontos acerca deste teorema aplicado à conservação de momento:

1- A velocidade (V) do fluido é uma grandeza em relação a um referencial inercial que é não acelerado, caso seja necessário considera a variação de velocidade, deverá incluir termos não inerciais de aceleração relativa;

2- O termo no segundo membro ($\sum \vec{F}$) é a soma de uma grandeza vetorial referente a todas as forças atuantes no volume de controle, dentre elas se destacam as forças de superfície sobre todo o fluido e também as forças de corpo (gravitacional e eletromagnética) que agem no interior dos volumes de controle em suas respectivas massas.

3- A equação (2.58) se refere a uma expressão vetorial, uma vez que todos os termos tem a grandeza vetorial (\vec{V}) nos integrandos. Logo esta equação tem três componentes, mas pode ser expressa apenas em termo de uma coordenada cartesiana (x), resultando a equação (2.59). Podendo também ser expressa, de maneira semelhante, na coordenada y e z.

$$\sum F_x = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} u \rho dV \right) + \int_{SC} u \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.59)$$

O fluxo na quantidade de movimento unidimensional é tomado por White (2011) através de uma analogia com a expressão do fluxo de massa (2.51), onde a grandeza \dot{M} é o fluxo de quantidade de movimento, expressa pela Eq. (2.60). O resultado será negativo para fluxo de quantidade de movimento na entrada e positivo para a saída.

$$\dot{M}_{SC} = \int_{SC} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.60)$$

Simplificações podem ser feitas quando a seção transversal for unidimensional, tomando \vec{V} e ρ como constantes em toda a seção transversal, a integração de (2.60), resultará em uma simples soma explicitada na Eq.(2.61) .

$$\dot{M}_{STi} = \vec{V}_i (\rho_i \vec{V}_{ni} A_i) = \dot{m}_i \vec{V}_i \quad (2.61)$$

Se o volume de controle tiver apenas entradas e saídas unidimensionais, a Equação (2.58) pode ser reduzida a equação (2.62).

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \vec{V} \rho dV \right) + \sum (\dot{m}_i \vec{V}_i)_{sai} - \sum (\dot{m}_i \vec{V}_i)_{ent} \quad (2.62)$$

2.3.7 Observações sobre a quantidade de momento linear

White (2011) destaca pontos a serem fortalecidos sobre a quantidade de momento linear e que difere das equações escalares de massa e energia:

- A quantidade de movimento é regido por uma equação vetorial. Os termos de força e quantidade de movimento são direcionais em até três direções.
- Os termos do fluxo da quantidade de movimento requerem um cuidado especial referente a diferença dos sinais. Como pode ser visto no integrando $\int \vec{V} (\rho \vec{V} \cdot \vec{n}) dA$, onde o

primeiro campo de velocidade (\vec{V}) terá o sinal a depender de sua direção, já o termo de fluxo de massa ($\rho \vec{V} \cdot \vec{n}$) terá um sinal a depender se o fluxo entra ou sai no VC.

- O autor destaca a grande funcionalidade da equação (2.62), pois distribuição de velocidades não uniformes requerem integração trabalhosa.
- As forças aplicadas $\sum \vec{F}$ atuam em todo o volume de controle. Ou seja, são forças superficiais (tensões de cisalhamento e pressão), suportes sólidos e o peso das massas nos interiores dos sólidos. As demais tensões em partes que não são na superfície e interior dos volumes se autocancelam e devem ser ignoradas.
- Se o fluido escoar em regime subsônico para uma atmosfera, a pressão deste será a atmosférica.
- Escolha de superfícies de entrada e saída normais ao escoamento, com este artifício, a pressão será a força dominante e a força normal será igual a força real.

2.3.8 Teorema da quantidade de Movimento angular.

Segundo White (2011), na quantidade de momento angular, o vetor \vec{H} assumirá a variável \mathbf{B} . Com isto será necessário calcular a quantidade de movimento angular instantâneo. Esse cálculo se dará por integração sobre cada elemento de massa dm . A quantidade de movimento no ponto O é dada pela Eq.(2.63). Nesta equação \vec{r} é o vetor posição.

$$\vec{H}_0 = \int_{\text{Sistema}} (\vec{r} \times \vec{V}) dm \quad (2.63)$$

A quantidade de momento angular por unidade de massa é dado pela equação (2.64).

$$\beta = \frac{d\vec{H}_0}{dm} = \vec{r} \times \vec{V} \quad (2.64)$$

A partir do teorema da quantidade de momento angular (2.22) é possível igualar ao somatório da quantidade de momento, conforme Eq. (2.65).

$$\frac{d\vec{H}_0}{dt} = \sum \vec{M}_0 = \sum (\vec{r} \times \vec{F})_0 \quad (2.65)$$

Quanto não se tem a velocidade em relação a um referencial inercial é possível inserir os termos da aceleração relativa (\vec{a}_{rel}) resultando na Eq.(2.66).

$$\sum \vec{M}_0 = \sum (\vec{r} \times \vec{F})_0 - \int_{\text{VC}} (\vec{r} \times \vec{a}_{\text{rel}}) dm \quad (2.66)$$

A Eq. (2.67) explana para o caso particular do teorema da quantidade de movimento angular de um volume de controle não deformável em um sistema de coordenadas inercial.

$$\sum \vec{M}_0 = \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{VC} \rho(\vec{r} \times \vec{V}) dV \right] + \int_{SC} \rho(\vec{r} \times \vec{V})(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.67)$$

Quando a entrada e saída podem ser consideradas unidimensionais, o fluxo de quantidade de movimento angular sobre uma SC pode ser dado pela Eq. (2.68).

$$\int_{SC} \rho(\vec{r} \times \vec{V})(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \sum (\vec{r} \times \vec{V})_{Sai} \dot{m}_{Sai} - \sum (\vec{r} \times \vec{V})_{Ent} \dot{m}_{Ent} \quad (2.68)$$

2.3.9 Equação da conservação de Energia

Nesta última lei adotamos a energia (E) como a variável muda (B). Com isto a energia por unidade de massa é dada por $\beta = dE/dm = e$. Com isto a equação resultante da primeira lei da termodinâmica conforme a Eq.(2.68). Onde Q positivo significa que o calor é adicionado ao sistema e \mathcal{W} positivo significa trabalho realizado pelo sistema.

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{d\mathcal{W}}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} e \rho dV \right) + \int_{SC} e \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.69)$$

O valor " e " pode ser dado por diversos tipos conforme (2.70).

$$e = e_{Interna} + e_{Cinética} + e_{Potencial} + e_{outras} \quad (2.70)$$

Nesta equação e_{outras} pode ser energia por reações químicas, nucleares, efeitos de campo eletromagnéticos entre outros. Nesta abordagem, esta parcela será desprezada. Sabendo que a energia interna do sistema pode ser dada por $e_{Interno} = \hat{u}$, a energia cinética referente ao movimento $e_{Cinética} = \frac{m\vec{v}^2}{2}$, e que a energia potencial $e_{Potencial} = mgz$, com z orientado para cima no sistema de coordenadas cartesianas e sentido contrário ao da gravidade, simplificações serão tomadas, tal que todas as energias ficar por unidade de massa, ou seja, aplicando o operador $\left(\frac{d}{dm}\right)$ Logo, a Eq. (2.70) resultará na Eq. (2.71).

$$e = \hat{u} + \frac{1}{2} V^2 + gz \quad (2.71)$$

O fluxo de trabalho será dividido em três partes, conforme Eq.(2.72).

$$\dot{\mathcal{W}} = \dot{\mathcal{W}}_e + \dot{\mathcal{W}}_p + \dot{\mathcal{W}}_v \quad (2.72)$$

Sendo os fluxos de trabalho: $\dot{\mathcal{W}}_e$ trabalho no eixo, $\dot{\mathcal{W}}_p$ o de pressão e $\dot{\mathcal{W}}_v$ em tensões viscosas. O trabalho de pressão é igual ao produto da força de pressão sobre um elemento de superfície com área infinitesimal pelo componente normal da velocidade entrando no VC.

$$d\dot{\mathcal{W}}_p = -(p dA) V_{n,ent} = -p(-\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.73)$$

Integrando a Eq. (2.73) resulta no fluxo de trabalho de pressão, visto na Eq. (2.74).

$$\dot{\mathcal{W}}_p = \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.74)$$

De maneira semelhante o trabalho de cisalhamento oriundo das forças viscosas pode ser explicitado pela Eq.(2.75), integrando ambas as partes resulta na Eq.(2.76).

$$d\dot{\mathcal{W}}_v = -\tau \cdot \vec{V} dA \quad (2.75)$$

$$\dot{\mathcal{W}}_v = - \int_{SC} \tau \cdot \vec{V} dA \quad (2.76)$$

Observa-se que $\vec{\tau}$ é o vetor de tensões sobre um elemento de área infinitesimal (dA).

Em alguns casos esse termo pode ser desprezado, conforme:

- Superfícies sólidas: Para as superfícies de controle em paredes sólidas de confinamento, o campo de velocidade é nulo, $\vec{V} = 0$, com isto o trabalho das forças viscosas será nulo $\dot{\mathcal{W}}_v = 0$;
- Superfície de uma máquina: Neste ponto o trabalho será considerado em termos de \dot{W}_e ;
- Entradas ou saídas: Nestes campos, o escoamento é aproximadamente normal a um elemento dA . Desta forma costuma-se desprezar os efeitos viscosos nessas regiões;
- Superfície de corrente: Este ocorre quando a superfície de controle é uma linha de corrente, isto ocorre numa curva superior na análise da camada limite, se as tensões cisalhantes forem significativas ao longo desta linha, o trabalho de forças viscosas podem ser desprezados.

Com isto os fluxo de trabalho pode ser basicamente:

$$\dot{\mathcal{W}} = \dot{\mathcal{W}}_e + \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA - \int_{SC} (\tau \cdot \vec{V})_{sc} dA \quad (2.77)$$

Ao inserir os termos anteriores, sabendo que o termo \hat{h} refere-se a entalpia do sistema, dado por $\hat{h} = \hat{u} + p/\rho$. A forma geral para um volume de controle fixo resulta na Eq.(2.78).

$$\dot{Q} - \dot{\mathcal{W}}_s - \dot{\mathcal{W}}_v = \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{VC} \left(\hat{u} + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) \rho dV \right] + \int_{SC} \left(\hat{h} + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.78)$$

2.3.10 Escoamento sem atrito: A equação de Bernoulli

Esta equação é relacionada à equação da energia para escoamento permanente e relaciona a pressão, velocidade e elevação para um fluido sem atrito. Esta equação foi inicialmente estabelecida por Daniel Bernoulli em 1738 e completamente deduzida através de Leonhard Euler em 1755. White (2011) destaca a atenção quanto ao uso desta equação, que requer a condição de atrito aproximadamente nulo, como todos os fluidos são viscosos, tendem a apresentar algum atrito. A partir da Figura 2.7 é possível analisar um tubo de corrente elemen-

tar, fixo e com área variável, com comprimento infinitesimal ds .

A pressão, velocidade e massa específica podem variar com o tempo, mas permanecem constantes em toda área (A) da seção transversal. O tubo contém uma variação de altura dz . No limite, quando a área tende a zero, o tubo se aproxima de uma linha de corrente. Isto torna a equação de Bernoulli válida para ambos os casos (tubo e linha de corrente) em escoamento sem atrito.

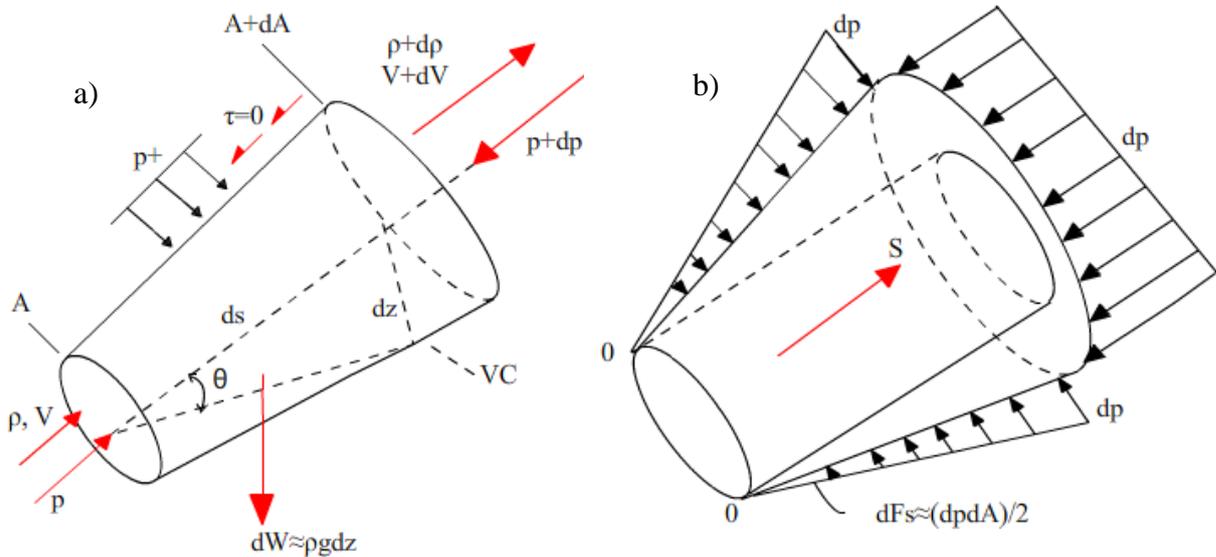


Figura 2.7 –Equação de Bernoulli para o escoamento sem atrito ao longo de uma linha de corrente: a) força e fluxo; b) força líquida de pressão.

Fonte: Adaptado de White (2011)

A conservação de massa, explicitada na Eq. (2.78), pode ser aplicada a este volume de controle conforme a Eq. (2.79). Nesta equação, $\dot{m} = \rho AV$ e $d\mathcal{V} \approx Ads$.

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \rho d\mathcal{V} \right) + \dot{m}_{sai} - \dot{m}_{ent} = 0 \approx \frac{\partial \rho}{\partial t} d\mathcal{V} + d\dot{m} \quad (2.79)$$

Sabendo que o fluxo de massa (\dot{m}) e o volume infinitesimal ($d\mathcal{V}$) tem suas equações conhecidas, podem ser explicitadas através da Eq. (2.80). Para a relação do fluxo de massa diferencial ($d\dot{m}$) não se faz necessário a hipótese de atrito nulo.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho AV \\ d\dot{m} &= d(\rho AV) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} Ads \\ d\mathcal{V} &\approx Ads \end{aligned} \quad (2.80)$$

A quantidade de movimento linear na direção das linhas de corrente resultará na Eq. (2.81).

$$\sum dF_s = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} V \rho dV \right) + (\dot{m}V)_{sai} - (\dot{m}V)_{ent} \approx \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) A ds + d(\dot{m}V) \quad (2.81)$$

A velocidade $V_s = V$, uma vez que \mathbf{s} está na direção da linha de corrente. Quando o escoamento é considerado sem atrito as parcelas das forças de cisalhamento não estarão presentes na equação, restando apenas as forças de gravidade e pressão conforme Eq. (2.82).

$$dF_{s,grav} = -dW \sin \theta = -\gamma A ds \sin \theta = -\gamma A dz \quad (2.82)$$

A força de pressão pode ser escrita através da Eq. (2.82).

$$dF_{s,press} = \frac{1}{2} dp dA - dp(A + dA) \approx -Adp \quad (2.83)$$

Substituindo a Eq. (2.82) e (2.83) na Eq. (2.81) da quantidade de movimento linear, resultaremos em:

$$\begin{aligned} \sum dF_s &= -\gamma A dz - Adp = \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) A ds + d(\dot{m}V) \\ &= \frac{\partial p}{\partial t} V A ds + \frac{\partial V}{\partial t} \rho A ds + \dot{m} dV + V d\dot{m} \end{aligned} \quad (2.84)$$

Devido a continuidade, o primeiro e último termo do segundo membro são cancelados. Após isso dividiremos ambos os membros por (ρA) , reagrupando, obteremos a Eq. (2.85).

$$\frac{\partial V}{\partial t} ds + \frac{dp}{\rho} + V dV + g dz = 0 \quad (2.85)$$

Desta forma, a partir da conservação de massa e do momento linear, em escoamento sem atrito e não permanente ao longo de uma linha de corrente é possível aplicar a equação de Bernoulli, que tomada entre dois pontos (1 e 2) quaisquer, resultará na Eq. (2.86).

$$\int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} ds + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) = 0 \quad (2.86)$$

Segundo Çengel e Cimbala (2007) esta equação é uma das equações mais utilizadas da mecânica dos fluidos, sendo empregada em casos de :

- Escoamento em regime permanente;
- Escoamento sem atrito;
- Nenhum trabalho no eixo;
- Escoamento incompressível;
- Nenhuma transferência de calor;
- escoamento ao longo de uma linha de corrente.

Se o escoamento do vento em torno de uma estrutura for considerado sem atrito e não perturbar as linhas de corrente, poderá ser resolvido com o auxílio da equação de Bernoulli.

2.4 ABORDAGEM DIFERENCIAL DO ESCOAMENTO- EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES PARA ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL E ISOTÉRMICO

Neste tópico será abordado o escoamento de fluidos Newtonianos incompressíveis e isotérmicos.

A análise diferencial do escoamento se baseia nas equações diferenciais para o escoamento de um fluido em todos os pontos do campo de escoamento. Esta região é denominada domínio de escoamento. Ou seja, se faz uma análise diferencial em um volume de controle, tratando-o como milhares de volume de controles, onde esses menores guardam as características do inicial. Conforme a Figura 2.8 é possível analisar que um volume de controle quando suas dimensões tendem a zero, este tende a um ponto P, que guarda as características do VC inicial. Çengel e Cimbala (2007) destacam que é possível resolver escoamentos de fluidos com massa específica e temperatura aproximadamente constantes, apenas com a solução das equações diferenciais do movimento, ou seja, conservação da massa e do momento linear. Já nos fluidos incompressíveis tridimensionais, há a necessidade de solução de quatro incógnitas, sendo elas as velocidade em todas as direções (u, v e w) e também a pressão (P), desta forma para a resolução do sistema de equações serão necessários quatro equações, sendo uma da conservação de massa e três equações da segunda lei de Newton, a primeira é uma equação escalar, as demais são equações vetoriais. Algumas das equações já demonstradas Neste capítulo serão explicitadas aqui de maneira mais simples, através de abordagens diferenciais.

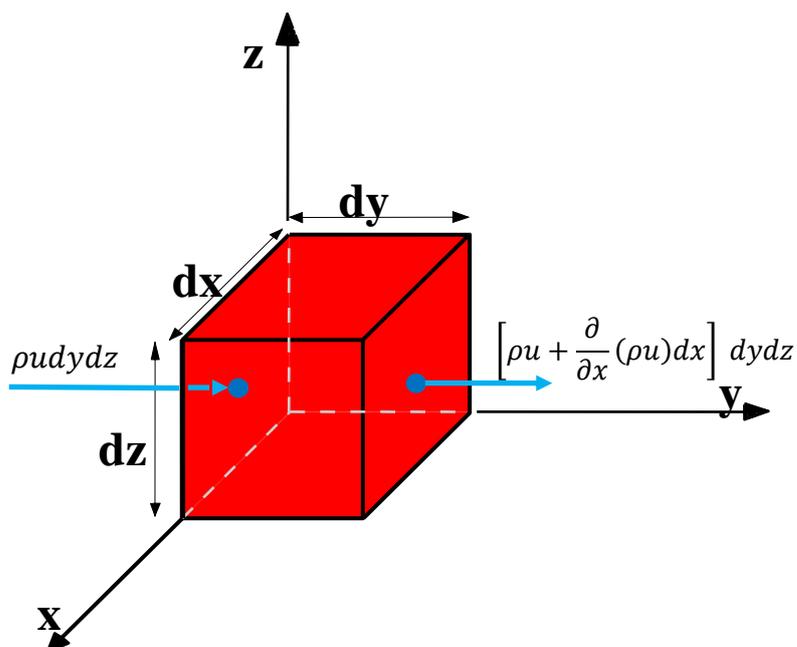


Figura 2.8 –Volume de controle infinitesimal com fluxo unidimensional.

Fonte: Adaptado de White (2011)

2.4.1 Equações diferenciais da conservação de massa

Segundo White(2011) todas as equações diferenciais básicas podem ser deduzidas a partir do volume de controle elementar esboçado na Figura 2.8. Adotando o escoamento em cada lado do elemento como aproximadamente unidimensional, a relação de conservação de massa segue a Eq. (2.87), pelo fato do volume ser infinitesimal, a integral poderá ser reduzida a derivada conforme a Equação (2.88)

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i \vec{V}_i)_{sai} - \sum_i (\rho_i A_i \vec{V}_i)_{ent} = 0 \quad (2.87)$$

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \approx \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (2.88)$$

Os termos de fluxo de massa ocorrem nas seis faces da Figura 2.8, podem ser vistos conforme o Quadro 2.2.

Face	Fluxo de massa na entrada	Fluxo de massa na saída
x	$\rho u dy dz$	$\left[\rho u + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dx \right] dy dz$
y	$\rho v dx dz$	$\left[\rho v + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) dy \right] dx dz$
z	$\rho w dx dy$	$\left[\rho w + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) dz \right] dx dy$

Quadro 2.2 –Fluxo de massa no volume de controle elementar.

Fonte: Adaptado de White (2011)

Segundo White (2011) Ao se introduzir esses termos na Eq. (2.87), resultará na Eq. (2.89) que poderá ser simplificada uma vez que o volume elementar se cancela em todos os termos, restando apenas uma equação diferencial conforme a Eq. (2.90). Esta equação caracteriza a conservação de massa para um volume de controle infinitesimal. Esta equação é válida, desde que não haja fonte ou sumidouro dentro do VC, para escoamentos permanente ou não, viscoso ou sem atrito, compressível ou incompressível. Para a sua aplicação se faz necessário garantir a continuidade das funções (massa específica e velocidade).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) dx dy dz = 0 \quad (2.89)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0 \quad (2.90)$$

Reescrevendo a função de maneira compacta, utilizando o operador nabla ∇ , conforme a Eq. (2.91). Pode-se desta forma escrever os últimos termos da equação conforme a Eq. (2.92). Desta forma a equação da continuidade pode ser escrita conforme a Equação (2.93).

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.91)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \equiv \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \quad (2.92)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.93)$$

2.4.2 Equações diferenciais da conservação de Momento Linear

Conforme aponta White (2011), a partir da equação de conservação de massa, utilizando o VC infinitesimal da Fig. 2.8 tem-se a integral na Eq. (2.94) que de maneira semelhante pode ser reduzida a expressão diferencial exposta na Eq. (2.95).

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \vec{V} \rho dV \right) + \sum_i (\dot{m}_i \vec{V}_i)_{sai} - \sum_i (\dot{m}_i \vec{V}_i)_{ent} = 0 \quad (2.94)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \vec{V} \rho dV \right) \approx \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) dxdydz \quad (2.95)$$

Os termos de fluxo da quantidade de movimento podem ser vistos no Quadro 2.3.

Ao introduzir esses termos e a Eq. (2.95) na (2.94) surge a equação (2.96).

$$\sum \vec{F} = dxdydz \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \vec{V}) \right] \quad (2.96)$$

Após simplificações e aplicar o operador $\vec{\nabla}$ tem-se a Eq (2.97).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \vec{V}) \\ &= \vec{V} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] + \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.97)$$

De maneira semelhante a conservação de massa, o termo em colchetes do lado direito desta é denominado como equação da continuidade. Com isto a Eq. (2.96) reduz a Eq. (2.99).

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} = \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (2.98)$$

$$\sum \vec{F} = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} dxdydz \quad (2.99)$$

Face	Fluxo da quantidade de movimento na entrada	Fluxo da quantidade de movimento na saída
x	$\rho u \vec{V} dydz$	$\left[\rho u \vec{V} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \vec{V}) dx \right] dydz$
y	$\rho v \vec{V} dx dz$	$\left[\rho v \vec{V} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \vec{V}) dy \right] dx dz$
z	$\rho w \vec{V} dx dy$	$\left[\rho w \vec{V} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \vec{V}) dz \right] dx dy$

Quadro 2.3 –Fluxo de quantidade de movimento no VC elementar.

Fonte: Adaptado de White (2011).

As forças atuantes no volume de controle podem ser duas natureza: Forças de campo e forças de superfície. As forças de campo podem ser de gravidade, magnetismo ou potencial elétrico. White (2011) só considera a força gravitacional (\vec{F}_{grav}) como uma de campo. Esta força é explicitada Eq. (2.100), já a força de superfície (Eq. (2.101)) decorrem de tensões sobre os lados das superfícies do volume. Essas são a soma da pressão hidrostática somada a tensões viscosas (τ_{ij}) que surgem de movimentos com grandes gradientes de velocidade.

$$d\vec{F}_{grav} = \rho \vec{g} dx dy dz \quad (2.100)$$

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} -p + \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & -p + \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & -p + \tau_{zz} \end{vmatrix} \quad (2.101)$$

A primeira linha da Equação (2.101) fornece a força líquida na direção x, que é oriunda do equilíbrio de forças para a esquerda sobre a face esquerda e para a direita sobre a face direita do VC da Figura 2.8. Esta força líquida é visualizada na Eq. (2.102).

$$d\vec{F}_{x,sup} = \left[\frac{\partial}{\partial x} (\sigma_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\sigma_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_{zx}) \right] \quad (2.102)$$

Reescrevendo a Eq. anterior com os termos de tensões viscosas surgem as Eqs (2.103).

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{F}_x}{dV} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zx}) \\ \frac{d\vec{F}_y}{dV} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zy}) \\ \frac{d\vec{F}_z}{dV} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zz}) \end{aligned} \quad (2.103)$$

Multiplicando a equações (2.102) e (2.103) pelos operadores, \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} e somando para obter a expressão do vetor força líquida de superfície conforme a Eq.(2.104) , onde as forças viscosas estão apresentadas na Eq. (2.105). Nesta equação, cada termo dentro dos parênteses representa o divergente de um vetor de tensões, conforme a Eq. (2.106).

$$\left(\frac{d\vec{F}}{dV}\right)_{sup} = -\vec{\nabla}p + \left(\frac{d\vec{F}}{dV}\right)_{viscosa} \quad (2.104)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\vec{F}}{dV}\right)_{viscosa} &= \vec{i} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\ &+ \vec{j} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \\ &+ \vec{k} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.105)$$

$$\left(\frac{d\vec{F}}{dV}\right)_{viscosa} = \vec{\nabla} \cdot \tau_{ij} \quad \text{sendo } \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.106)$$

Segundo White (2011) a força de superfície é a soma do vetor gradiente de pressão e o divergente do tensor de tensão viscosa. Aplicando nas Eqs. (2.99) e (2.100) resulta na equação diferencial básica para a quantidade de movimento em um elemento infinitesimal.

$$\begin{aligned} \rho \vec{g} - \vec{\nabla}p + \vec{\nabla} \cdot \tau_{ij} &= \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \\ \text{onde } \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} &= \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.107)$$

Desta forma a Expressão (2.108), representa a equação diferencial da quantidade de movimento em sua forma completa, válida para qualquer fluido em movimento em geral. Os termos convectivos (três últimos termos do lado direito) são não lineares, fato este que aumenta a sua complexidade. White (2011) destaca que mesmo sendo uma expressão sucinta, seus nove termos carregam uma complexidade.

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.108)$$

Segundo White (2011) esta equação não poderá ser utilizada quando não relacionar as tensões viscosas com os componentes de velocidade. Desta forma simplificações podem realizadas, dentre elas, adora o escoamento sem atrito $\tau_{ij} = 0$, logo, a Eq. (2.107) se reduz a Eq.(2.109) . Esta é denominada Equação de Euler para escoamentos não viscosos.

$$\rho \vec{g} - \vec{\nabla} p = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \quad (2.109)$$

Esta equação pode ser integrada ao longo de uma linha de corrente resultando na equação de Bernoulli conforme já abordado na seção 2.3.10.

2.4.3 Equações diferenciais da conservação de momento angular

Seguindo as prescrições conforme as etapas anteriores, a forma integral da quantidade de movimento angular para um volume de controle fixo é a Eq. (2.110). White(2011) destaca que não há uma equação diferencial para a conservação do momento angular, e que deve ser abordado a partir desta relação integral do escoamento.

$$\sum \vec{M}_0 = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho dV \right) + \int_{SC} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.110)$$

O volume de controle fixo é visto na Figura 2.9, onde suas tensões de cisalhamento causam uma aceleração angular líquida em torno do eixo O e que é paralelo ao eixo z .

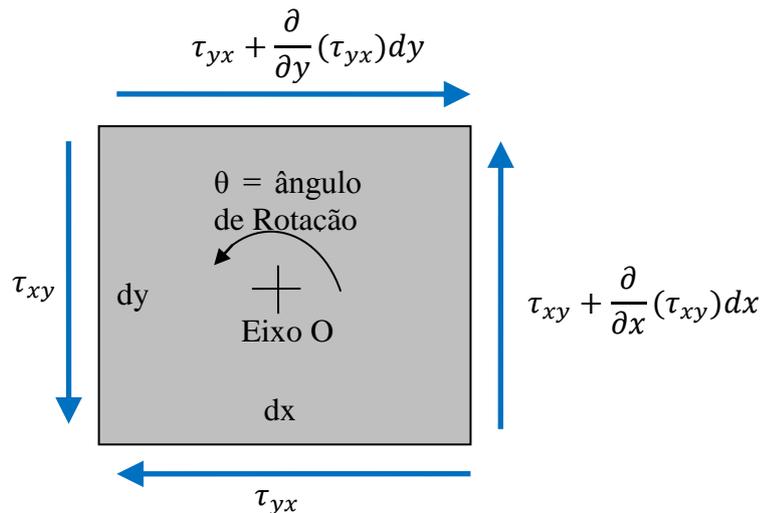


Figura 2.9 –Volume de controle elementar fixo sujeito a aceleração angular.

Fonte: Adaptado de White (2011)

2.4.4 Equações diferenciais da conservação de Energia

A energia pode ser transferida para um corpo fechado através de calor ou trabalho. O princípio de conservação requer a transferência de energia líquida para um sistema durante um processo seja igual a variação de energia contida no sistema de acordo com a Eq. (2.111).

$$E_{mec,e} - E_{mec,s} = \Delta E_{mec,Sistema} + \Delta E_{mec,Perda} \quad (2.111)$$

Assim como as demais relações das conservação de massa e momento, vemos na Eq.(2.112) a integral para a conservação de energia para o volume da Fig. 2.9. Nesta expressão foi desprezado o fluxo de trabalho no eixo por não haver nenhum entrando no VC.

$$\dot{Q} - \dot{\mathcal{W}}_v = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} e \rho dV \right) + \int_{SC} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.112)$$

Adotando a condição de que o lado direito desta equação se comporta como uma relação diferencial para o VC, e criando a variável: $\zeta = e + p/\rho$ surge a Eq. (2.113) Ao se fazer uma analogia com a Eq. (2.97) surgirá a expressão simplificada (Eq. (2.114)).

$$\dot{Q} - \dot{\mathcal{W}}_v = \left[\frac{\partial}{\partial t} (e\rho) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \zeta) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \zeta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \zeta) \right] dx dy dz \quad (2.113)$$

$$\dot{Q} - \dot{\mathcal{W}}_v = \left(\rho \frac{de}{dt} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} p \cdot \vec{V} \right) dx dy dz \quad (2.114)$$

Segundo White(2011) a radiação é desprezada e apenas a condução de calor é considerada. Esta, será dada pela lei de Fourier, conforme a Eq. (2.115) . Considerando K , como o coeficiente de condutividade térmica do fluido.

$$\vec{q} = -K \vec{\nabla} T \quad (2.115)$$

No Quadro 2.4 é possível verificar os fluxos de energia (calor) na entrada e saída do volume de controle infinitesimal, conforme a Fig. 2.9.

Face	Fluxo de calor na entrada	Fluxo de calor na saída
x	$q_x dy dz$	$\left[q_x + \frac{\partial}{\partial x} (q_x) dx \right] dy dz$
y	$q_y dx dz$	$\left[q_y + \frac{\partial}{\partial y} (q_y) dy \right] dx dz$
z	$q_z dx dy$	$\left[q_z + \frac{\partial}{\partial z} (q_z) dz \right] dx dy$

Quadro 2.4 - Fluxo de calor no VC elementar.

Fonte: Adaptado de White (2011)´

Somando os termos de entrada e saída, obteremos o calor líquido no volume de controle conforme a Eq. (2.116). Ao aplicar a lei de Fourier (Eq.(2.115)) surge a Eq. (2.117)

$$\dot{Q} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y) + \frac{\partial}{\partial z} (q_z) \right] dx dy dz = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} dx dy dz \quad (2.116)$$

$$\dot{Q} = \vec{\nabla} \cdot (K \vec{\nabla} T) dx dy dz \quad (2.117)$$

Segundo White(2011) o trabalho realizado pelas forças viscosas é oriundo do produto do componente de tensão pelo componente de velocidade. Conforme analisado para a face esquerda (FE) do volume elementar da Fig 2.9 e explicitado na Eq.(2.118).

$$\dot{\mathcal{W}}_{v,FE} = \mathcal{W}_x dy dz \text{ em que } \mathcal{W}_x = -(u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) \quad (2.118)$$

De acordo com White(2011), havendo um gradiente deste trabalho na face direita, fluxo de trabalho surgirão de maneira semelhante ao representado no quadro 2.4, substituindo q_x por \mathcal{W}_x , após subtrair os termos de saída pelo de entrada, o trabalho viscoso resulta na Eq.(2.119).

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{W}}_v &= - \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz}) \right] dx dy dz \\ &= -\vec{\nabla} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\tau}_{ij}) dx dy dz \end{aligned} \quad (2.119)$$

Substituindo a Eq. (2.117) e Eq. (2.119) na Eq. (2.114) e adotando e conforme a Eq. (2.71) objetivando uma forma da equação diferencial de energia conforme a Eq. (2.120).

$$\rho \frac{de}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} p + p \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\tau}_{ij}) \quad (2.120)$$

Ainda é possível utilizar uma forma mais sucinta para tal expressão, conforme a Eq. (2.121), considerando a função dissipativa Φ para um fluido newtoniano viscoso e incompressível conforme a Eq. (2.121).

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\tau}_{ij}) \equiv \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_{ij}) + \Phi \quad (2.121)$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.122)$$

Ao substituir a Eq. (2.121) na Eq. (2.120) e utilizando a quantidade do movimento linear, cancelará as energias cinéticas e potencial, resultando na equação diferencial da Energia conforme a Eq. (2.123). Esta é válida para fluido newtoniano sob condições gerais de escoamento não permanente, compressível, viscoso e com condução de calor, desde que despreze a transferência de calor por radiação e fontes internas.

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot (K \vec{\nabla} T) + \Phi \quad (2.123)$$

2.4.5 Equações de Navier-Stokes

Conforme já citado na seção 2.2, para um fluido newtoniano as tensões viscosas são proporcionais às taxas de deformação do elemento e aos coeficientes de viscosidade, conforme verificado na Eq. (2.12). Para o escoamento incompressível, isotérmico e com viscosidade

constante, esta equação pode ser generalizada para o caso tridimensional, conforme a Eq. (2.124).

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)\end{aligned}\quad (2.124)$$

Conforme já abordado no capítulo 2.2, μ é o coeficiente de viscosidade. Aplicando a Eq. (2.12) na (2.108) fornece a equação diferencial da quantidade de movimento para um fluido newtoniano com massa específica e viscosidade constantes, conforme as Eqs. (2.125).

$$\begin{aligned}\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{\partial u}{\partial t} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{\partial v}{\partial t} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{\partial w}{\partial t}\end{aligned}\quad (2.125)$$

As Eqs. (2.125) são denominadas “Equações de Navier-Stokes”, em homenagem ao Engenheiro, físico e matemático francês, Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) e também ao Matemático e físico irlandês Sir. George Gabriel Stokes (1819-1903) que concluiu as formulações de Navier, quase um século após iniciar o mesmo estudo de escoamentos de fluidos.

Estas equações são não lineares de segunda ordem. Possuem quatro incógnitas: p, u, v e w , que segundo White (2011) devem ser combinadas a relação de continuidade incompressível conforme a Eq. (2.126) afim de obter quatro equações e quatro incógnitas.

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{V} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0\end{aligned}\quad (2.126)$$

Apesar das equações de Navier-Stokes possuírem poucas soluções analíticas, elas possuem grandes aplicações computacionais. Segundo o White (2011), é possível conseguir resultados em CDF aproximados, mais realísticos, para diversos escoamentos.

2.4.5.1 Condições de contorno

Para a solução das equações básicas da mecânica dos fluidos (continuidade, quantidade de movimento e energia) já abordadas nesta dissertação, se faz necessário conhecer a massa específica, campo de velocidade, pressão, energia interna e temperatura. Tomando o caso específico para a solução das equações de Navier-Stokes, sabendo que o escoamento é incompressível com suas propriedades (ρ , μ e k) constantes, se faz necessário, conhecer condições de contorno, oriundas de suas incógnitas do sistema de equações, desta forma, como condições iniciais destaca-se a proposição:

$$\text{Em } t=0 \quad p, u, v, w = \text{Conhecidas } f(x, y, z) \quad (2.127)$$

Para o instante t , deve-se conhecer as condições de fronteira do fenômeno, referente aos limites geométricos do escoamento. Segundo White(2011) há três principais tipos de fronteira: Parede sólida, entrada (ou saída) e interface entre a diferença de estado do fluido (líquido-gás). No primeiro caso, destaca-se a necessidade de conhecer a velocidade.

$$\text{Parede} \quad \vec{V}_{Fluido} = \vec{V}_{Parede} \quad (2.128)$$

Em seguida deverá conhecer pressão e velocidade na entrada e saída em todo instante.

$$\text{Entrada e saída} \quad \text{Conhecidas } \vec{V}, p \quad (2.129)$$

Por último White (2011) destaca a condição de contorno cinemático, ou seja deverá haver a igualdade na velocidade vertical na interface, de forma a não aparecer buracos entre o líquido e o gás. O autor destaca que as condições de superfície livre na interface gás-líquido são as mais complexas. Neste trabalho o objeto de estudo será o ar, considerado sempre em forma gasosa, desta forma será desprezado este item por fins práticos.

2.5 ARRASTO E SUSTENTAÇÃO

Quando corpos, imersos em um fluido, tentam se mover encontram uma certa resistência ao deslocamento, isto ocorre principalmente em líquidos. É possível visualizar este efeito ao tentar caminhar em um piscina, ou mesmo o vento incidindo em linhas de transmissão e em árvores. White (2013) aponta que o arrasto é uma perda de escoamento e que quando o corpo tiver que se mover, este deve ser superado. Çengel e Cimbala (2007) conceituam o arrasto como a força que um fluido em movimento exerce em um corpo na direção do escoamento. Segundo os autores, a força de arrasto é um efeito indesejável e se deve tomar decisões a ponto de minimizá-la, esta ação deve ser tomada para reduzir o consumo de combustíveis nos automóveis, aviões, embarcações, nas estruturas a redução do arrasto é procurada objetivando a melhor segurança e durabilidade, conseguindo também reduzir vibrações e ruí-

dos. O arrasto também pode ser adotado como um efeito benéfico, por exemplo na frenagem de um veículo, em um paraquedas, entre outros. Um fluido em movimento exerce forças de pressão, normais na superfície de um corpo imerso nele e forças tangenciais de cisalhamento na superfície devido a condição de não escorregamento causado pelos efeitos viscosos. As forças atuantes tem componentes na direção do escoamento, desta forma o arrasto tem efeitos de pressão e das forças de cisalhamento na parede na direção do escoamento. Quando há forças na parede da força normal, movimentando o corpo nesta direção, recebe o nome de forças de sustentação, este último conceito é bastante importante em aerodinâmica de equipamentos aeroespaciais e marítimos que não serão aprofundadas neste trabalho. Desta forma esta força normal tende a mover o objeto na direção do escoamento. Quando as forças de arrasto tendem a girar o corpo, geram um momento, denominado: Momento de rolagem. Çengel e Cimbala (2007) destacam que em corpos com simetrias, tais como os veículos, aviões, algumas edificações, o momento de rolagem é nulo, resultando apenas a força de arrasto e sustentação.

Em uma determinada área infinitesimal (dA) as forças atuantes são de pressão (PdA) e cisalhamento ($\tau_w dA$). A força infinitesimal de arrasto atuando no escoamento bidimensional pode ser dada pela equação (2.130) a partir das deduções da Figura 2.10.

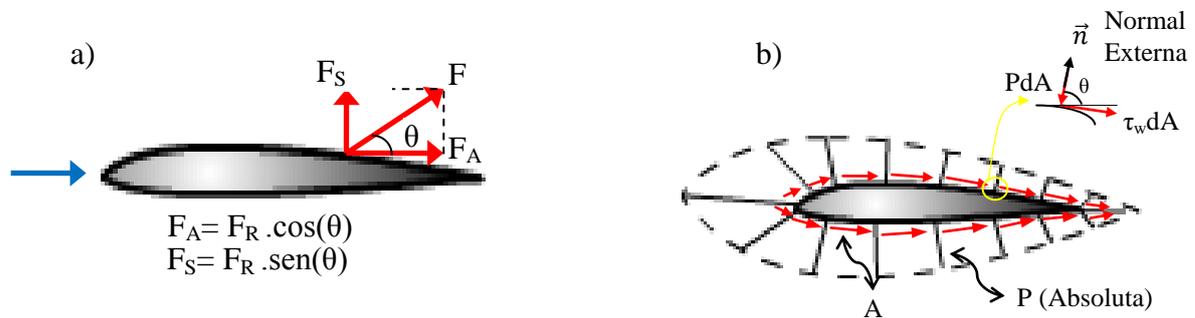


Figura 2.10 – a) Forças atuando em um corpo em escoamento de um fluido; b) Tensões infinitesimais atuantes na interface do corpo.

Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2007)

$$dF_A = -PdA \cos \theta + \tau_w dA \sin \theta \quad (2.130)$$

Nesta equação, o ângulo θ é formado entre a força resultante, normal exterior a região dA faz com a direção positiva do deslocamento. Integrando a Eq. (2.131) se encontra a força de arrasto sobre toda a superfície.

$$F_A = \int_A dF_A = \int_A (-PdA \cos \theta + \tau_w dA \sin \theta) dA \quad (2.131)$$

Essa expressão é muito usual para mensurar o arrasto analiticamente ou numericamente, entretanto Çengel e Cimbala (2007) não a indicam para o uso experimental, devido à sua complexidade e sendo possível medir os valores do arrasto direto em túnel de vento. Os auto-

res destacam que o atrito superficial (causado pelo cisalhamento nas paredes) e o atrito de pressão contribuem para o arrasto e para a sustentação. Os pesquisadores salientam o caso explicitado na Figura 2.11, onde uma placa fina alinhada paralelamente a direção do escoamento, haverá uma força de arrasto cujo cisalhamento será dominante, uma vez que $\theta=90^\circ$ e a primeira parcela da integral em (2.131) irá ser (ou aproximadamente) nula. Se esta mesma placa for rotacionada, desde que fique em posição normal ao escoamento ($\theta=0^\circ$) seu arrasto dependerá unicamente do atrito de pressão.

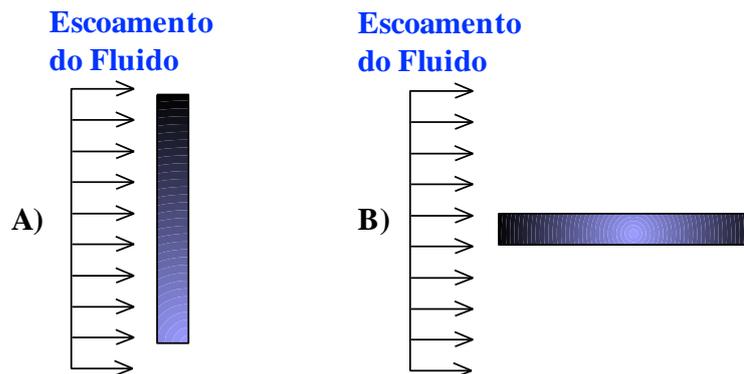


Figura 2.11 –Placas dispostas no escoamento em ângulos diferentes: a) 90° ; b) 0° .

Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2007)

White (2013) aponta que de maneira geral o arrasto de pressão (também denominado de arrasto de forma) é causado pela distribuição de pressão ao longo do corpo, enquanto que o arrasto de atrito é causado pela tensão cisalhante, geralmente, este é menor que o arrasto de pressão. Desta forma o coeficiente de arrasto pode ser quantificado pela soma de ambos os já citados conforme Eq. (2.132).

$$C_A = C_{A\text{ Pressão}} + C_{A\text{ Atrito}} \quad (2.132)$$

A força de arrasto depende da velocidade (V) à montante do corpo, da densidade do fluido em escoamento (ρ), da forma e orientação dos corpos resultando em sua área frontal (A), que pode ser compreendida como uma projeção do objeto no plano normal ao escoamento, desta forma podemos expressar o coeficiente de arrasto (C_A) na Eq. (2.133).

$$C_A = \frac{F_A}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.133)$$

White (2013) destaca que em escoamentos a baixas velocidades e em corpos com geometrias semelhantes com orientação e rugosidades relativamente idênticas o coeficiente de arrasto é unicamente função do número de Reynolds (já citado na Eq. (2.18)). $C_A = f(Re)$.

Este valor é para um coeficiente de arrasto médio que pode ser obtido a partir de vários coeficientes de arrasto local ($C_{A,x}$) em diversos pontos do objeto, conforme Eq. (2.134).

$$C_A = \frac{1}{L} \int_0^L C_{A,x} dx \quad (2.134)$$

Quando um corpo é abandonado sobre a superfície de um fluido, como a água por exemplo, inicialmente atinge uma velocidade oriunda da força peso atuando neste corpo, em seguida seu movimento encontra uma certa resistência, oriunda do arrasto, a medida que a velocidade do corpo aumenta, incrementará também na força de arrasto conforme visto na Eq. (2.134), que por sua vez reduzirá a velocidade, isto continuará até o equilíbrio das forças, ou seja a resultante das forças será nula, e conseqüentemente a aceleração do sistema também será, conforme Figura 2.12. A velocidade no qual isto ocorrerá é denominada terminal.

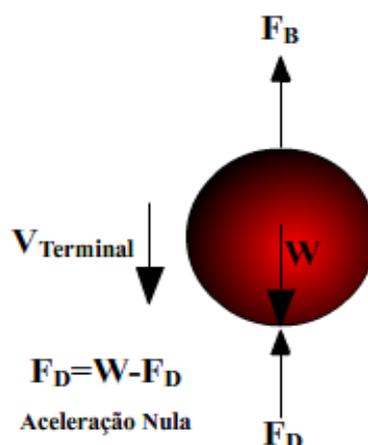


Figura 2.12 – Resultante das forças em um corpo imerso em um fluido.

Fonte: Adaptado Çengel e Cimbala (2007)

Conforme White (2013) os corpos carenados possuem menores coeficientes de arrasto, diferentemente dos corpos rombudos, conforme a Figura 2.13.

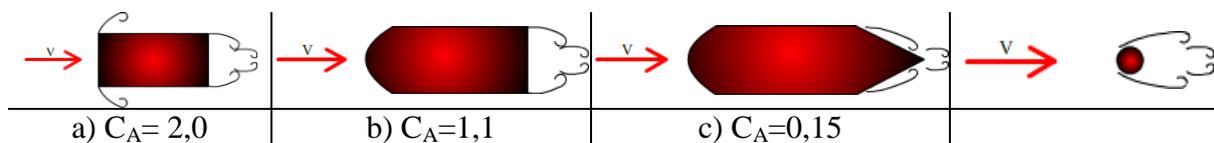


Figura 2.13 – Efeitos do carenamento na redução do arrasto.

Fonte: Adaptado de White (2013)

Percebe-se que o prisma de seção transversal retangular (a) tem separação forçada em todas as quinas, isto majora o arrasto. Quando possui arredondamento frontal, denominado nariz (b) produz uma redução no arrasto. Para uma carenagem adicional traseira, com um bordo de fuga (c) agudo reduzindo o arrasto em mais de 85%. Foi utilizado um cilindro circular (d) para tomar como padrão de vorticidade e arrasto. Segundo Pereira (2010) fenômenos são observados no escoamento de fluidos em torno de um cilindro circular, sendo:

- Formação da camada limite laminar;

- deslocamento e formação de um caminho de vórtices e esteiras;
- transição do regime laminar para turbulento na camada limite;
- formação da camada limite turbulenta.

2.6 TURBULÊNCIA

Angelo (2013) conceitua turbulência como o modelo de pequenos vórtices que estão sendo formados e dissipados continuamente. Costa (2012) apud Moller e Sivestrini (2004) ressalta que experimentos realizados por Osborne Reynolds em 1883 demonstraram linhas de corrente de diversos tipos de escoamento ao se inserir corante em um duto transparente com fluxo de água. Ao aumentar o fluxo da água, Reynolds observou grandes oscilações causando uma mistura completa entre corante e água, este fenômeno foi chamado de turbulência. Gabbi (2013) e Costa (2012) definem turbulência como um escoamento desordenado no espaço e tempo. Costa (2012), Gabbi (2013) e Silveira Neto ([2002]) apontam que a turbulência se caracteriza por:

- irregularidade do escoamento: torna uma análise determinística impossível, usando-se métodos estatísticos;
- alta difusividade: causa uma mistura do fluido, aumentando a transferência de massa e retarda a separação da camada limite;
- altos números de Reynolds: a turbulência inicia da instabilidade de escoamentos laminares ao aumentar o número de Reynolds;
- Flutuações tridimensionais de vorticidade: todo escoamento é tridimensional, entretanto nos bidimensionais, o termo que representa a geração de vórtices na equação de Helmholtz é nulo;
- Dissipativos: Os escoamentos turbulentos são altamente dissipativos, desta forma a energia cinética dos turbilhões menores é transformada em energia interna;
- Continuidade: Qualquer escoamento (laminar e turbulento) deve ser modelado pelas equações de Navier- Stokes, mesmo as menores escalas são superiores a escala molecular do fluido, desta forma pode tratar o fluido como uma quantidade contínua, denominado por Silveira Neto ([2002]) como um fenômeno contínuo;
- Regime: A característica do regime em turbulento ou laminar é consequência do escoamento e não do fluido.

Estes fatores podem ser observado como predominantes na engenharia do vento atrelada quando o objeto de estudo são obras da construção civil. O número de Reynolds é um importante parâmetro para caracterizar o escoamento em laminar ou turbulento, ele é definido

como a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas.

Segundo Silveira Neto ([2002]) a modelagem clássica da turbulência não consegue capturar os detalhes do escoamento turbulento. Conforme explicitado na Figura 2.14.

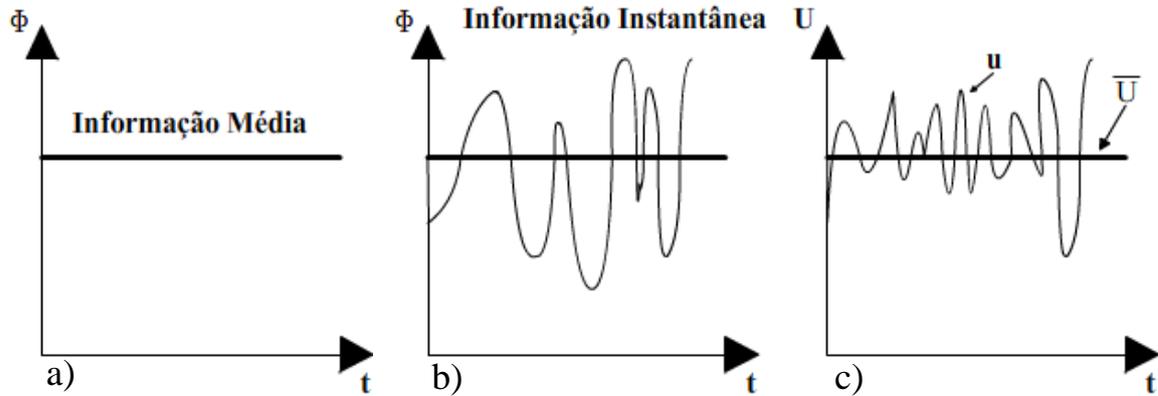


Figura 2.14-Turbulência a) Escoamento pela modelagem clássica . b) Escoamento pela modelagem contemporânea. c) Média de Reynolds.

Fonte: Silveira Neto ([2002])

A média de Reynolds pode ser considerada como um parâmetro que possa explicitar o escoamento devendo ser conhecido as flutuações, conforme a Figura 2.14c). É possível calcular um valor instantâneo qualquer (U) a partir da média de Reynolds (\bar{U}), acrescida da flutuação (u), conforme a Eq. (2.135).

$$U = \bar{U} + u \quad (2.135)$$

Destaca-se que o valor médio da flutuação é zero conforme a equação (2.136).

$$\bar{u} = 0 \quad (2.136)$$

Ferreira (2013) aponta que quanto maior a intensidade de turbulência, maiores serão as flutuações de velocidade, fato este que não é observado nos escoamentos laminares. O autor indica que os redemoinhos de turbulência podem ocorrer com oscilações na ordem de 10 a 1000Hz, no exemplo citado foi a água. Silveira Neto destaca as grandezas físicas envolvidas no campo de escoamento podem ser decompostas na soma de seus componentes e média flutuante, conforme as Eq. (2.137) a (2.140)

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad (2.137)$$

$$P = \bar{P} + p \quad (2.138)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \tilde{\rho} \quad (2.139)$$

$$T = \bar{T} + t \quad (2.140)$$

Sendo a primeira equação equivalente a velocidade, a segunda a pressão, a próxima em relação a massa específica e a última é referente a temperatura. Segundo Silveira Neto, as equações de Reynolds são utilizadas para as quantidades médias do escoamento e podem ser obtidas diretamente pelas equações de Navier-Stokes pela aplicação do operador Media Tem-

poral. Segundo o autor, a obtenção das equações de Reynolds é dada por duas etapas:

- 1- Variáveis aparecem nas equações de movimento, decompostas na soma de suas partes médias com suas partes flutuantes.
- 2- Adota-se um intervalo de tempo finito, e em seguida, aplica-se o operador de média temporal aos termos resultantes.

Maiores detalhes dos modelos de turbulência serão abordados Na Seção 3.

2.7 ESTEIRAS

Segundo Silveira Neto ([2002]) as esteiras surgem à jusante dos obstáculos. O autor aponta um exemplo deste tipo de escoamento as esteiras de Von Karman que se formam atrás de corpos em escoamento, como ocorre em pilares de pontes. Silva(1995) relata que o escoamento em corpos de formas suaves, tipicamente utilizados em equipamentos aerodinâmicos, são realizados sem o deslocamento da camada limite e com uma esteira quase desprezível. Entretanto, salienta Silva(1995), para os problemas corriqueiros da engenharia envolvendo os corpos com formas rombudas apresentam mais de um ponto de separação e as esteiras são de maiores relevância. Entretanto para este trabalho não serão realizados maiores estudos sobre a influência da esteira, consultando apenas contribuições disponíveis na literatura. atuando ficando apenas ao refinamento de malha.

2.8 RESOLUÇÃO DO ESCOAMENTO NUMERICAMENTE

Segundo Silva(1995) os avanços na dinâmica dos fluidos computacional têm proporcionado o aumento da eficiência das análises de complexas simulações ao redor de corpos rombudos. As soluções podem ser obtidas por algoritmos que utilizam descrição Euleriana, descrição Lagrangeana ou podem ser utilizadas descrições mista.

O autor ressalta que a Diferenças Finitas (MDF) e Elementos Finitos (MEF) são os métodos mais indicados para solução das descrições euleriana de simulação de escoamento. Esses escoamentos são descritos pelas equações de Navier-Stokes. Outro método que pode ser apontado aqui também é o método dos volumes finitos (MVF).

O autor cita os problemas mais comuns quando se deseja simular escoamentos com alto número de Reynolds, dentre eles:

- Necessidade de recursos computacionais são proporcionais ao número de Reynolds;
- Problemas de estabilidade na solução;
- Dificuldades de implementação das condições de contorno na região da esteira.

Para a solução do escoamento de fluidos ideais, Maliska (2014) aponta o sistema de

equações que governam o fenômeno: conservação da massa, quantidade de movimento, energia e uma equação de estado, conforme ilustrado neste seção.

2.8.1 Métodos das Diferenças Finitas

Segundo Conti (2006) o método das diferenças finitas foi, durante anos, usado em problemas de fluido em geometrias simples, mas não se tinha habilidade no tratamento de geometrias complexas, ficando o seu desenvolvimento baseado em coordenadas ortogonais, cartesianas, cilíndricas e esféricas. Segundo Maliska (2014) algumas pessoas cometem o equívoco de relacionar o MDF com malhas cartesianas, uma vez que este método pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, mesmo as não estruturadas, não tornando esta apenas solucionada por MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

Gonçalves (2007) e Conti (2006) apontam que diferenças finitas é o método mais antigo em resolução de equações diferenciais parciais sendo bastante indicado para geometrias simples, destaca ainda que o domínio é discretizado em uma malha, onde há uma aproximação em cada ponto desta equação, substituindo as derivadas parciais por aproximações com base nos valores das funções nesses nós. Segundo o Gonçalves (2007), o MDF é aplicado à qualquer discretização, mas tem sido largamente empregado em malhas estruturadas. Para as aproximações de primeira e segunda derivadas são utilizadas expansões em série de Taylor ou regressão polinomiais, sendo possível também usar esses métodos para obter os valores locais para pontos fora dos nós, por meio de interpolações e extrapolações. Gonçalves (2007) indica que o MDF é simples e eficaz para obter aproximações de elevada ordem em malhas regulares. Entretanto aponta como desvantagem os erros das aproximações devido à não conservação do método, assim como restrições à geometria em problemas mais complexos.

2.8.2 Métodos dos Elementos Finitos

Conti (2006) aponta que o método dos elementos finitos é uma boa ferramenta para tratamento de geometrias complexas. Segundo Gonçalves (2007) no método dos elementos finitos, o domínio é dividido em um conjunto discreto de elementos ou elementos finitos que comumente são não estruturados. No MEF, as equações são multiplicadas por uma função peso antes de serem integradas em todo o domínio. Segundo o autor, de maneira simplória, a solução é aproximada de forma que os elementos sejam sempre contínuos através de uma determinada fronteira de elementos. O pesquisador aponta como vantagem deste método a capacidade de lidar com geometrias arbitrárias, apontando a grande gama de possibilidades de construção de malhas, e também a facilidade de refinar a malha na região de interesse, outra

vantagem citada também é a fácil análise matemática. O autor aponta como desvantagem a aplicação em malhas não estruturadas.

2.8.3 Métodos dos Volumes Finitos

2.8.3.1 Conceitos iniciais

Segundo Conti (2006) o método dos volumes finitos é bastante indicado para geometrias complexas. Resolve equações de movimentos que eram aproximadas através do balanço de grandezas em questão (massa, quantidade de movimento, energia, entre outras), nos volumes finitos (volumes elementares).

De acordo com Gonçalves (2007) o MVF parte da forma integral da equação da conservação, onde a solução tem seu domínio dividido em um número finito de volumes de controle (VC) contíguos e a equação é aplicada a cada um desses volumes. Segundo o autor, no interior de cada volume há um ponto médio, onde são calculados os valores das variáveis, quando se precisa calcular os valores na superfície do volume (faces) há a necessidade de uma interpolação a partir dos volumes adjacentes (vizinhos). O pesquisador salienta que este método pode ser aplicado a qualquer malha, o tornando uma forte ferramenta na resolução de geometrias complexas. As malhas adotadas não necessitam estar relacionadas a um sistema de coordenadas, pois estão definidas nas fronteiras do VC. O MVF é popular dentre as engenharias devido à simplicidade na compreensão do significado físico de todos os termos. O autor aponta como desvantagem a dificuldade de resolver utilizando-se malhas não estruturadas com aproximações de ordens superiores à segunda, isso é causado pela aproximação em três níveis pelos Volumes Finitos: Interpolação, diferenciabilidade e integração. O autor complementa que o método das diferenças finitas poderia ser mais eficiente que o MVF nesta aplicação. Segundo Maliska (2014) todo método que satisfaz a conservação da propriedade de volumes elementares para obter as equações aproximadas é um MVF. Potter e Wiggert (2004) destacam que o MVF e MDF são os indicados para cálculo de escoamentos compressíveis e incompressíveis. De acordo com Maliska (2014) existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no MVF, que são:

- 1- Realizar o balanço de propriedades em questão nos volumes elementares;
- 2- Integrar sobre o VC, no espaço e tempo, as equações na forma conservativa.

Forma conservativa também é denominada de forma divergente e é por definição aquela onde suas equações na forma diferencial podem ser integradas resultando fluxos na fronteira do volume elementar equivalente ao balanço.

Para deduzir as equações diferenciais que representam os fenômenos físicos, o autor

destaca que se faz necessário realizar um balanço em volumes finitos. Em um próximo passo aplica-se o limite e obtém a equação diferencial. A relação entre a equação diferencial e o método dos volumes finitos é explicitada através do volume bidimensional visto na Figura 2.15.

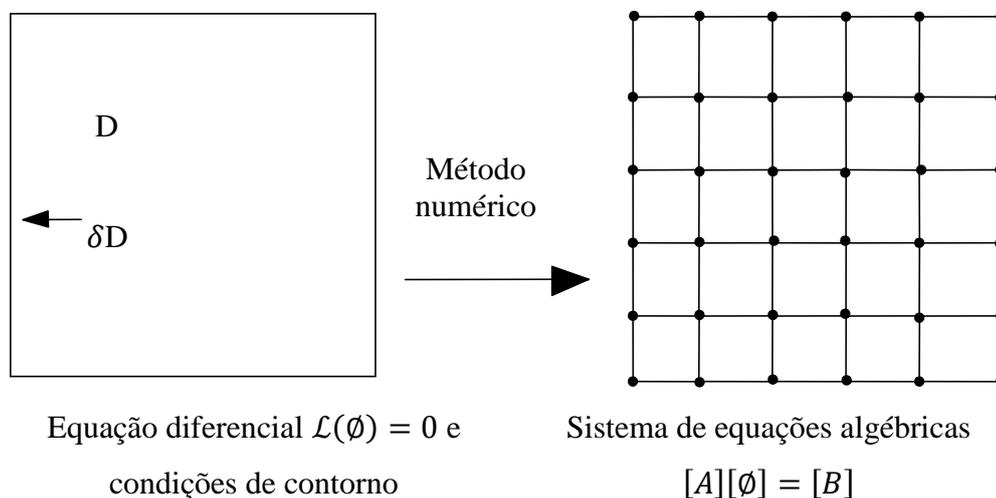


Figura 2.15- Método Numérico.

Fonte: Adaptado de Maliska (2014).

2.8.3.2 Método dos volumes finitos Baseados em Elementos

Esta nomenclatura foi proposta por Maliska (2014) como Element-Based Finite Volume Method (EdFVM). Originalmente este método foi denominado Control-Volume Finite Element Method (CVFEM) por Baliga e Patankar (1980), proposto para resolver escoamentos descritos pelas equações de Navier-Stokes, em trabalhos futuros, os autores estenderam esse método na resolução de problemas gerais da mecânica dos fluidos e transferência de calor. Baliga e Patankar (1983) utilizaram malhas não-estruturadas de elementos triangulares unindo seus centroides com os pontos médios dos lados para construção dos volumes de controle. As equações de conservação são integradas em cada um dos volumes de controle obtendo as equações aproximadas que obedecem a conservação de grandezas físicas no nível discreto. Maliska (2014) destaca que esta integração requer a obtenção dos fluxos nas interfaces do VC, estes são calculados por aproximação no ponto médio de cada segmento de reta que delimita este volume, conforme a Figura 2.16. Nesta figura é possível visualizar cada sub-volume de controle (SVC), nós (1,2,3 e 4) e pontos de integração (representados pelo \times)

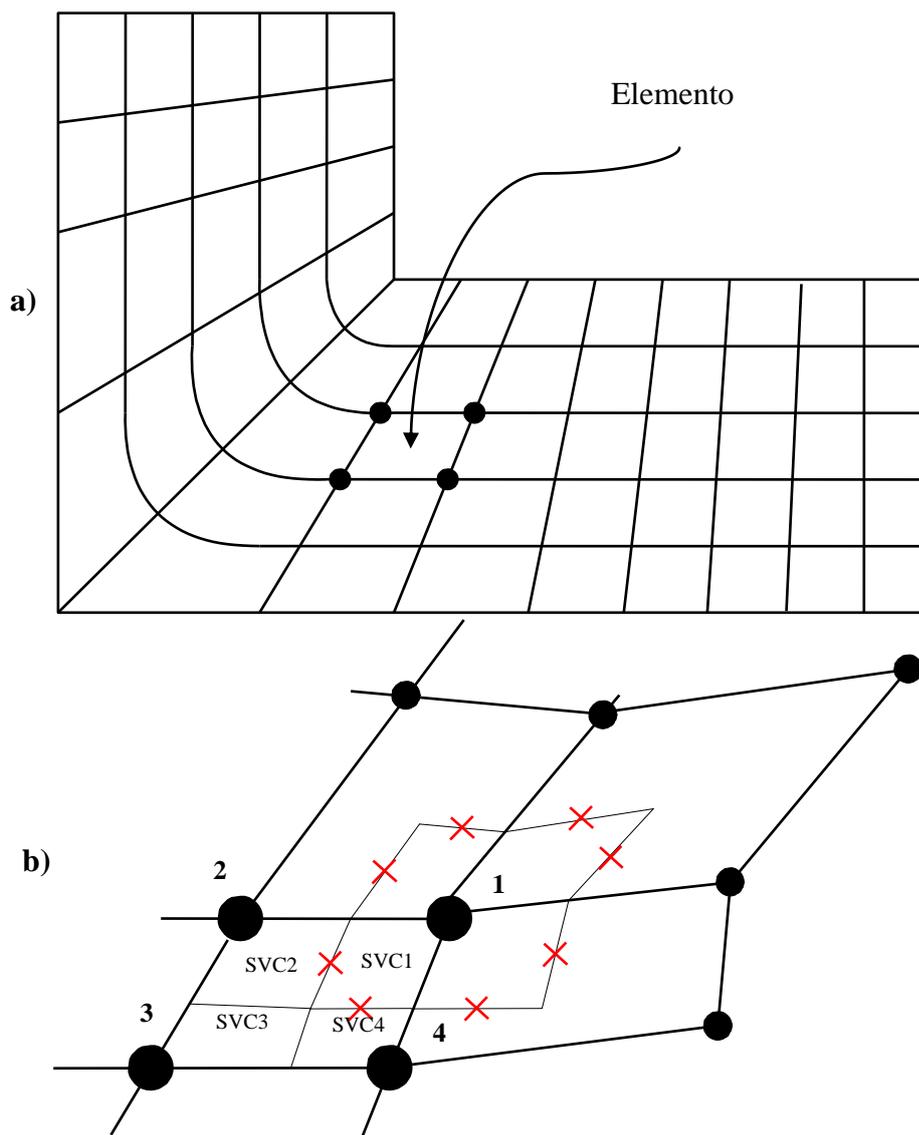


Figura 2.16- a) Discretização de malha mostrando o elemento. b) Elemento 1234 e volume centrado em 1.

Fonte: Adaptado de Maliska (2014).

Mendes (2007) aponta a implementação computacional como uma grande vantagem deste método, uma vez que pode-se calcular os fluxos em todos os pontos de integração no interior de todos os elementos, somando a contribuição em cada subvolume de controle para o seu volume. Com isto garante a lei de conservação em um VC. Outra vantagem percebida neste método e que facilita o cálculo é a não existência de descontinuidade das propriedades físicas nos pontos de integração. Assim como o método dos volumes finitos, o EbFVM utiliza um sistema de coordenadas locais em cada elemento. As integrais de volume são convertidas em integrais de superfície através do teorema da divergência de Gauss, a partir disto é possível integrar as equações de massa, quantidade de movimento e energia.

2.8.4 Comentários adicionais sobre os Métodos Numéricos

2.8.4.1 Tratamento das não linearidades

Ao aproximar uma equação diferencial parcial linear, surge um sistema linear de equações com matriz de coeficientes constantes. Quando o problema é não linear, aproxima-se a um sistema linear onde a matriz contém coeficientes dependentes da própria variável, que será atualizada a cada iteração. Maliska (2014) ressalta que nos problemas envolvendo as equações de Navier-Stokes, surge uma série de não linearidades importantes. Transfere-se então a não linearidade para a matriz dos elementos. Em problemas que envolvem apenas uma equação diferencial, após resolver o sistema linear através de um método direto, a não linearidade gera outra iteração no processo, atualizando a matriz. Com isto, não se pode confundir as iterações das não linearidades com as oriundas do método de solução. O autor destaca uma diferença entre as convergências das iterações, dependendo da natureza da não linearidade, podendo retardar a obtenção da solução.

2.8.4.2 Erros de truncamento

Maliska (2014) destaca que a solução numérica de uma equação diferencial é discreta e possui erros de aproximação que a distanciam da solução exata. Estes erros podem ser encontrados utilizando expansão em série de Taylor. O erro de truncamento dependerá da aproximação escolhida.

3. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (DFC)

3.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo serão tratados fundamentos teóricos e especificações para aplicações práticas da dinâmica dos fluidos computacional. As peculiaridades desta ciência serão abordadas objetivando as aplicações.

Segundo Potter e Wiggert (2004) a dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*- CFD) objetiva soluções numéricas para problemas de escoamentos de fluidos utilizando o computador. Os autores salientam que o avanço da tecnologia computacional e conseqüentemente maior capacidade de armazenamento e alta velocidade de processamento tem proporcionado ao CFD uma maior capacidade de obtenção de solução para diferentes problemas de escoamento, inclusive:

- Compressíveis e incompressíveis;
- Laminares e Turbulentos;
- Quimicamente reagente e não reagente;
- Fase única e multifásico.

Segundo Post (2013) os códigos de CFD representam ferramentas da engenharia, que assim como qualquer outra ferramenta computacional, possuem uma grande velocidade de solução o que proporciona uma alternativa atraente para a solução de problemas, entretanto possuem limitações que já foram apontadas no Capítulo 1 desta dissertação.

3.2 CONHECIMENTOS INICIAIS DA DFC E SUAS APLICAÇÕES

As simulações numéricas requerem domínios computacionais discretizados através de: pontos, elementos e/ou volumes finitos. Quanto menor a discretização, mais acurados serão os resultados, entretanto o refinamento requer um maior desempenho computacional e conseqüentemente aumentará o custo computacional da simulação.

3.3 MODELOS DE TURBULÊNCIA

Cóstolas (2006) ressalta que as dimensões requeridas das malhas impedem que as equações de Navier- Stokes por si só reproduzam a turbulência em um escoamento. Para que isto ocorra seria necessário adotar malhas extremamente refinadas, esta técnica é denominada DNS (Direct Numerical Simulation). O autor indica que devido à impossibilidade de simular em DNS, é necessário o uso de modelos matemáticos que forneçam características da simula-

ção. O pesquisador aponta a simulação em LES (Large Eddy Simulation) como alternativa para o uso do DNS, entretanto Cóstolas (2006) apud Cost (2004) ressalta que o uso em estudos não acadêmicos ainda não é factível devido a grande capacidade de processamento necessária. O autor salienta que o uso da LES apresenta desvantagens do ponto de vista prático:

- Demanda computacional;
- Necessidade de simulação em estado transiente;
- Necessidade de tratamento dos resultados.

Ainda assim, o pesquisador aponta a fidelidade das simulações com este modelo de turbulência quando comparado a dados coletados experimentalmente, se mostrando bastante superior aos demais modelos conforme CFX (2003), Cost (2004) e Çengel e Cimbala (2007).

Cóstolas (2006) afirma que os modelos que não utilizam abordagens DNS e LES, aplicam a média de Reynolds às equações de Navier-Stokes e recebem o nome de RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). A alternativa mais completa deste modelo utiliza seis equações a mais para descrever a turbulência que os demais. Cost (2004) indica para simulações ao redor de edifícios o uso preferencial de modelos de fechamento de segunda ordem, como o RSM- Reynolds Stress Model. O autor indica ainda evitar o uso do modelo $k-\epsilon$, devendo optar pelo RNG $k-\epsilon$.

Segundo Ribeiro (2009) o modelo de turbulência adotado é a chave para a obtenção do perfil local de velocidade. Ressalta o autor que estes modelos podem ser:

- Modelos a duas equações: São empregados com sucesso quando o objetivo são parâmetros globais.
- Modelos de transporte de tensores de Reynolds: São aplicados em todas as situações, mas não apresentam acurácia próximo às paredes. O autor aponta que nestes casos pode ser aplicado a versão Baseline (BSL) do RST, entretanto apresentam dificuldade na convergência.
- Modelos de Tensores de Reynolds em equilíbrio local (Algebraic Stress Model, ASM): Também conhecido como Modelo algébrico de Tensores de Reynolds, é uma simplificação do Modelo de Transporte de Tensores de Reynolds.
- Abordagem LES: Nesta são tratadas as maiores escalas do escoamento turbulento. As menores escalas são tratadas, em geral, com modelos algébricos de dissipação viscosa. Mesmo com o avanço da capacidade de processamento, este modelo é muito dispendioso devido às restrições de malha refinada e passo de tempo pequeno que onera os processos de projeto e otimização. Ribeiro (2009) apud Alcamo et al (2005) indica

que resultados de simulações não ficaram, muitas vezes, totalmente conforme os dados experimentais, devido a malha não ser adequada na maioria dos casos.

- Abordagem híbrida LES-RANS: Existem duas principais abordagens híbridas, dentre elas a Detached Eddy Simulation (DES) e a Scale-Adaptative Simulation (SAS). A DES utiliza o RANS próximo a camada limite e LES nas regiões longe da parede. Já o SAS, uma abordagem Unsteady RANS, usa a escala de comprimento de Von Karman para mapear as regiões descoladas e instáveis do escoamento de estruturas menores são resolvidas.
- Abordagem completa, DNS (Direct Numerical Simulation): este método consiste em resolver todo o espectro de escalas turbulentas. Esta alternativa é baseada na solução das equações de Navier-Stokes, isto é possível devido a resolução de todas as escalas de turbulência capturadas por discretizações suficientes. Ribeiro (2009) aponta que neste caso, mesmo com a atual capacidade de processamento, se torna proibitivo a simulação de um caso real, pois a malha a ser utilizada é proporcional a $Re^{9/2}$. Explicita o autor que para $Re=10^6$, a malha exigida seria de 133×10^9 elementos. Além disso o passo de tempo deverá ser bastante reduzido.

Angelo (2013) também destaca que é possível prever com exatidão as flutuações de pressão e velocidade em razão da turbulência, através da resolução direta das equações de conservação, o autor faz uma ressalva quanto a necessidade de se cumprir a discretização temporal e espacial das microescalas de Kolmogorov. Angelo (2013) apud George (2006) destaca que a metodologia DNS até o momento, não é viável para problemas de engenharia logo busca-se os recursos dos modelos de turbulência.

Araujo (2012) descreve que Boussinesq em 1877 elaborou uma hipótese que atualmente é utilizada por vários modelos de turbulência, esta hipótese é fundamentada na relação semelhante conhecida entre as tensões viscosas do regime laminar e as tensões turbulentas, sendo estas proporcionais ao gradiente de velocidade média do fluxo e o coeficiente de proporcionalidade usado é denominado de viscosidade turbulenta.

Silveira Neto (2002) destaca que a turbulência não é um fenômeno estacionário e nem homogêneo e que, por motivos práticos, os intervalos de tempo escolhidos para cálculo da média não pode ser infinito.

O software comercial Ansys-CFX possui diferentes Configurações de métodos para resolução de problemas com escoamento turbulento, conforme:

- 1) Zero equation Model;
- 2) Eddy Viscosity Transport Equation;

- 3) Standart k- ϵ Model;
- 4) RNG (Re-normalized group Model);
- 5) k- ω ;
- 6) SST (Shear Stress Transport Model);
- 7) SSG- Reynolds Stress;
- 8) BSL;

3.3.1 Modelos baseados na teoria da viscosidade turbulenta

Segundo Freire et al (2006), corroborado por Angelo (2013), a função da viscosidade turbulenta é determinar as tensões de Reynolds, para um determinado tensor simétrico, substituindo as seis tensões turbulentas por uma grandeza relacionada ao gradiente das velocidades médias. Desta forma esses modelos comparam o comportamento da transferência da quantidade de movimento por meio da turbulência pela analogia à ação da viscosidade dinâmica ou absoluta nos fluidos Newtonianos.

3.3.1.1 Modelo zero equação

Alguns modelos podem assim ser denominado por não incluírem nenhuma equação de transporte para determinação de grandezas turbulentas. Segundo Angelo (2013) este modelo deve ser usado para resultados preliminares e também a análise das características do fenômeno. Ribeiro (2009) aponta que o zero equação, também denominado de Modelo Algébrico, utiliza aproximações de Boussinesq e devem ser usados como boa opção para condição inicial, mas nunca para uma solução final de um escoamento real.

3.3.1.2 Modelo de uma equação: Transporte da viscosidade turbulenta

Ribeiro (2009) aponta que a variável transportada neste modelo é a própria viscosidade turbulenta originada da aproximação de Boussinesq ou da energia cinética turbulenta. O autor aponta que este modelo é bastante popular em escoamentos aerodinâmicos.

Gabbi (2013) define como um modelo de viscosidade turbulenta aquele onde a turbulência consiste de pequenos vórtices que são formados e dissipados continuamente, no qual as tensões de Reynolds são proporcionais ao gradiente de velocidade média.

Segundo Angelo (2013) apud Menter (1993,1997) o transporte da viscosidade turbulenta utilizado no modelo de duas equações (k- ϵ) é baseado nas hipóteses:

- (i) suposição de igualdade entre energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação de dissipação de energia cinética por unidade de massa (ϵ), doravante: taxa de dissipação;
- (ii) Hipótese de Bradshaw's que diz que o tensor taxa de deformação é proporcional à energia

cinética.

3.3.1.3 Modelo de duas equações: k- ϵ Padrão

De acordo com Gabbi (2013), Angelo (2013) apud Launder e Spalding (1972, 1974), Pereira (2010) e Abraumchuk (2013) este modelo padrão oferece vantagens na utilização pois contém mais duas equações de transporte, sendo uma para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa de dissipação de energia (ϵ). Ainda segundo o autor, este método é numericamente estável e robusto. Outra característica é que a capacidade de predição da turbulência é bem estabelecida, sendo indicado também para casos em que apresentam desvios significativos, Angelo (2013) cita que neste método há um equilíbrio entre as exigências computacionais e resultados apresentados. Costa (2012) aponta como falha deste modelo a camada limite turbulenta tem separação de escoamento.

Não há um consenso ao certo quanto a autoria deste modelo, segundo Gabbi (2013) é creditada a Jones e Launder (1972), já de acordo com Abraumchuk (2013), a autoria é de Launder e Spalding (1972).

Pereira (2010) destaca que o k- ϵ surgiu objetivando melhorar o modelo de comprimento de mistura e também para encontrar uma alternativa para a prescrição algébrica da escala de comprimento turbulenta de escoamentos variando de moderada a alta complexidade.

Segundo Gabbi (2013) o k- ϵ é o modelo mais conhecido por ser robusto, preciso e possuir estabilidade. Abraumchuk (2013) apud Rigas (2004) e Freire et al (2006) destacam que este modelo possui uma boa combinação entre potência numérica e exatidão computacional, e por ser o mais difundido é o modelo padrão em simulações industriais.

Ribeiro (2009) ressalta que esta é a modelagem turbulenta mais comum de todas as aplicações em CFD, pois alia boa convergência, baixa demanda de memória e respostas razoáveis, quando o objetivo é o comportamento global do escoamento. O autor destaca como ponto negativo deste modelo, seu uso em escoamentos rotativos e com grandes curvaturas nas linhas de corrente, devido a grande sensibilidade desta categoria de escoamento. Outro problema apontado é na descrição do escoamento próximo a paredes. O pesquisador atribui esta deficiência ao fato da dissipação de energia cinética possuir sua equação não integrável até a parede, pois ϵ não reproduz, corretamente processos viscosos nas proximidades das paredes.

Alencar (2009) destaca que este modelo é semi-empírico baseado nas equações de transporte. O autor indica este modelo para escoamentos completamente turbulentos com altas escalas de turbulência. Destaca ainda como limitação do k- ϵ a não precisão em escoamentos com baixas escalas de turbulência envolvendo geometrias complexas.

Segundo Ferreira (2013) este modelo não é muito apropriado para simular o comportamento da camada limite e os pontos onde ocorre a separação, o autor indica ainda que o modelo k- ε apresenta falhas para cálculo de fluxos com fortes gradientes de pressão.

Duas equações de transporte são escritas para os termos k e ε , respectivamente, em (3.1) e (3.2).

$$\rho \frac{\partial k_t}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{V}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k + P_{kb} - \rho \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} (P_k + P_{\varepsilon b}) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.2)$$

Onde P_k é o termo de produção da turbulência em razão das forças viscosas, P_{kb} é a contribuição do empuxo da energia cinética e $P_{\varepsilon b}$ é o termo referente ao empuxo da taxa de dissipação. Estes parâmetros podem ser quantificados por:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (3.3)$$

$$P_{kb} = -g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (3.4)$$

$$P_{\varepsilon b} = g_i \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (3.5)$$

As constantes têm valor conforme a tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Constantes para o k- ε . Fonte: Ferreira (2013).

σ_k	σ_ε	σ_θ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
1,0	1,3	0,9	1,44	1,92

Silveira Neto (2013) escreve a viscosidade turbulenta (μ_t) como um termo desconhecido que deve ser modelado matematicamente, descrito pela Eq. (3.6).

$$\mu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

Sendo c_μ uma constante. k e ε são calculados através das equações de transportes.

Abraumchuk (2013) ressalta que as regiões junto às superfícies são caracterizadas por intensos gradientes das propriedades do escoamento. O autor destaca que um maior refinamento do domínio na região de influência proporciona mais captura de efeitos nesta, entretanto um maior custo computacional. Para elevados números de Reynolds, se for admitida a hipótese da camada limite turbulenta totalmente desenvolvida, é possível evitar a resolução das equações governantes nas regiões próximas as paredes.

O autor salienta a estabilidade e robustez numérica deste modelo, entretanto aponta algumas situações em que este não pode ser usado:

- Escoamento na presença de curvatura de linha de corrente;
- Escoamento sob a ação de gradientes de pressão muito grandes;
- Escoamento com regiões de separação;
- Jatos;
- Escoamento sob ação de campos de força;
- Escoamentos mais complexos.

3.3.1.4 Modelo de duas equações: k - ε (RNG)

Alencar (2009) apud Arantes (2007) indica que este modelo é derivado das equações instantâneas de Navier-Stokes utilizando técnicas denominadas "renormalização de grupo" (RNG). Segundo o autor, este modelo é superior ao k - ε padrão pois permite rastrear baixas escalas de turbulências junto com altas escalas de turbulências. Segundo Gabbi (2013) este modelo foi proposto por Yakhot e Orszag (1986). As equações de transporte da geração e dissipação de turbulência são as mesmas do modelo k - ε , mas suas constantes diferem.

3.3.1.5 Modelo de duas equações: k - ω

Segundo Angelo (2013), Ribeiro (2009) e Abraumchuk (2013) o modelo k - ω foi previamente postulado por Kolmogorov (1942). Este autor introduziu um parâmetro essencial à representação da taxa de transferência de energia cinética turbulenta das grandes escalas para as menores escalas e a este parâmetro foi atribuída a letra grega ω (Freire et al., 2006). ω é a taxa de dissipação de energia por unidade de volume e tempo conforme Angelo (2013). Ribeiro (2009) denomina ω como a frequência de turbulência. O autor aponta que este modelo é bastante indicado para escoamentos confinados. Angelo utilizou o modelo de duas equações proposto por Wilcox (1993), que segundo o autor possui uma definição diferente do proposto por Kolmogorov. Wilcox (1993) se baseia que o parâmetro ω é proporcional à razão entre taxa dissipação e energia cinética turbulentas conforme a Eq. (3.7). Abraumchuk (2013) salienta que este modelo é baseado no conceito de viscosidade turbulenta proposto por Boussinesq. Costa (2012) indica que, embora o k - ω seja mais preciso nas regiões próximas as paredes, apresenta falhas próximas a elas, assim como o modelo citado anteriormente. Ribeiro (2009) destaca que este modelo é bastante preciso próximo a paredes, por ser possível resolver a integral na parede devido ao valor de ω nela ser nulo, entretanto destaca como problema deste modelo a região longe da parede.

$$\omega \propto \frac{\varepsilon}{k} \quad (3.7)$$

Abraumchuk (2013) destaca que a transformação da energia cinética turbulenta em energia interna se processa nas menores escalas, então o valor k pode ser dado por $k = 1/3 \overline{u_i^2}$. Sendo u_i a componente de velocidade. Segundo Angelo (2013) as equações de transporte para as grandezas k e ω podem ser vistas na equação (3.8) e (3.9).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{U_j} k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k + P_{kb} - \beta' \rho k \omega \quad (3.8)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{U_j} \omega) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega_1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \frac{\omega}{k} ((\alpha'_1 P_k + P_{b\omega}) - \beta'_1 \rho k \omega) \quad (3.9)$$

Onde β' , α'_1 , β'_1 , σ_k , σ_{ω_1} são constantes de valor: 0,09, 5/9, 0,075, 2 e 2, respectivamente.

As demais incógnitas podem ser encontradas através de (3.10) e (3.11):

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.10)$$

$$P_{\omega b} = P_{\varepsilon b} = g_i \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} \quad (3.11)$$

3.3.1.6 Modelo de duas equações: Shear Stress Transport- SST

Menter (1993, 1994, 2003) propôs o modelo SST a partir do acoplamento da formulação k - ω ao k - ε padrão, utilizando funções de combinação. O objetivo deste modelo foi a incorporação das qualidades e minimização das deficiências de cada um dos modelos originais. De acordo com Abraumchuk (2013) o modelo recebe este nome pois a definição da viscosidade turbulenta é modificada levando em conta o transporte da tensão de cisalhamento turbulenta principal, tornando-o um modelo mais eficaz que o k - ω e k - ε .

Segundo Saito e Morooka (2010), Costa (2012), Menter et al (2003) e Abraumchuk (2013) o modelo SST é um híbrido de dois outros: k - ε e k - ω . Esta união objetivou a diminuição das deficiências de ambos os modelos, servindo-o como um limitador para as equações turbulentas. Desta forma o SST utiliza o modelo k - ω próximo às paredes e usa o modelo k - ε longe delas. O autor aponta que para escoamentos com grandes números de Reynolds este modelo deverá ser combinado com um modelo de transição, denominado de γ - θ . Segundo Gabbi (2013) apud Bardina et al (1997) informam que numerosos estudos foram realizados sobre a validação deste modelo e demonstraram um melhor desempenho deste sobre os modelos k - ω e k - ε em simulações na camada limite.

Ribeiro (2009) destaca o uso deste modelo para prever descolamentos em superfícies

lisas através da incisão de modelos dos efeitos de transporte. Angelo (2013) apud Freire et al (2006) aponta a complementação entre os modelos, tais como a sensibilidade do modelo $k-\omega$ à variações nas condições de corrente livre (regiões não perturbadas pelo escoamento), que não é computada no modelo $k-\varepsilon$. Também podem apresentar erros numéricos em regiões próximas a paredes, quando utilizado o modelo $k-\varepsilon$, devido ao fato da parcela de termo de destruição, possuir o termo de energia cinética turbulenta no denominador, conforme Eq. (3.12).

$$\text{Parcela do termo de destruição} \rightarrow \frac{C_\varepsilon \rho \varepsilon^2}{k} \quad (3.12)$$

Como nas proximidades das paredes a energia cinética turbulenta tende a zero, o termo de destruição assumirá valores muito altos.

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{C_\varepsilon \rho \varepsilon^2}{k} = \infty \quad (3.13)$$

Já para o modelo $k-\omega$, o termo de destruição explicitado na Equação (3.12) é proporcional a energia cinética turbulenta, quanto maior o decaimento dela nas proximidades das paredes, menor será este termo.

$$\text{Parcela do termo de destruição} \rightarrow (\beta'_1 \rho k \omega) \quad (3.14)$$

As equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) para o modelo SST são as mesmas utilizadas no modelo $k-\omega$, conforme equação 3.15, entretanto uma nova equação é descrita por Angelo para determinar a taxa de dissipação de energia por unidade de volume e tempo ω , conforme equação (3.15).

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_j \omega) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega_1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + 2\rho(1 - F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega_2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \\ &+ \frac{\omega}{k} ((\alpha'_3 P_k + P_{\omega b}) - \beta'_3 \rho k \omega) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Segundo Angelo (2013) os coeficientes para esta equação de transporte podem ser calculados conforme as equações (3.16) a (3.20).

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_\omega 2y^2} \right]^4 \right\} \quad (3.16)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.17)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega_2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1,0x10^{-10} \right) \quad (3.18)$$

$$P_k = \min(2\mu_t \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}, 10\rho\beta'k\omega) \quad (3.19)$$

$$\mu_t = \frac{\rho\alpha'_1 k}{\max(\alpha'_1 \omega, F_2 \sqrt{2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}})} \quad (3.20)$$

Onde y é a distância entre a parede e os nós adjacentes. Para as constantes deste modelo, Angelo (2013) indica a combinação linear para uma constante ϕ qualquer.

$$\phi_3 = F_1 \phi_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad (3.21)$$

O autor indica valores para as constantes do modelo SST conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Constantes para o Modelo SST. Fonte: Angelo (2013)

	Constante 1	Constante 2
$\alpha'_{(i)}$	5/9	0,44
$\beta'_{(i)}$	3/40	0,0828
$\sigma_{\omega(i)}$	2	1/0,856

Abraumchuk (2013) ressalta que Bardina et al (1997) realizou estudos extensos na validação deste modelo, apresentando boa capacidade na predição da separação em escoamentos sob gradientes de pressão adversos. O autor ainda destaca simulações realizadas por Korkischko (2006) em corpos rombudos aplicando três modelos de turbulência: k- ω , k- ϵ e SST, encontrando resultados mais consistentes e equivalência com dados experimentais através do SST, conseqüentemente o apontando como o mais indicado para tais simulações. Abraumchuk (2013) aponta que o melhor modelo de turbulência em suas simulações para cálculo do coeficiente de arrasto em veículos (ônibus) foi o SST, apontando como desvantagem do modelo k- ϵ a necessidade de maior refinamento na camada limite e esteira.

3.3.1.7 Modelo baseado nas tensões de Reynolds (SSG Reynolds Stress)

Angelo (2013), Silveira Neto ([2006]) e Ribeiro (2009) destacam que o modelo baseado nas tensões de Reynolds não utiliza a hipótese de Boussinesq, isso o difere daqueles baseados na teoria da viscosidade turbulenta. Segundo Angelo (2013), quando utilizado o SSG (Speziale Sarkar Gatski) "Reynolds Stress", os termos de flutuação serão determinados por equações de transporte, que devem ser escritas para cada tensor de Reynolds ($\overline{u'_i u'_j}$). Segundo Silveira Neto ([2006]), o Tensor de Reynolds pode ser escrito conforme a Eq. (3.22).

$$\tau_{ji} = (\overline{u'_i u'_j}) = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u^2} & \overline{uv} & \overline{uw} \\ \overline{vu} & \overline{v^2} & \overline{vw} \\ \overline{wu} & \overline{wv} & \overline{w^2} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

O autor destaca que os componentes deste tensor representam as tensões turbulentas. Este é oriundo do procedimento de tomada de média no tempo que faz surgir correlações envolvendo flutuações de velocidade. Silveira Neto ([2006]) indica que a diagonal principal da Matriz na Eq. (3.22) representa a tensão normal, os demais termos apontam as tensões de cisalhamento. Essas tensões são parcelas somadas ao termo viscoso das equações de Navier-Stokes e tem influência semelhante sobre o escoamento.

Ribeiro (2009) saliente que por este modelo resolver cada tensor tensão turbulento (ou de Reynolds), isto o permite prever o comportamento tridimensional da turbulência. Entretanto o autor destaca o alto custo computacional devido a solução simultânea de seis equações diferenciais parciais. Além deste fato, ocorre também a dificuldade de convergência devido ao sistema de equações. Ribeiro (2009) e Angelo (2013) apud Menter (2009) indicam a utilização deste modelo quando há formação de vórtices que resultem em:

- mudanças bruscas na tensão de cisalhamento média;
- escoamentos que se verifique um complexo campo de tensões;
- escoamento com variação significativa de efeitos de curvatura nas linhas de corrente;
- escoamentos secundários;
- escoamentos cuja força motriz é devida unicamente ao empuxo.

Angelo (2013) indica que quando comparados os modelos de viscosidade turbulenta, obtém representações físicas e matemáticas mais robustas do fenômeno, entretanto salienta o autor que a inserção de seis novas equações de transporte, sendo uma pra cada termo do tensor, demandará um maior custo computacional e também leva a uma instabilidade numérica.

3.3.1.8 Baseline Model (BSL)

Segundo Gabbi (2013) o BSL combina as vantagens do $k-\epsilon$ e $k-\omega$ de Wilcox, mas não consegue prever o ponto de separação de escoamento em superfícies lisas. Segundo o autor o modelo SST é justamente o BSL melhorado, onde considera-se o transporte das tensões de cisalhamento e suas previsões da separação do fluxo de maneira precisa. Segundo Ronchetti (2008) este modelo supre uma desvantagem do $k-\omega$ quanto à alta sensibilidade aos efeitos de jatos cisalhantes e escoamento livre. Ronchetti (2008) ressalta que há uma forte dependência das condições iniciais, possibilitando o surgimento de resultados inconsistentes. Desta forma transforma-se o $k-\epsilon$ em uma formulação $k-\omega$ e em seguida adiciona as equações correspondentes. Ou seja, o $k-\epsilon$ é igual a 1 próximo a parede e torna-se nulo quando dentro da camada limite. No exterior e fronteiras este modelo ($k-\epsilon$) volta a ser calculado.

3.3.2 Large Eddy Simulation (LES)

Segundo Angelo (2013) a teoria proposta pela simulação das maiores escalas utiliza filtros espaciais e temporais nas equações de conservação. Entretanto, o autor salienta que o processo de filtragem produz termos desconhecidos adicionais. Desta forma se faz uma analogia com a viscosidade turbulenta de submalha que há no modelo para representar as menores escalas. A diferença desta com a viscosidade turbulenta é que nesta última há a representação de todas as escalas de turbulência.

3.3.3 Detached Eddy Simulation (DES)

Angelo (2013) classifica os modelos DES como híbridos, pois combinam a simulação em maiores escalas (LES) com a média temporal de Reynolds (SSG). Segundo o autor as maiores escalas são utilizadas onde há a necessidade de captura dos vórtices (maiores estruturas vorticiais) e o modelo de duas equações é utilizado próximas às paredes. Sendo que a condição para que ocorra a mudança de um modelo para outro é função da escala de comprimento de turbulência ($L_t \rightarrow$ SSG) e ($\Delta \rightarrow$ LES). Caso $L_t > \Delta$ então se calcula as maiores escalas de turbulência através do LES, caso contrário, utiliza-se a SSG. Na equação da energia cinética turbulenta, para o modelo SSG o termo de destruição é substituído por uma expressão em função das escalas de comprimento de LES.

3.4 CAMADA LIMITE

A determinação de características da camada limite, tal que, a separação, a transição da camada limite laminar para turbulenta e a espessura da camada limite não são simples de mensurar, dependem de diversas características do fluido e do escoamento, dentre elas a turbulência, viscosidade, densidade, velocidade entre outras, entretanto simplificações são possíveis a partir de trabalhos disponíveis.

Silveira Neto ([2006]) destaca que um fluido se movendo a um alto número de Reynolds sobre uma superfície pode produzir uma camada limite turbulenta, quando isto ocorre, há um aumento dos efeitos de atrito viscoso sobre o corpo. O autor destaca que os estudos dos fenômenos físicos envolvidos na turbulência da camada limite objetiva a redução dos efeitos de arrasto sobre aviões e embarcações. Pode-se aqui destacar a necessidade deste estudo também em obras de construção civil, buscado a mesma finalidade aerodinâmica.

Segundo Pereira (2010), o conceito de camada limite foi inicialmente formulado por Ludwig Prandtl em 1904, o autor aponta que as dificuldades matemáticas para a solução evitavam um tratamento teórico dos escoamentos viscosos. Uma constante contribuição de

Prandtl foi a capacidade de analisar escoamentos viscosos, dividindo o fluxo em duas regiões: uma estreita e próxima ao obstáculo (camada limite) e outra na região restante. O autor ainda destacou que na camada limite o fluido se comporta como viscoso e fora dela o fluido tem efeitos de viscosidade desprezíveis e pode ser considerado não viscoso. Pereira (2010) destaca que até mesmo hoje em dia é difícil de prever a região de interface entre a camada limite e as demais regiões. Nesta camada as forças viscosas e inerciais são de grande importância. A caracterização do escoamento fica apenas em função do número de Reynolds. O autor destaca que as soluções através da camada limite decorrem de aproximações das equações de Navier-Stokes e desta forma requerem certos critérios sobre seu uso. Pereira (2010) indica a hipótese de considerar a camada limite como muito fina, para escoamentos muito turbulentos, como um método de aplicação bem sucedida de aproximação. O autor salienta que em fluxo livre o escoamento se divide no ponto de estagnação, circunda o objeto e adquire a velocidade do corpo devido a condição de não escorregamento. Na parte inferior e superior do corpo há a formação da camada limite, o escoamento nesta região é inicialmente laminar e em seguida há uma transição para o regime turbulento a uma distância do ponto de estagnação, sendo função das condições de corrente livre, rugosidade superficial e gradiente de pressão. Após a transição, há uma camada limite turbulenta que cresce mais rapidamente do que a laminar. Pereira (2010) destaca que este crescimento provoca um leve deslocamento das linhas de corrente no escoamento externo. O autor aponta ainda a formação da esteira como resultado da separação do escoamento na camada limite da superfície oriunda do aumento de pressão.

Pereira (2010) aponta a necessidade de utilizar soluções aproximadas para a camada limite turbulenta devido a não existência de soluções exatas. Como solução aproximada se utilizam as equações de quantidade de movimento sob a forma integral para gradientes de pressão não nulo. Segundo Ferreira (2013) a espessura da camada limite (δ) é dada pela equação (3.23), conforme a Figura 3.1, e o tamanho da primeira camada, definida também como primeiro layer (L_y) é dado de acordo com a equação (3.24). Ambas são função apenas do comprimento característico (D) e número de Reynolds (Re).

$$\delta = 0,035DRe^{\frac{1}{7}} \quad (3.23)$$

$$L_y = D\sqrt{74}(Re)^{\frac{13}{14}} \quad (3.24)$$

Segundo Cataldi (2002), experimentalmente pode-se obter o fator de proporcionalidade, resultando na Equação (3.25) referente a espessura da camada limite.

$$\delta = \frac{5 \cdot D}{\sqrt{Re}} \quad (3.25)$$

Também é possível mensurar essa espessura através de sítios na internet para softwares particulares e genéricos.

Tais como:

I- <http://geolab.larc.nasa.gov/APPS/YPlus/>

II- <http://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php>

III- <http://www.pointwise.com/yplus/>

O conceito previamente estabelecido para a distância de um nó na malha mais próxima da parede até esta é o y^+ (y plus ou y mais). Este parâmetro é de grande importância para caracterizar os nós das malhas mais próximas às paredes e desta forma permitir capturar os efeitos do escoamento para a condição de contorno previamente estabelecida. É possível mensurar esta variável através da equação:

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad (3.26)$$

Sendo u_* a velocidade de atrito, y é a distância à parede mais próxima e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

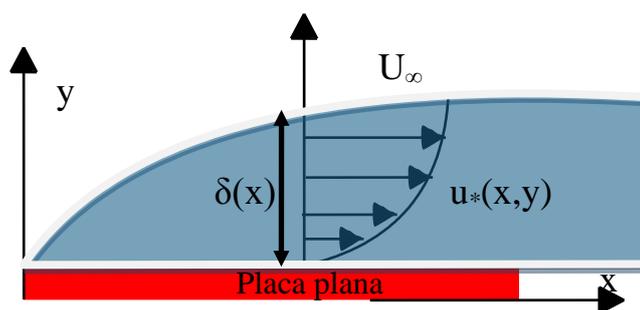


Figura 3.1 –Espessura da camada limite.

4. ASPECTOS DA NORMA DE VENTO APLICADA A EDIFICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE ARRASTO

4.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo serão abordados os conceitos preliminares das ações estáticas e dinâmicas do vento de acordo com a NBR 6123/1988. Será destacado o procedimento para obtenção dos coeficientes aerodinâmicos do escoamento do vento em estruturas.

4.2 CONCEITOS PRELIMINARES SOBRE A NORMA

A norma brasileira que descreve os aspectos do vento é a NBR 6123/1988- Forças devidas ao vento em edificações. O objetivo desta norma é tratar as forças atuantes em estruturas devido ao vento, estabelecendo condições para o cálculo das ações dinâmicas e estáticas do vento, determinando desta forma as cargas atuantes no cálculo estrutural em edificações. Esta norma simplifica as ações dinâmicas do vento atuantes em estruturas permitindo considerá-las como ações estáticas. Para isto é preciso apenas, descrever a frequência e período da edificação, é possível dispensar a análise dinâmica propriamente dita se o período for inferior a um segundo. Em síntese, a NBR 6123 abrange o cálculo da ação do vento em barras prismáticas, fios, cabos, torres reticuladas, muros, placas, coberturas, cúpulas, abóbadas e telhados curvos. Também permite o cálculo de efeitos dinâmicos em estruturas oriundos de efeitos de turbulência atmosférica, efeitos de vizinhança e efeitos oriundos da esbeltez das edificações.

A análise estática prescrita na norma é realizada por meio de coeficientes aerodinâmicos para edifícios de formas geométricas variadas, entretanto devem ter geometria bastante simples, tais como um prisma, cilindros, entre outras. Para estruturas com geometrias mais complexas e divergentes das existentes em normas, podem ser usadas, quando possível, simplificações do modelo, quando não, ensaios em túnel de vento são necessários. A norma brasileira permite que as forças devidas ao vento sejam consideradas separadamente para elementos de vedação, parte da estrutura e também a estrutura integral.

Segundo Pasqual (2011) nas edificações convencionais os materiais mais empregados são o concreto, aço e alvenaria, que tem período fundamental menor que um segundo. Além disso, essas estruturas possuem alta rigidez, resultando comumente em pequenos deslocamentos. O autor destaca ainda algumas estruturas reticuladas, quando carregadas, apresentam grandes deslocamentos, resultando em deformações. Nestas estruturas deverá ser levado em

consideração o efeito dinâmico, obtendo o comportamento real da mesma.

Toassi (2013) apresenta uma sequência sobre a metodologia sistemática apontada na norma para determinação das cargas atuantes:

I- Determinação da velocidade básica do vento (V_0), esta é função da região onde a obra se encontra, e desta forma é baseada no mapa das isopletras;

II- Cálculo da velocidade característica, que depende de diversos fatores, dentre eles: rugosidade, altura da edificação, grau de segurança requerido e velocidade básica do vento;

III- A partir da velocidade característica é possível obter a pressão dinâmica;

IV- A partir da geometria da estrutura, determina-se os coeficientes de pressão;

V- A partir de todos os dados citados, é possível calcular as forças atuantes.

4.3 PRESSÃO DINÂMICA

A NBR 6123 prescreve parâmetros para se obter a pressão dinâmica (q) dada pela Eq. (4.1). Este valor é dado pelo produto de um fator pelo quadrado da velocidade característica (V_k). A pressão dinâmica corresponde a velocidade característica em condições normais de pressão (1atm=1013,2mbar=101320 Pa, a 15°C). Desta forma a densidade do ar é 1,225kg/m³.

$$q(z) = 0,613V_k(z)^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (4.1)$$

4.4 COEFICIENTE DE PRESSÃO

A região de onde o vento sopra nas edificações é denominada barlavento e a região oposta a esta é denominada sotavento. A ação do vento provoca pressões e sucções na estrutura. Os gradientes de pressão são abordados na NBR 6123 através dos coeficientes de pressão, que são função da geometria da construção, relação entre as dimensões, existência de abertura e permeabilidade da edificação. Em edificações retangulares, seus valores são bem definidos em norma. Para casos em que a geometria em planta da edificação se distancie de um retângulo, recomenda-se ensaios experimentais em túneis de vento, conforme será verificado no estudo de uma edificação real no capítulo 6.

4.5 VELOCIDADE CARACTERÍSTICA

A velocidade característica do vento (V_k) é um fator de referência para cálculo da pressão dinâmica nas edificações e conseqüentemente fator predominante na obtenção dos coeficientes aerodinâmicos. Esta velocidade é dada de acordo com a Eq. (4.2) e é obtida a partir do produto da velocidade básica fornecida no gráfico de isopletras Figura 4.1.

$$V_k(z) = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2(z) \cdot S_3 \quad (4.2)$$

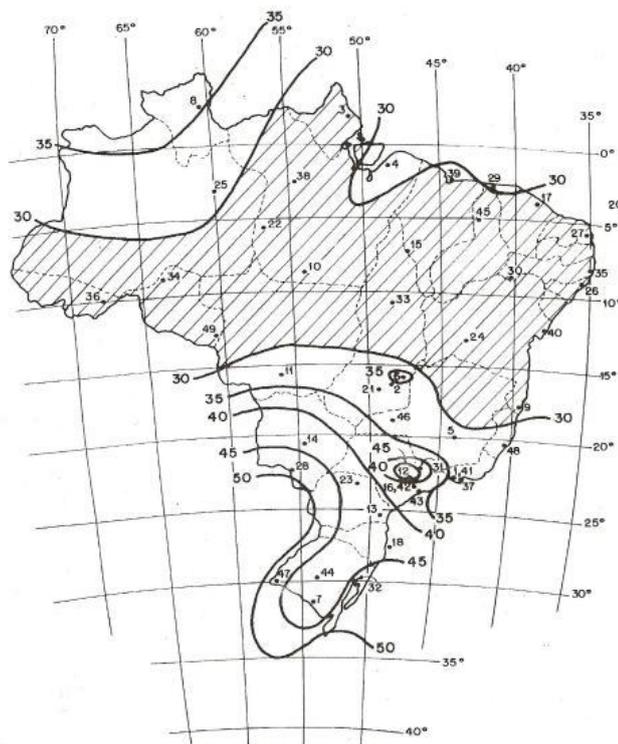


Figura 4.1 –Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s).
Fonte: NBR 6123/1988

Os fatores S_1 , S_2 e S_3 são dados por:

S_1 : fator topográfico que leva em consideração as variações do relevo do terreno e é dado pelo item 5.2 da NBR 6123/1988;

S_2 : Fator que considera a rugosidade do terreno e variação da velocidade do vento com a altura. Este valor é dado pela Eq. (4.3). Esta equação considera parâmetros meteorológicos disponíveis na Tabela 1 da NBR 6123.

$$S_2(z) = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (4.3)$$

Sendo: b-fator meteorológico;

p- expoente da lei de potencial de variação de S_2 ;

z- a altura medida a partir da superfície do terreno no ponto;

F_r - fator de rajada.

S_3 é o fator estatístico, baseado em conceitos estatísticos leva em conta o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. A NBR 6123 através de sua tabela 03 leva em consideração o tipo de edificação e o referido fator estatístico.

A partir dos valores já mencionados, calcula-se a força para uma determinada altura z através da Eq. (4.4), sabendo que esta equação é uma consequência da Eq. (2.126).

$$F(z) = C_A \cdot q(z) \cdot A \quad (4.4)$$

4.6 VENTO EM BAIXA TURBULÊNCIA

Em seu item 6.5.3, a NBR 6123/1988 classifica que um edificação encontra-se em região de alta turbulência quando sua altura não excede duas vezes a altura média das edificações nas vizinhanças, estendendo-se estas, na direção e no sentido de incidência do vento, no mínimo a:

- 500m, para uma edificação de até 40m de altura;
- 1000m, para uma edificação de até 55m de altura;
- 2000m, para uma edificação de até 70m de altura;
- 3000m, para uma edificação de até 80m de altura.

Toda edificação que não estejam nesta localização, serão consideradas em região de baixa turbulência.

4.7 COEFICIENTE DE ARRASTO

O coeficiente de arrasto da edificação, dependerá da região que esta se encontra, conforme já visto no item anterior. Neste trabalho serão analisados apenas casos em que a edificação encontra-se isolada, sem vizinhança, logo, será caracterizada como edificação em região de baixa turbulência, e o C_A é retirado da Figura 4.2 (figura 4 da NBR6123/1988).

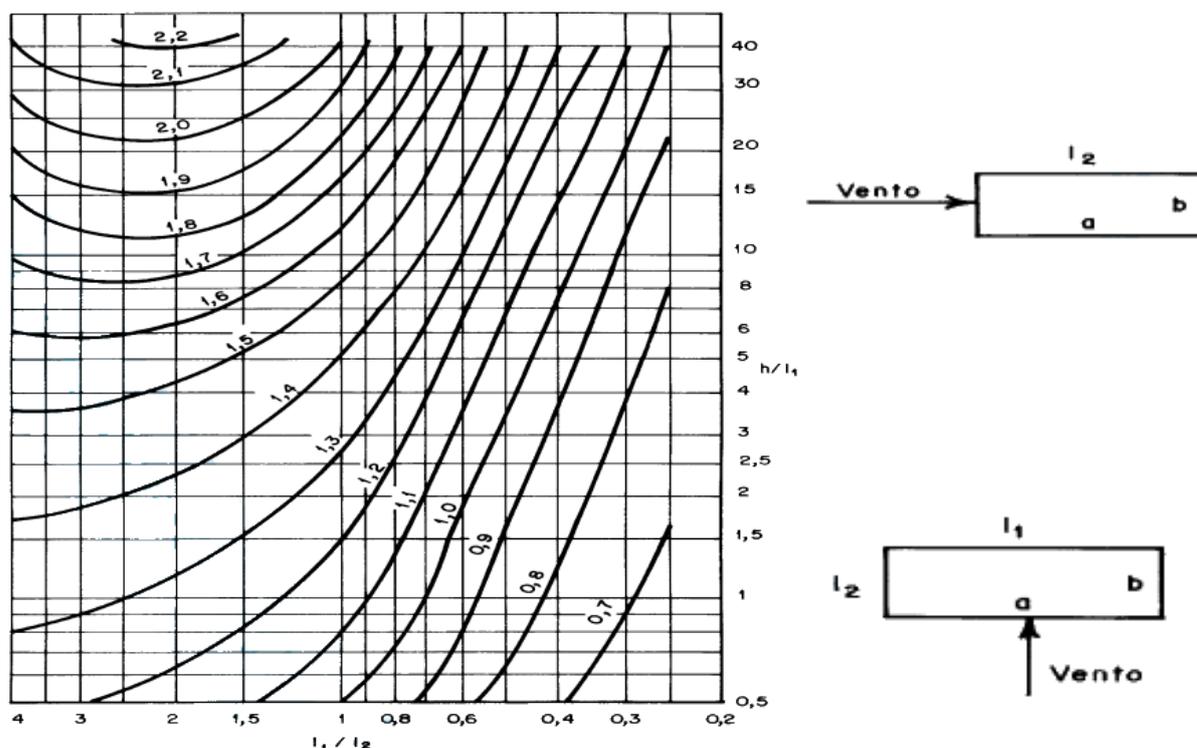


Figura 4.2 – Coeficiente de Arrasto para edificações em vento de baixa turbulência.

Fonte: NBR 6123/1988

5. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS PARA A MODELAGEM EM CFD DE EDIFICAÇÕES.

5.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo serão abordadas as características referentes ao software comercial utilizado nas simulações computacionais. Nesta etapa serão detalhados os passos seguidos para uma simulação genérica de escoamento de um fluido em torno de uma estrutura.

5.2 SOFTWARE UTILIZADO

Nas simulações realizadas neste trabalho foi utilizado o software comercial Ansys 14.0 em seu módulo fluido dinâmico denominado CFX. Este software utiliza o método de volumes finitos baseado em elementos, conforme já detalhado na seção 2.7.3, neste método discretiza-se o domínio espacial em volumes de controle finitos através de uma malha. As equações são integradas em cada VC, resultando em equações discretas que garantem a conservação de massa, quantidade de movimento e energia (Ansys, 2007)

O software aplicado utiliza uma interface gerenciadora de módulos denominada Workbench, onde é possível gerenciar as etapas essenciais para a simulação, que são ilustradas na Figura 5.1.

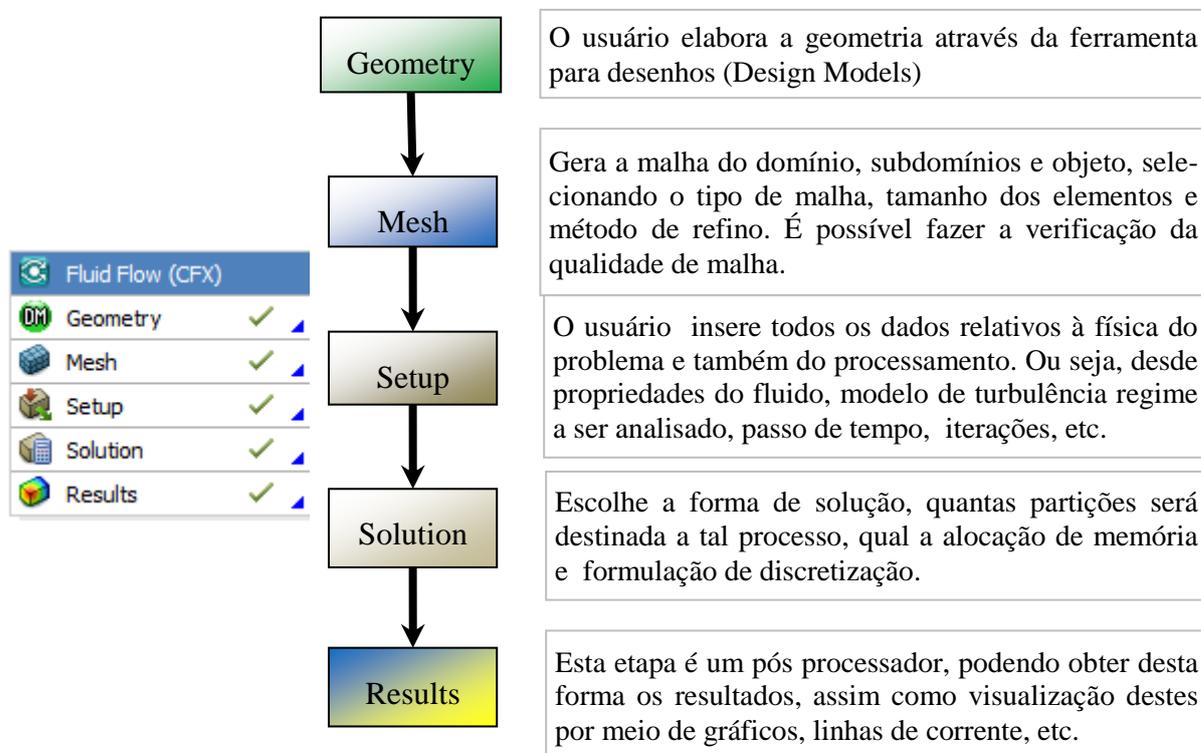


Figura 5.1 –CFX- Workbench- Ansys 14.0.

Segundo o tutorial do Ansys®-CFX 14.0 incorporate (2012), este módulo utiliza o método iterativo *Incomplete Lower Upper (ILU)* com "*Multigrid (MG) accelerated*" para resolver o sistema discreto de equações lineares, ou seja, ele lineariza as equações que aparecem após a discretização. Ansys (2012) utiliza a matriz da Eq. (5.1) como o sistema de equações para a solução das equações discretas.

$$[A][\phi] = [b] \quad (5.1)$$

Nesta equação $[A]$ é a matriz de coeficientes, $[\phi]$ é o vetor solução e $[b]$ é o lado direito da equação. A equação (5.1) pode ser resolvida de forma iterativa a partir de uma solução aproximada, f^n , que pode ser melhorada a partir da correção ϕ' , obtendo desta forma uma solução mais precisa f^{n+1} , resultando assim na expressão:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' \quad (5.2)$$

Onde ϕ' é a solução da equação (5.3).

$$A\phi' = r^n \quad (5.3)$$

O resíduo visto na equação (5.3) pode ser explicitado através da equação (5.4).

$$r^n = b - A\phi^n \quad (5.4)$$

Desta forma, Ansys (2012) aponta que com o uso deste algoritmo repetidamente, encontra-se a solução com a acurácia desejada para o problema. Entretanto apontam que com o aumento do número de elementos da malha computacional a capacidade de resolução das iterações tende a diminuir rapidamente o desempenho. Este desempenho também tende a diminuir quando são usados elementos com grandes raios de aspectos.

5.2.1 Geometria

A geometria da estrutura pode ser desenhada através do próprio software em sua interface CAD, denominada **Geometry**, conforme indicada na Figura 5.2. Entretanto ressalta-se que esta plataforma não possui uma completa ferramenta de desenho, necessitando então de uma maior habilidade do operador. Outra alternativa para este desenho através da importação de ferramentas de desenhos, dentre elas o AutoCAD comercializado pela AUTODESK, o Microstation da BENTLEY e outros. O software Ansys importa arquivos em diversos formatos, o usado neste trabalho foi a extensão "SAT". Adotou-se por praticidade, o desenho de geometrias simples através do próprio Geometry, já para as mais complexas (formas reais de edificações), foram utilizadas as ferramentas computacionais de desenho. Para redução do custo computacional, adota-se o uso de criação de um domínio computacional e em seguida realiza a remoção do objeto, através de uma operação booleana. Desta forma o domínio fica vazio, onde este vazio é o objeto de interesse. Uma ferramenta de bastante uso durante o uso

da plataforma Geometry é a nomeação das faces, através do Named Selection, facilitando desta forma a utilização de cada face em etapas futuras.

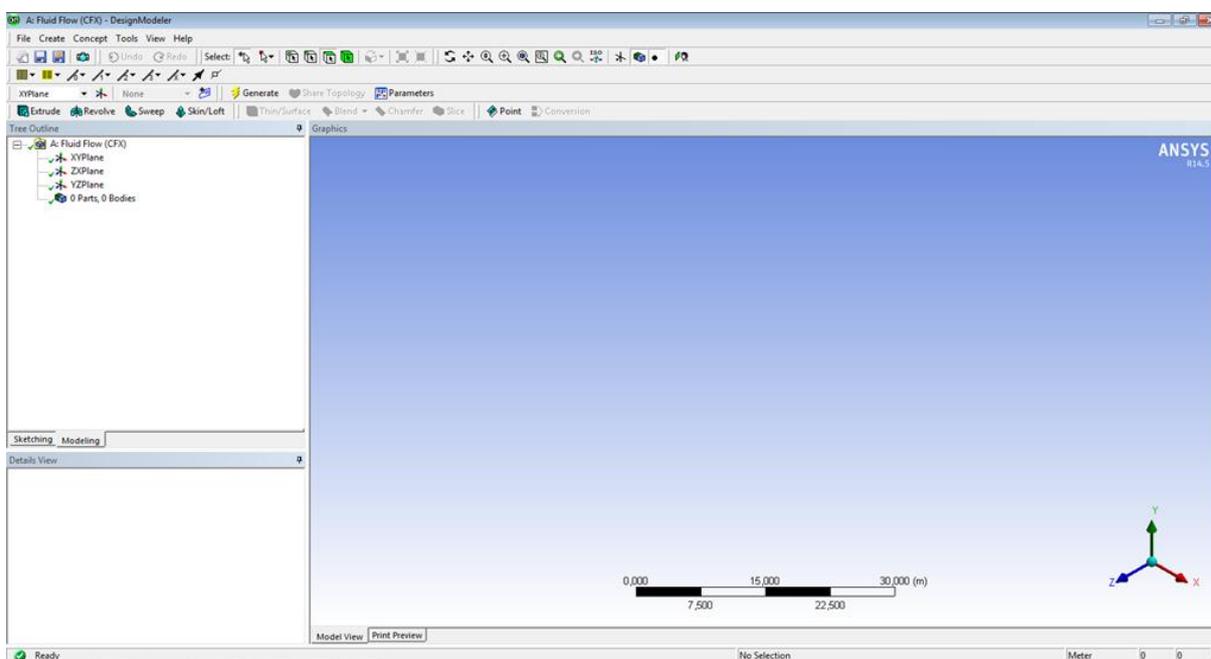


Figura 5.2 –Módulo Geometry- Ansys 14.5.

5.2.2 Malha

O software utiliza uma plataforma específica para geração da malha do objeto (Mesh), conforme a Figura 5.3.

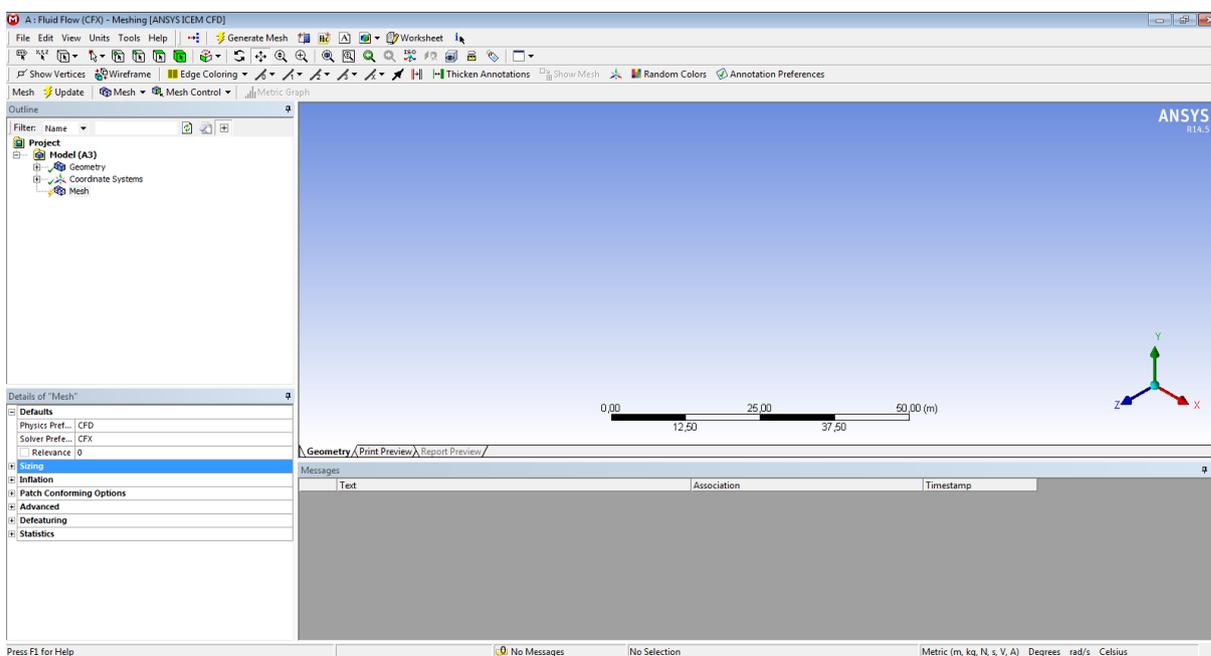


Figura 5.3 –Módulo Mesh - Ansys 14.5.

Nessa etapa, definições das configurações das malhas podem ser usadas, conforme a Figura 5.4.

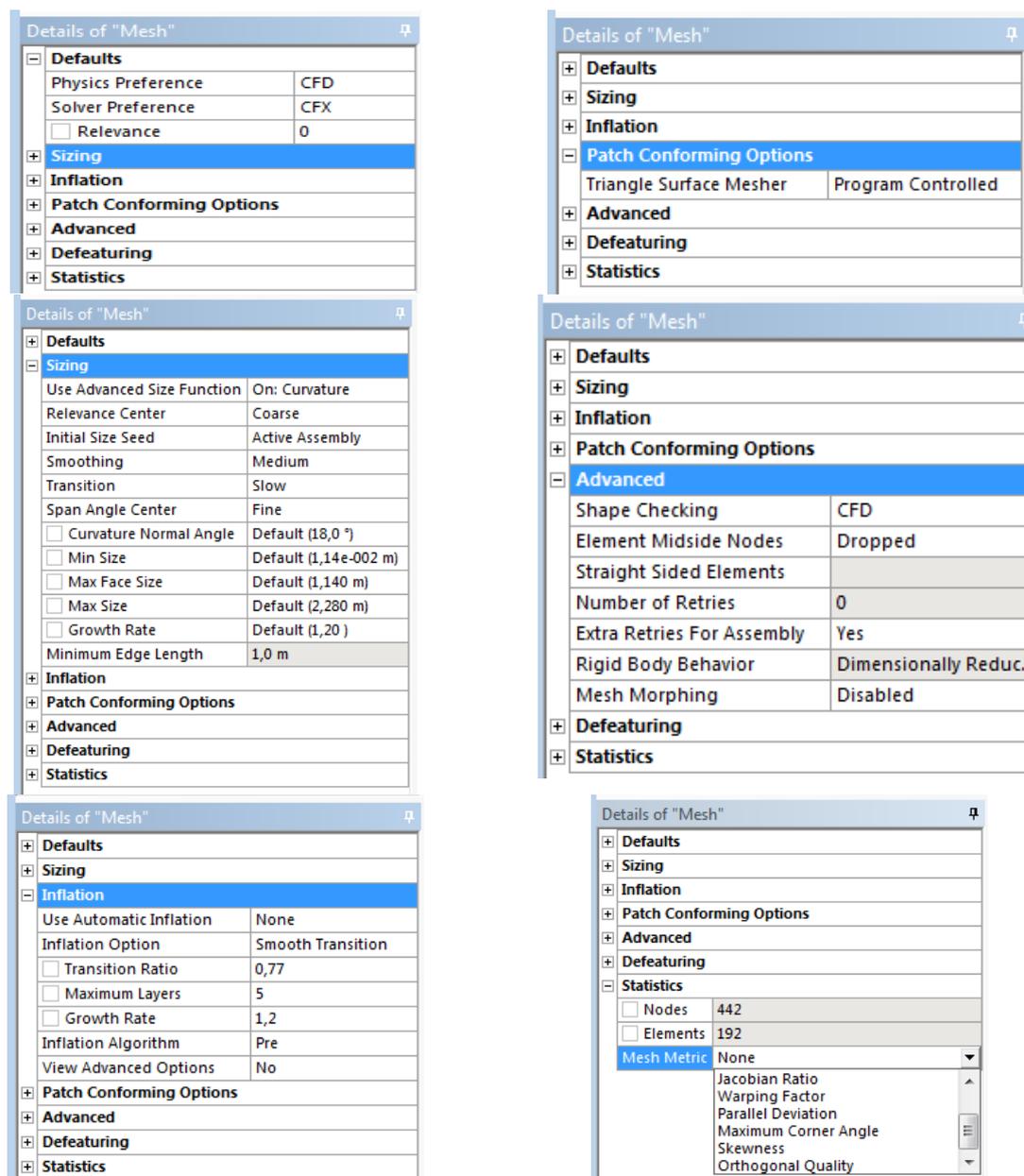


Figura 5.4 –Módulo Mesh - Ansys 14.5.

- Os defaults da física do problema: Escolhe-se o solver para que o gerenciador de malha utilize configurações específicas, neste trabalho foi selecionado o solver CFX;
- Sizing: Informações referentes aos comprimentos dos elementos, máximo e mínimo. O operador também consegue inserir características referentes às prioridade ao refinar regiões curvas e na proximidade de regiões de interesse. Adota-se sempre o uso de uma transição entre um elemento e o elemento seguinte de 20%, ou seja um fator de 1,20.
- Inflation: Permite características de transição de malha para inflar uma camada de elementos.

- Patch conforming options: Este método cria inicialmente a malha de superfície e em seguida a malha de volume.
- Advanced: bastante indicada para fluidos, esta função permite uma boa taxa de transição de regiões de curvatura para proximidade.
- Statistics: Remete a estatísticas de malha, permitindo acompanhar a quantidade de nós, de elementos e também obtenção de informações do refinamento e qualidade de malha.
- Utilizou-se também uma ferramenta adicional, denominada *Preview surface mesh*, que permite uma pré visualização da malha evitando o uso de memória para refino em regiões desnecessárias.

Para a qualidade de malha foram adotados valores mais próximos a 1 (um) para a ortogonalidade (*Orthogonal Quality*) e razão de aspecto (*Aspect Ratio*) e valores próximo a zero para a deformação da malha (*Skewness*). A plataforma Mesh do Ansys permite visualizar quais elementos apresentaram problemas de qualidade. É obvio que em refinamento de malhas para objetos com formas complexas e milhares de elementos em todo o domínio, alguns elementos não obedecerão a estes requisitos, mas cabe ao operador, responsável por malhar a estrutura, permitir ou não os elementos deformados ou não ortogonais nas regiões de interesses. Quando elementos em regiões importantes apresentarem maiores problemas, deverão ser corrigidos com refinamentos locais, ou outras ferramentas do software capaz de corrigir problemas localizados, como é o caso do *Pinch control*.

5.2.3 Setup

Nesta plataforma, conforme indicado na Figura 5.5 o usuário entra com todas as características da física dos problemas, dentre elas podemos destacar:

- Características do material (Fluido) - Conforme indicado na Figura 5.5, possibilita ao operador editar massa específica, viscosidade, temperatura, massa molar, calor específico, pressão atmosférica e entalpia de referências, entropia, condutividade térmica, expansividade térmica, entre outras. Caso seja necessário, o software dispõe de materiais previamente definidos, deixando a escolha mais sucinta.
- Características do escoamento - Modelo de Turbulência, função de parede, transição de turbulência, entre outras.
- Características do domínio - Funções de parede (Boundary Type), conforme a Figura 5.5:

- Entrada (Inlet): Permite impor as características de entrada, como velocidade, pressão, escoamento de massa, tipo de turbulência na entrada;
 - Saída (Outlet): De maneira semelhante à situação anterior, permite configurar velocidade, pressão e escoamento de massa;
 - Paredes (Wall): Permite caracterizar cada parede como *Free Slip Wall* ou *No Slip Wall*. referente à condição de livre para escoar e não escorregamento (ou deslizamento) respectivamente. Quando configurado o *No Slip Wall*, é possível caracterizar a rugosidade da face, podendo escolher entre *Smooth Wall* (default do software), e *Rough Wall*, onde o operador insere as características do comprimento de rugosidade.
 - Simetria (Symmetry): Caracteriza uma região como simétrica, minimizando os custos computacionais, nos escoamentos turbulentos evita-se esta opção, uma vez que a simetria não é garantida.
- Características temporais - Na aba *Analysis type* (conforme Figura 5.6) é possível escolher o tipo de análise (Transiente e estacionária). Ao escolher transiente o operador deverá inserir parâmetros iniciais como duração do escoamento, passo de tempo e tempo inicial. O passo de tempo é escolhido de acordo com o tamanho da malha, de forma que se mantenha um número de Courant máximo entre 2 e 10 conforme sugere o Manual do Ansys (Ansys CFX12, 2009). Para o resíduo do número de Courant, o mesmo manual adota valores entre 0,5 e 1. Devido à falta de valores disponíveis na literatura para as simulações de escoamento em torno de edificações foi necessário fazer análise de convergência do número de Courant. Ainda para as análises transientes, informações (velocidade, pressão, entre outros) iniciais devem ser inseridas, ou seja aquelas no tempo $t=0$.
- Malha adaptativa - Destaca-se ainda nesta etapa do *setup* a opção de escolher por uma malha adaptativa, de forma que tenha seus elementos variados de acordo com o maior gradiente de pressão, velocidade, vorticidade, entre outros. Esta ferramenta é bastante eficaz em redução de custo computacional e refino localizado apenas na regiões de interesse. Devido ao regime turbulento, não utilizou-se esta ferramenta, pois nestes casos se indica o uso de malhas estruturadas.
- Expressões - Nesta opção é possível inserir expressões (ou equações) para obter os resultados no *Solver* conforme a Figura 5.8;

- Control Solver - Nesta aba, conforme a Figura 5.8, características específicas de critério de marcha e parada para a simulação, entre elas ordem de resolução do método transiente e turbulência numérica, critérios de convergência (número de Loops e limite residual);
- Output Control - O operador pode selecionar nesta guia as informação de resultados do software, ou seja, quais informações há interesse em reportar (imprimir), podendo escolher então as janelas gráficas que devem ser exibidas durante o processamento.

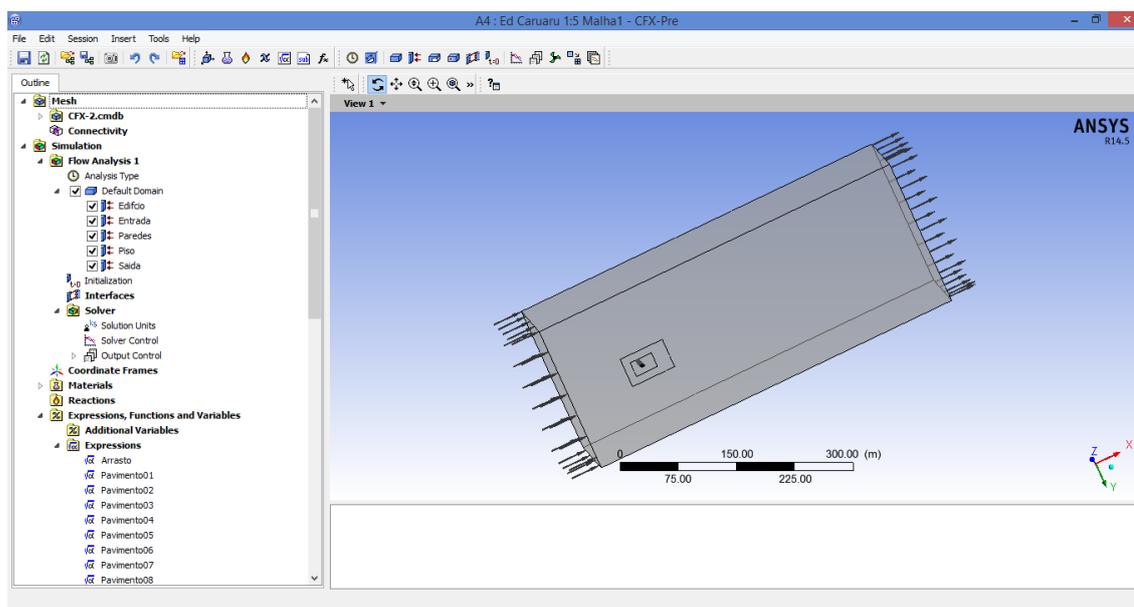


Figura 5.5 –Módulo Setup - Ansys 14.5.

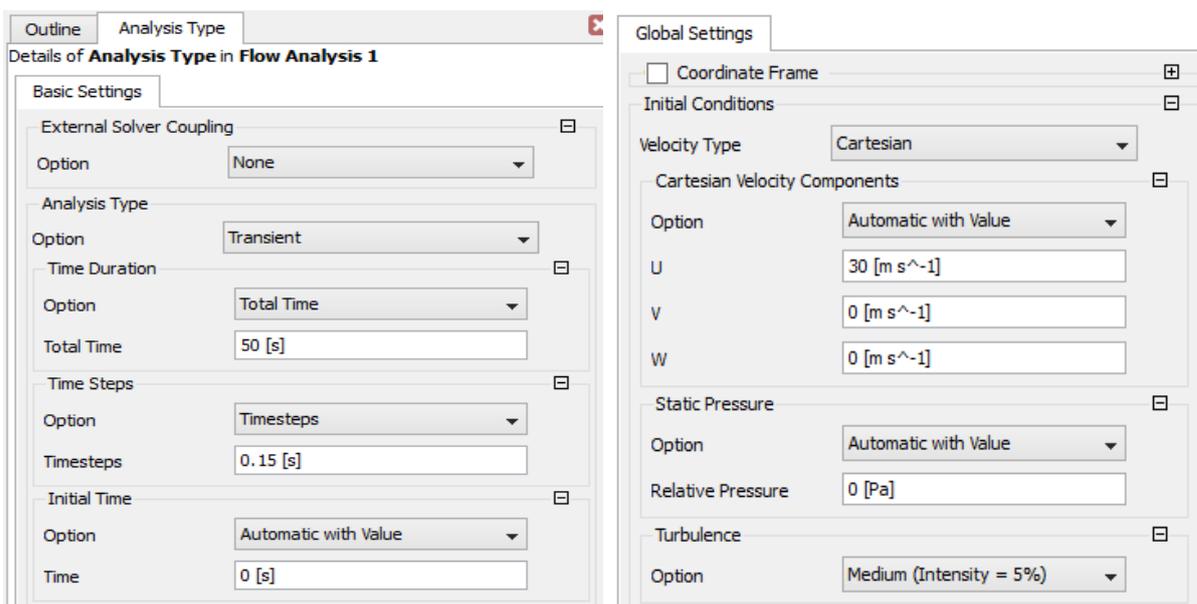


Figura 5.6 –Analysis Type e Configurações do domínio - Ansys 14.5.

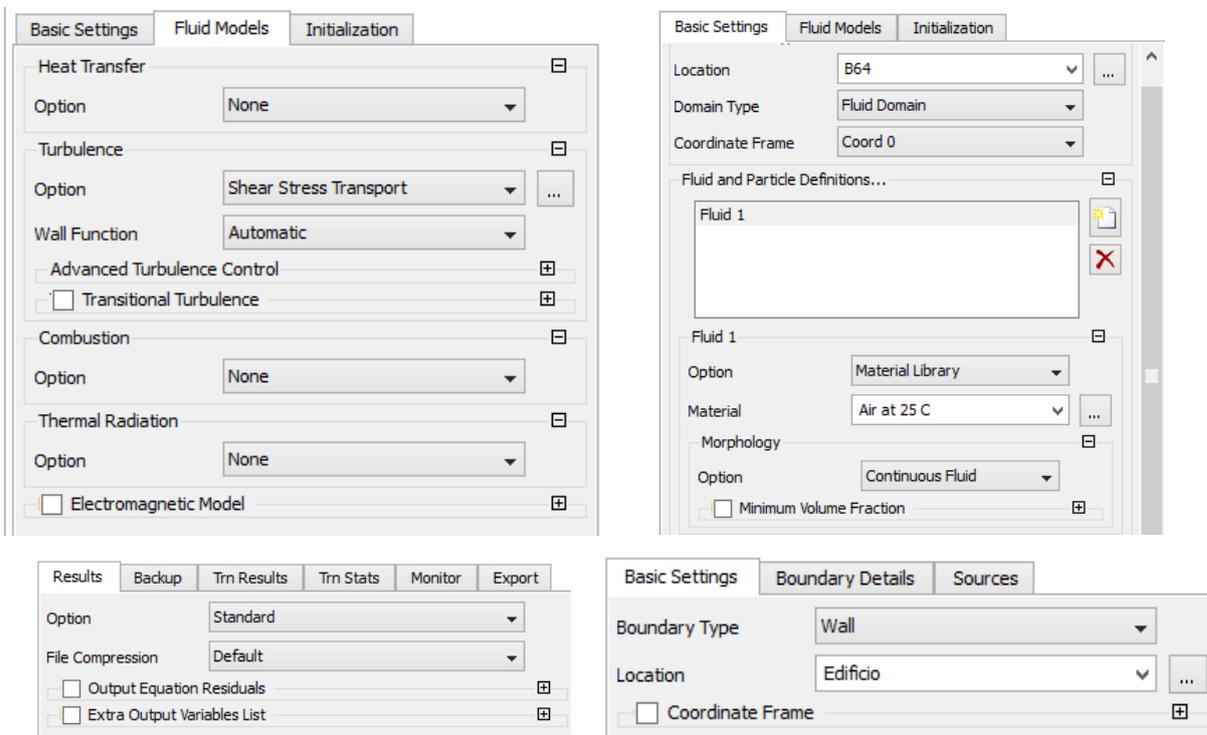


Figura 5.7 –Configurações do domínio e características iniciais - Ansys 14.5.

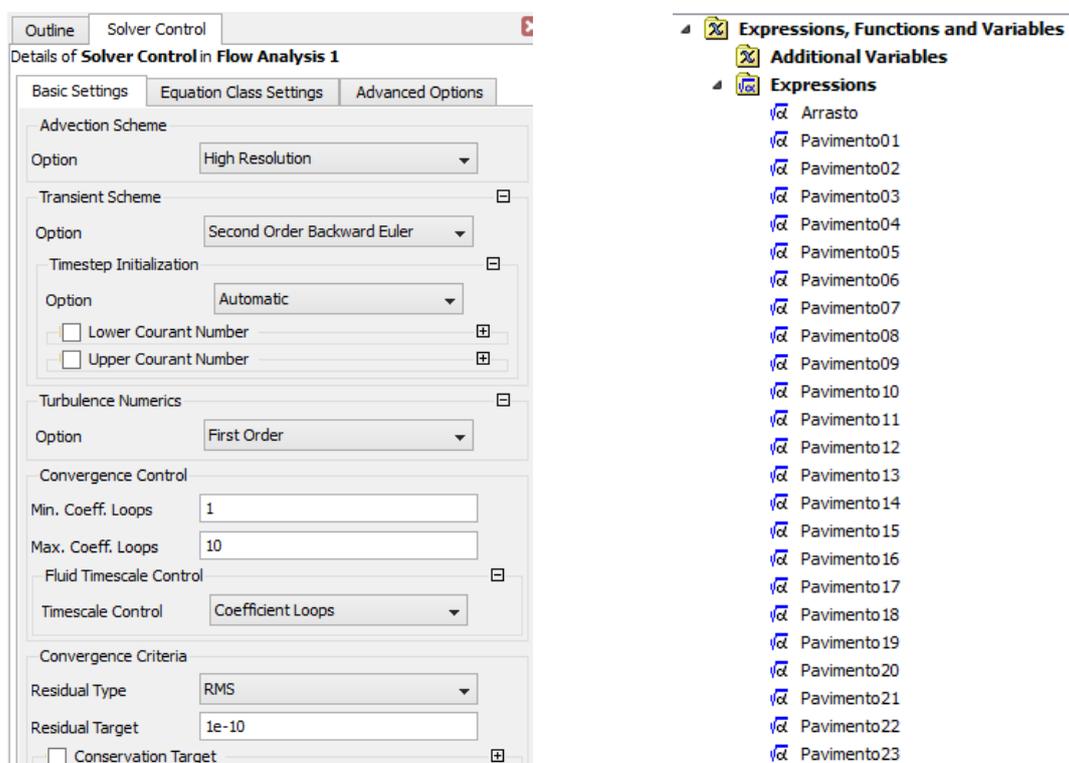


Figura 5.8 –Solver Control e Expressions - Ansys 14.5.

5.2.4 Solver

As definições iniciais do *solver* do *software* tem sua interface conforme explicitado na Figura 5.9. Nas configurações globais, é possível alterar definições conforme as abas:

- *Run Definition*: Nesta etapa o operador pode escolher as definições iniciais dentre elas as opções de inicialização (Initialization Option), onde é possível considerar condições iniciais, importando um arquivo previamente salvo de outra simulação nas extensões: ".res", ".bak", ".trn". Ainda nesta etapa é possível escolher o tipo de marcha, marcando a opção de precisão dupla (*Double Precision*). Quanto ao modo de execução, pode-se escolher:
 - Serial - Usa apenas um núcleo do processador, ou seja está em série.
 - Platform MPI Local Parallel- Adota-se um processamento em paralelo na mesma máquina, dependendo da quantidade de núcleos da máquina, é possível escolher quantos serão destinados à cada simulação conforme visto na Figura 5.9.
 - Platform MPI Distributed Parallel - Nesta etapa o operado pode acoplar mais de uma máquina, desde que ambas tenham o software instalado.

Partitioner, Solver e Interpolator: Permite a escolha da prioridade de execução, conforme Figura 5.10, considerando também qual deve ser a alocação de memória.

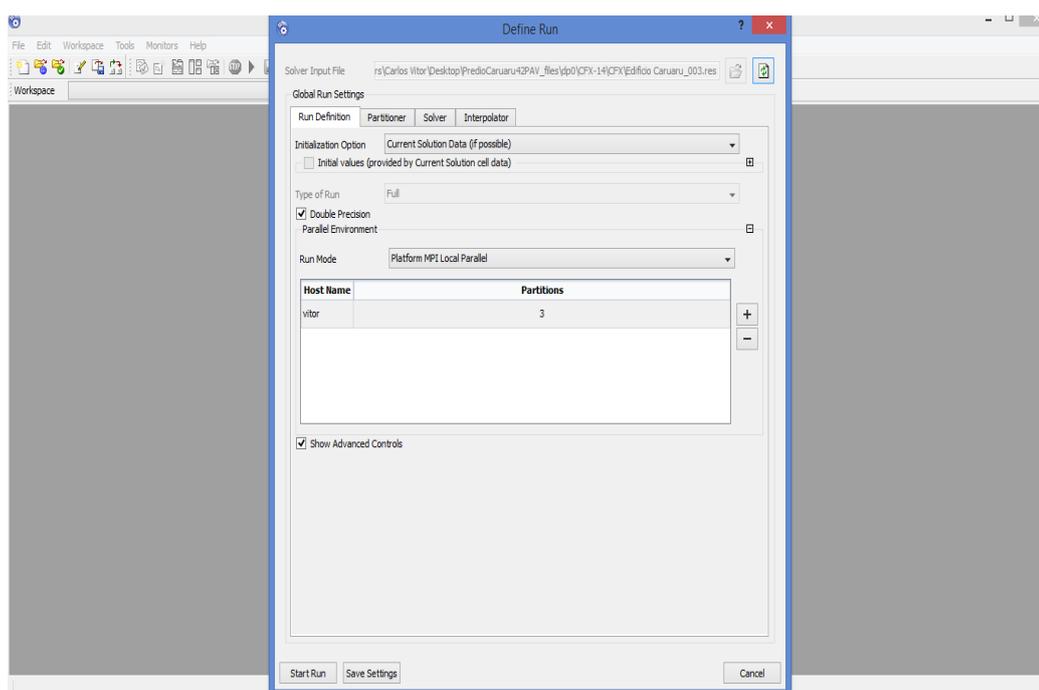


Figura 5.9 –Plataforma Solver - Define Run- Ansys 14.5.

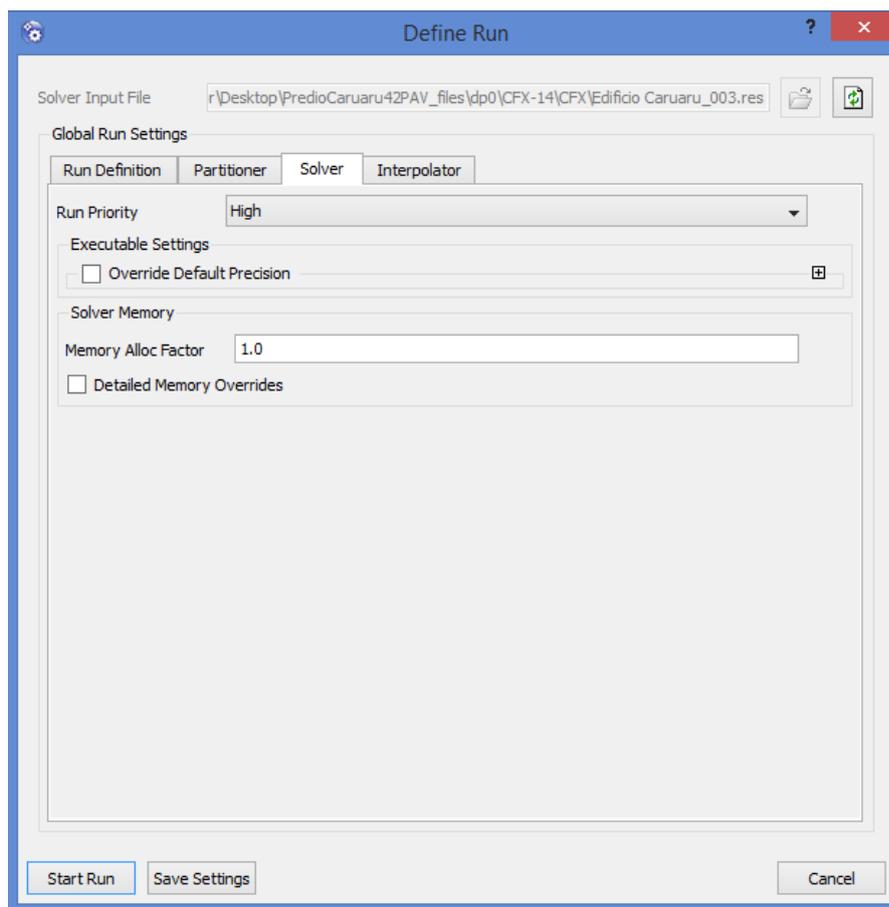


Figura 5.10 –Partitioner, Solver e Interpolator Alocações de memória- Ansys 14.5.

Após as Configurações iniciais, ao executar o solver (*Start Run*), inicia-se a interface *Solver Manager*, onde é possível acompanhar em tempo real a resolução do problema e resultados requisitados no *Output Control*, conforme já informado na subseção 5.2.3 (Setup). Ao iniciar o Solver Manager, o Ansys irá ler toda a física do problema, ou seja, todos os itens informados no capítulo 5, conforme a Figura 5.11. Desta forma é possível o operador acompanhar critérios preliminares e direto sem precisar de nenhum processamento dos resultados.

Ainda no Solver Manager, é possível salvar um arquivo da atual situação da simulação, para continuar em outro momento, ou mesmo para não perder as informações caso haja um desligamento inesperado. Também é possível exportar os dados do processamento nos formatos: ".txt" e ".csv". De acordo com a Figura 5.11, vê-se que é possível acompanhar as valores de velocidade em cada componente (U,V e W) e também seus resíduos. Também é possível acompanhar as variações de massa, momento, turbulência, funções de parede e contorno, além das variáveis indicadas no Output do Setup.

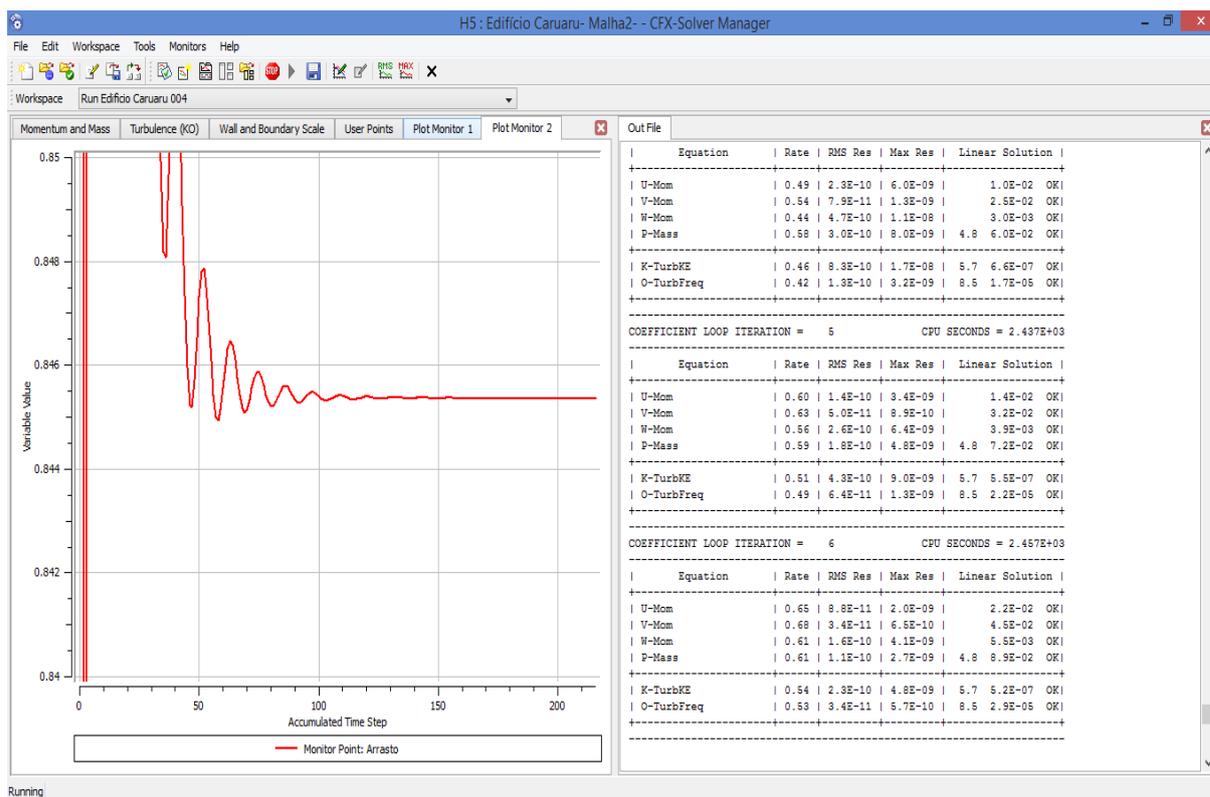


Figura 5.11 –Solver Manager- Ansys 14.5.

5.2.5 Resultados

Na opção de Results é possível verificar os resultados em uma plataforma mais acessível de acordo com a integração homem-máquina, conforme a Figura 5.12. Nesta etapa é possível visualizar gráficos, *streamlines*, vetores e partículas do movimento. Para isto o operador pode inserir linhas e planos nesta própria plataforma, de forma a visualizar os resultados apenas na região de interesse. É possível o operador acompanhar as variáveis utilizada na simulação, através da aba *Variables*, tais como número de Courant, densidade, viscosidade dinâmica, pressão, temperatura, entropia estática, turbulência, função de parede, velocidade, entre outras. Ainda na aba *Results*, o operador também tem acesso à calculadora:

- *Macro Calculator*- Calcula funções macro, como o *fan noise*, *confort factor*, *liquid turbunce performance*.
- *Mesh Calculator*- Permite acompanhar informações completas sobre a malha utilizada na simulação.
- *Function Calculator*- Calculadora utilizada para fornecer valores de variáveis (área, força, comprimento, volume, massa, entre outras).

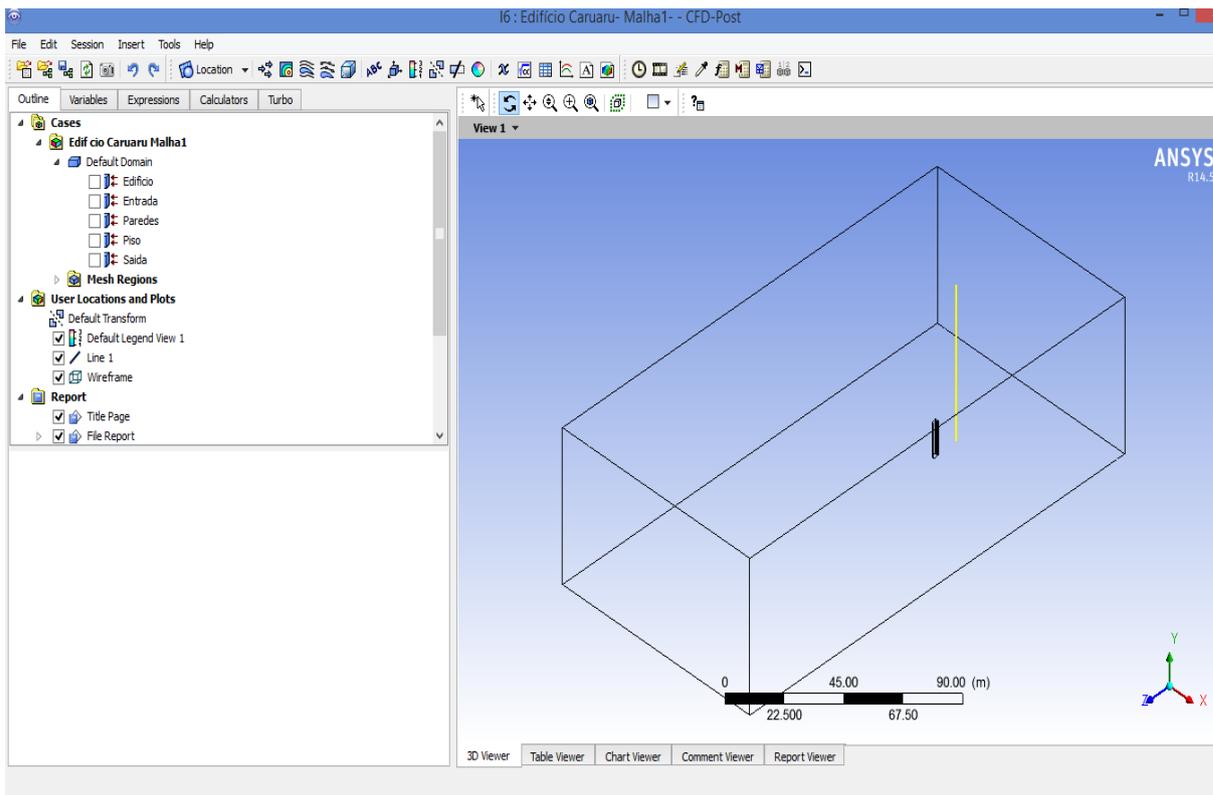


Figura 5.12 –Results - Ansys 14.5

6. ESTUDO DE CASOS: AQUEDUTO DA TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO E EDIFICAÇÃO REAL

6.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo são apresentadas as simulações computacionais propriamente ditas. Sendo seguida cada etapa de inserção de dados conforme o capítulo 5. Foram realizadas simulações em estruturas de acordo com as evoluções da modelagem propostas nas Figura 1.2 e Figura 1.3, do capítulo 1.

6.2 ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL

Escoamentos bidimensionais são aqueles onde apenas duas dimensões do domínio são empregadas na análise. Em estruturas como aquedutos e pontes, como uma das dimensões impera sobre as demais e o perfil de velocidades horizontal é praticamente constante, é possível aproximar o valor do arrasto ao definido para geometrias planas (bidimensional), normalizando assim o eixo da maior dimensão. Limas (2003), Alé (2010) e Braga (2014) afirmam que o escoamento pode ser considerado bidimensional quando a estrutura tem comprimento idealmente infinito, como aerofólios, pontes, entre outros.

Nesta etapa do trabalho foi analisado o escoamento em torno de uma seção real de um aqueduto. Como esta geometria tem uma dimensão bastante superior as demais, é possível considerar este objeto como bidimensional. Entretanto para uma análise na seção em destaque, não foram obtidos valores experimentais (ensaios em túnel de vento), nem encontrados valores de referência na literatura. Desta forma foi necessário evoluir o modelo, partindo de geometrias mais simples até chegar à seção em questão, conforme já destacado na Figura 1.2. Essa metodologia progressiva faz parte de uma adaptação própria para uso do software.

Com isto para o primeiro modelo teremos uma seção quadrada, uma vez que o valor do coeficiente de arrasto para corpos rombudos bidimensionais é encontrado tabelado nas principais bibliografias da área. Após esta simulação, o modelo foi evoluído, inicialmente quanto à geometria, e em seguida às suas características físicas, tornando os dados idênticos à situação real. Como os valores de referência são apenas para o coeficiente de arrasto, outros coeficientes aerodinâmicos, tais como força e velocidade, não foram monitorados, entretanto são de fácil acesso para futuras análises.

É prática comum nas simulações computacionais em CFD a normalização das constantes, ou seja, consideram-se todos os valores como unitários e varia apenas uma dessas grandezas. Como é o caso do número de Reynolds (Eq. (2.18)), onde foram considerados

todos os valores constantes e variados apenas a velocidade do escoamento.

Foram criados três modelos para a evolução nas simulações bidimensionais, vistos na Figura 6.1, que descreve as características conforme:

Modelo 01-Representa uma seção quadrada. Foram normalizadas todas as constantes (massa específica, viscosidade dinâmica, etc.), ou seja, considerado que todas as constantes têm valor unitário, conforme proposto por Toassi (2013), assim como, Souza Junior e Antunes (2010):

Massa específica (ρ)=1,0kg/m³

Viscosidade dinâmica (μ) = 1,0kg.s/m²

Modelo 02- Geometria com dimensões reais do aqueduto, normalizando a massa específica, viscosidade dinâmica, para que o número de Reynolds mantivesse relação direta com a velocidade, assim como no modelo anterior.

Modelo 03- Geometria aqueduto, conforme item anterior, desta vez adotando todos os demais valores reais, tais como: velocidade, massa específica, viscosidade dinâmica, entre outros.

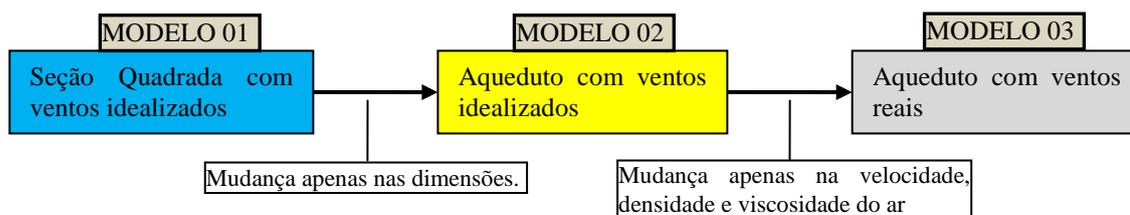


Figura 6.1 –Evolução da Modelagem - Escoamento Bidimensional.

6.2.1 Seção Quadrada- Modelo 01

Na literatura há valores predefinidos para o coeficiente de arrasto em geometrias de seções conhecidas. A Figura 6.2 indica os coeficientes de arrasto para geometrias retangulares de acordo com Çengel e Cimbala (2007). Todos os casos citados nesta figura foram para $Re > 10^4$. Para a seção considerada mais simples, um quadrado de lado unitário o coeficiente de arrasto $C_A=2,20$.

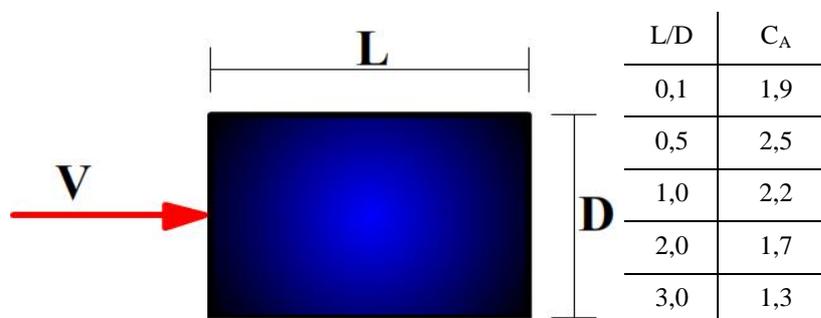


Figura 6.2 –Coeficiente de arrasto de corpos bidimensionais com $Re \geq 10^4$.
Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2007)

6.2.1.1 Domínio computacional - Seção Quadrada - Escoamento bidimensional

Para o domínio computacional foram seguidas prescrições encontradas na literatura conforme Toassi (2013), Souza Junior e Antunes (2010) e Najafi et al (2012), onde as dimensões propostas por este encontram-se na Figura 6.3. De maneira geral o comprimento do domínio é entre $16D$ e $20D$, sendo D a dimensão (ou diâmetro) característica.

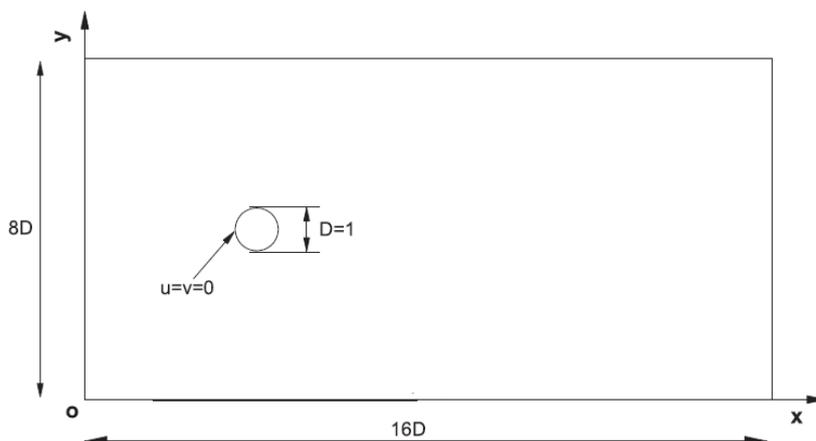


Figura 6.3 – Dimensões do domínio.
Fonte: Najafi et al (2012)

Foram verificados para diferentes tamanhos de domínio, entretanto, percebeu-se que a redução no domínio computacional reduz pouco o número de elementos, uma vez que os elementos longe da Regiões de interesses (objeto) tem dimensões grandes, sendo oneroso do ponto de vista computacional a sua exclusão. Desta forma é possível elaborar um domínio genérico para tais simulações conforme a Figura 6.4.

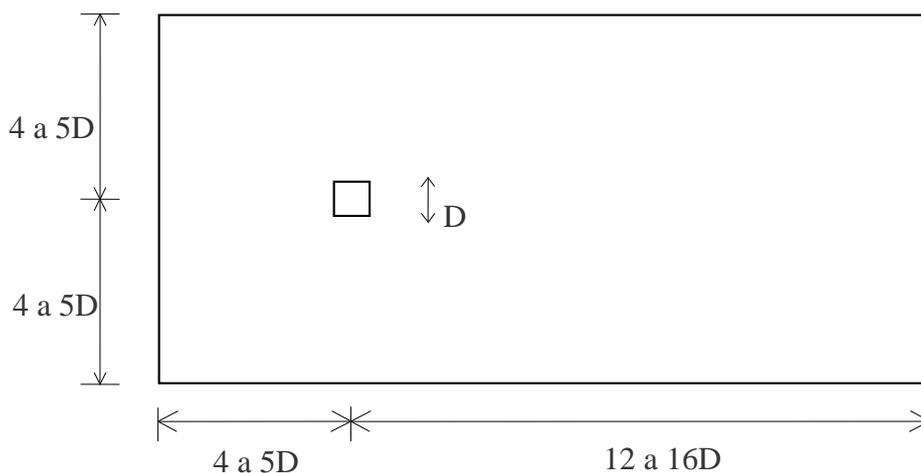


Figura 6.4 – Dimensões genéricas para um domínio bidimensional qualquer.

Para garantir as características do escoamento bidimensional, a espessura foi minorada, mantendo uma pequena dimensão, desta forma não participando dos efeitos. Todas as estruturas modeladas tem a espessura (e), dada conforme Saito e Morooka (2010): $e = D/20$.

Devido a simplicidade da geometria, o domínio para a seção quadrada foi desenhado no próprio software Ansys em sua interface "Design Model" a partir da imagem da Figura 6.5.

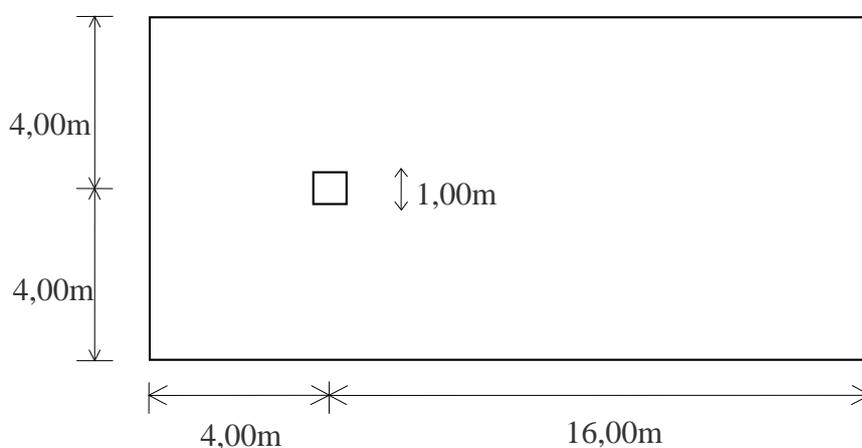


Figura 6.5 – Dimensões do domínio para a seção quadrada.

Para a redução do custo computacional, foram delimitadas subdivisões conforme ilustra Najafi et al (2012), o objetivo desta ação foi permitir uma redução do tamanho dos elementos nas regiões que influenciam na solução, minimizando maiores detalhes do escoamento em regiões onde o movimento tem pouca influência na resposta.

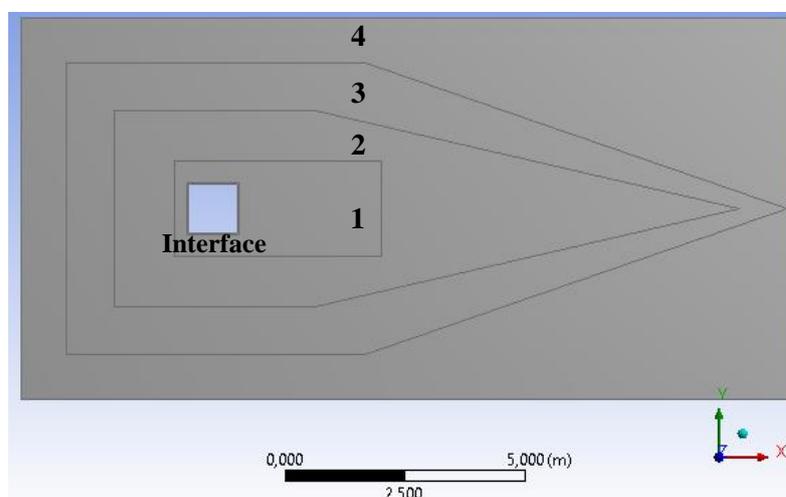


Figura 6.6 – Domínio e subdomínios para a seção quadrada.

Foi preciso um maior refino na região de esteira, que guarda informações de vórtices, variação de pressão e velocidade. Foram criados sempre três regiões menores ao domínio e espaçados uniformemente para geração de diferentes densidades de malhas. Duas das regiões mais externas foram prolongadas à extremidade do domínio computacional, contemplando toda a região de esteira. Desta forma podemos visualizar na Figura 6.6 o domínio e subdomínios da Figura em questão (Seção quadrada).

6.2.1.2 Malha Computacional - Seção Quadrada - Escoamento Bidimensional

Foram utilizados volumes tetraédricos mudando a malha para verificação da convergência. O domínio foi dividido para melhor refinamento da malha na região de esteira, ficando a região de interesse com menores tamanhos dos volumes de controle, conforme já visto na Figura 6.6. Regiões de interfaces foram criadas para melhor transição dos efeitos. Foram utilizados os subdomínios conforme prescrições de Najafi et al (2012), de acordo com a Figura 6.7.

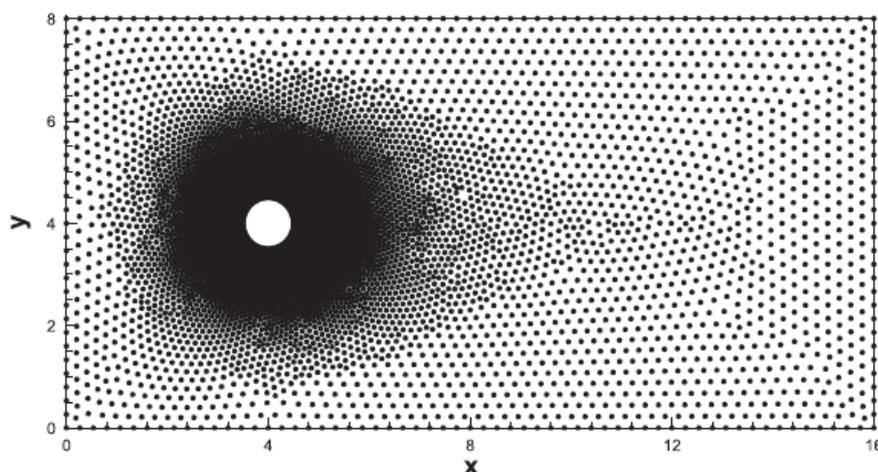


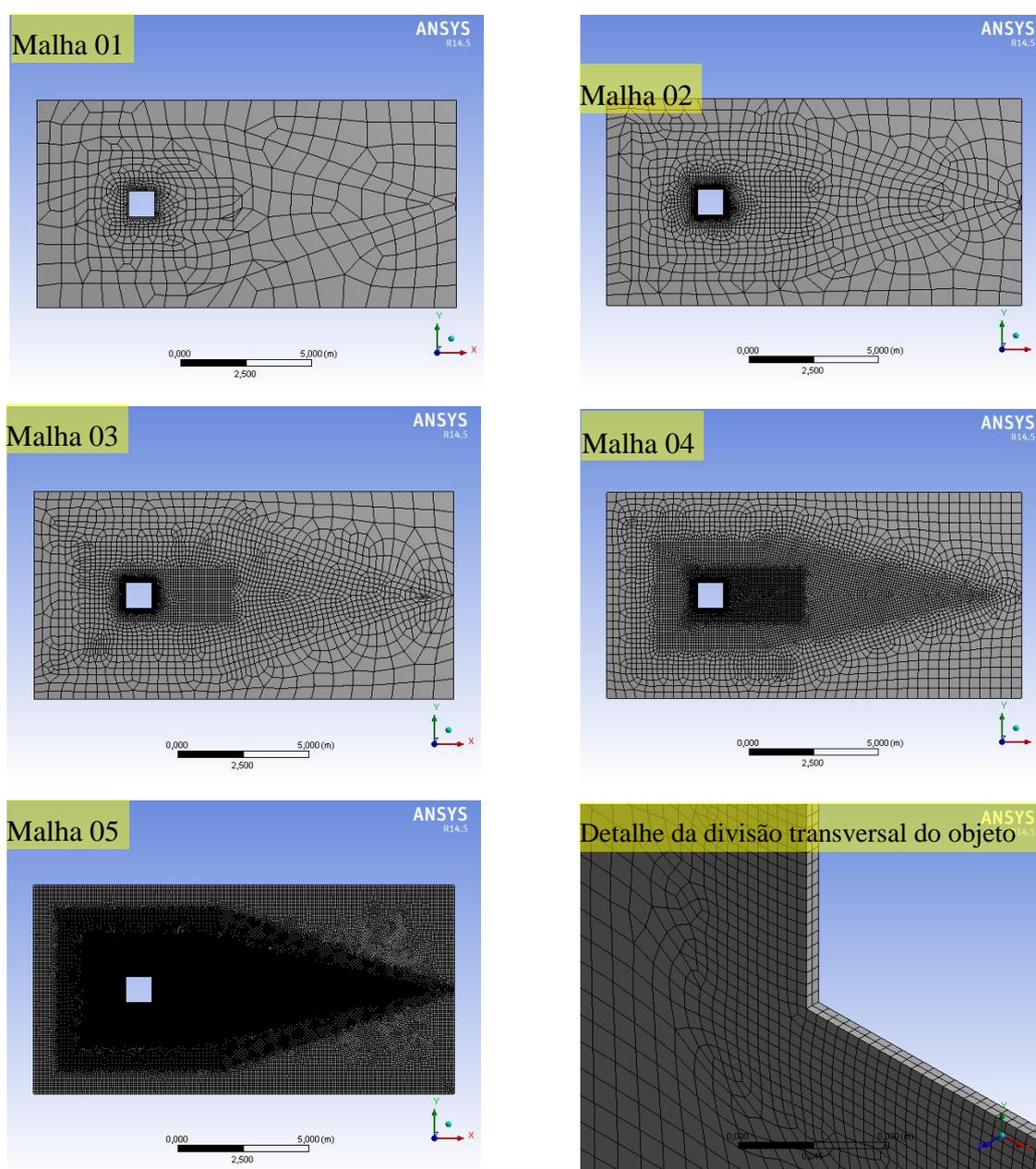
Figura 6.7 – Detalhe da malha.
Fonte: Najafi et al (2012)

Sabendo que o subdomínio 1 é o que envolve a seção (Objeto) e o subdomínio 4 é o último (Domínio total) que abrange a entrada e saída do escoamento, conforme já visto na Figura 6.6. Os subdomínios foram discretizados sempre em malhas com um elemento tendo a metade do tamanho do elemento anterior conforme a Tabela 6.1, cujo tamanho dos elementos é dado em metros. O software utilizado, Ansys CFX, não realiza simulações bidimensionais, desta forma elabora-se um domínio tridimensional, de forma que uma das dimensões seja bastante inferior as demais. Para o refino de malhas na direção de menor dimensão (espessura do domínio) foram divididos em dois volumes de controle para garantir pelo menos três nós adjacentes ou pelo menos um nó que não está no contorno, conforme verificado na Figura 6.8. Para esta função foi utilizado o comando *Sweep* do Software. Testes consecutivos com maiores subdivisões (*Sweep*) foram realizados, utilizando 3, 4, 5, 6 e 10 camadas de volumes de controle, entretanto valores muito próximos (erro de 10^{-5}) foram encontrados conforme espessura, aumentando apenas o custo computacional, desta forma optou-se por apenas duas subdivisões. Para o teste de convergência foram utilizadas malhas refinadas e verificada a tendência para o arrasto a partir da independência de malha.

Tabela 6.1– Refinamento da malha nos subdomínios - Tamanho dos elementos em metros (m).

Subdomínio	Malha 01	Malha 02	Malha 03	Malha 04	Malha 05	Malha 06
1	1,0	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
2	2,0	0,4	0,2	0,1	0,04	0,02
3	4,0	0,8	0,4	0,2	0,08	0,04
4	8,0	1,6	0,8	0,4	0,16	0,08
Interface	0,1	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
Quantidade de Nós						
Quadrado	2.094	9.957	23.664	47.727	168.651	568.744

É possível visualizar as malhas 01 a 05 e Sweep para tal seção a partir da Figura 6.8. A malha 06 não foi representada nesta figura devido ao grande número de elementos.

**Figura 6.8 – Detalhes das malhas- Seção quadrada.**

6.2.1.3 Qualidade de malha

Para a análise de qualidade de malha foi utilizado apenas o próprio software Ansys, na interface geradora de malha (*Mesh*), conforme citado no capítulo 5. Inicialmente foi objetivado elementos com razão de aspecto (*Aspect Ratio*) próximo a 1. Foi objetivado o menor número de elementos deformados, ou seja com baixo *Skewness*. Sabendo que não se consegue uma isenção de tais elementos, foi permitido a presença destes em regiões de menor influência. Foi objetivado a ortogonalidade mais próxima de 1, ou seja elementos com faces ortogonais entre si. A qualidade da malha foi verificada graficamente para todos os refinamentos em questão, entretanto só foi descrito neste trabalho, para a malha intermediária (Malha 03). Nas Figura 6.9 e Figura 6.10 é possível visualizar os elementos com menores e maiores deformações respectivamente. Ou seja, Figura 6.9, foram omitidos todos os demais elementos, exibindo apenas os que sofreram as menores deformações após o refinamento, já na Figura 6.10, foram omitidos todos os elementos e exibido apenas os que sofreram as maiores deformações.

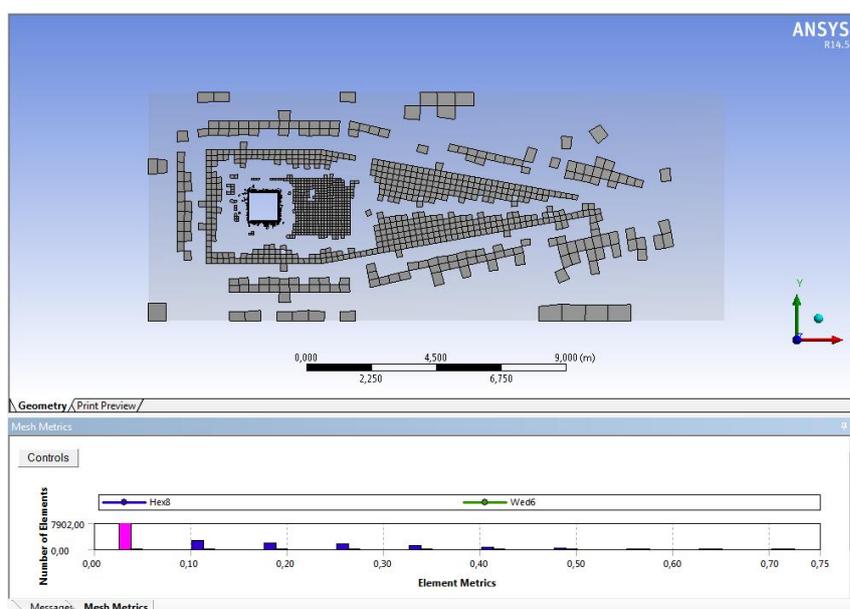


Figura 6.9 – Elementos com menores deformações (em geral nas regiões de interesses)- Seção quadrada.

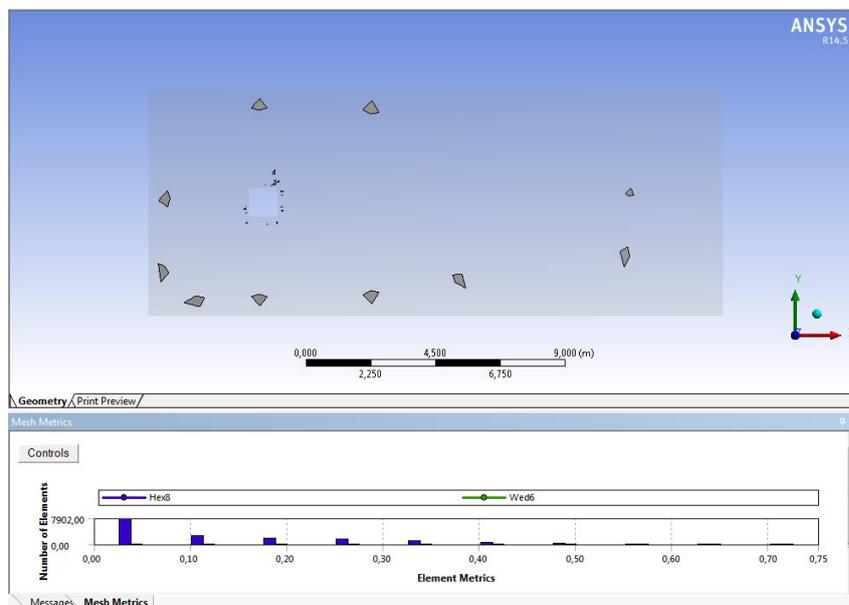


Figura 6.10 – Elementos com maiores deformações (afastados das regiões de interesses)- Seção quadrada.

Foi encontrada a deformação mínima de $1,52 \times 10^{-6}$ e a máxima de 0,75. Para a análise completa foi elaborada a tabela 6.2 com a quantidade de elementos acima da deformação média indicada na tabela.

Tabela 6.2– Skewness da malha 03- Seção quadrada

Nº de Elementos	7.900	2.620	1.860	1.480	1.080	574	312	78	6
Deformação	0,0376	0,113	0,118	0,263	0,339	0,414	0,489	0,564	0,715

De maneira semelhante, as Figura 6.11 e Figura 6.12 ilustram a situação de maior e menor ortogonalidade respectivamente.

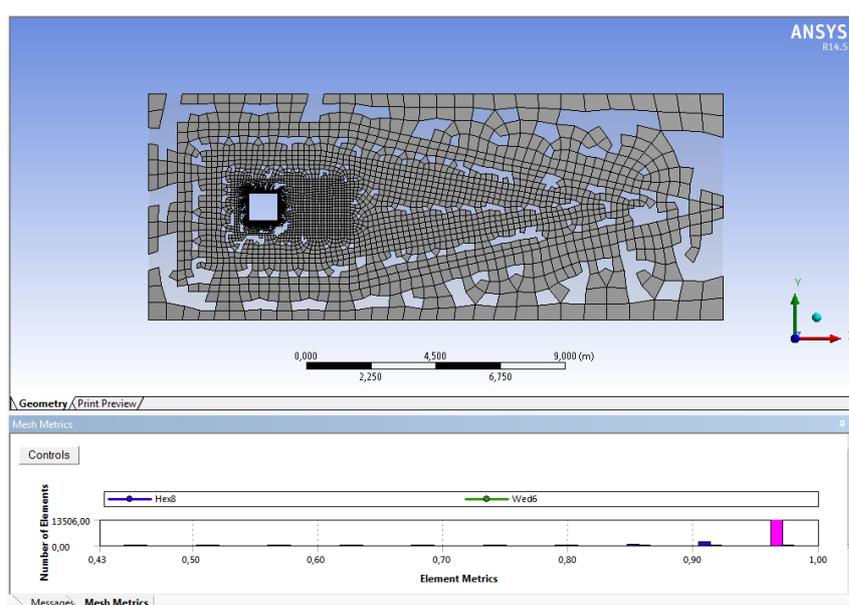


Figura 6.11 – Elementos com maiores ortogonalidades (Na Regiões de interesses)- Seção quadrada.

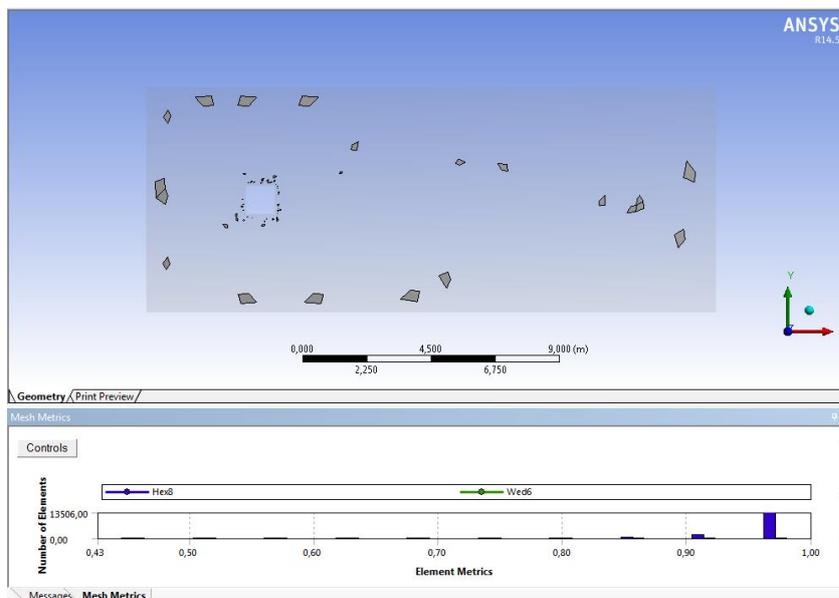


Figura 6.12 – Elementos com menores ortogonalidades (Fora da Regiões de interesses)- Seção quadrada.

O máximo valor encontrado foi aproximadamente 1, já o menor valor para tal malha foi 0,52. Assim como a tabela 6.2, foi analisada a ortogonalidade da malha através da 6.3.

Tabela 6.3– *Orthogonal Quality* da malha 03- Seção quadrada.

Nº de Elementos	13.500	1.610	524	178	84	32	6	2	0
Ortogonalidade	0,971	0,914	0,856	0,799	0,742	0,682	0,627	0,569	0,512

6.2.1.4 Setup - Seção quadrada - escoamento bidimensional

Nesta etapa foram inseridas as características físicas do escoamento. Conforme já mencionado no item 5.2.3.

- Foi criado um novo material para inserir as características do vento idealizado:
 - Massa específica = 1,0kg/m³;
 - Viscosidade = 1,0 m²/s²;
 - Pressão atmosférica = 1 atm;
 - Foram desprezados os efeitos térmicos.
- As características físicas foram adotadas conforme já mencionadas no capítulo 5, resultando o domínio conforme a Figura 6.13.
 - Entrada: Seleccionada a face de entrada, e considerada a velocidade como 10⁴ m/s, para desta forma obter um Re =10⁴.
 - Saída: Nesta etapa adota-se uma pressão absoluta de 0 Pa, ou seja esta é a diferença entre a pressão que entra e pressão que sai.

- Paredes: É considerado nos contornos superior, inferior e laterais do domínio a condição de *Free Slip Wall*, ou seja livre para escoar. Nas paredes do objeto em estudo (seção quadrada) é considerada a condição de *No Slip Wall*.

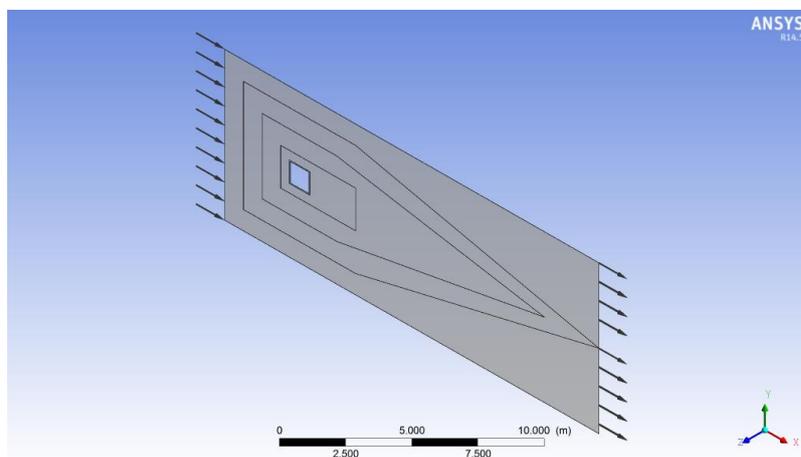


Figura 6.13 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Seção quadrada.

- Modelo de turbulência: Como não se sabia o modelo ideal para tal escoamento, inicialmente foi realizado um teste de convergência, utilizando uma malha intermediária (03). Foram testados vários modelos conforme citado na Subseção 3.3 e disponíveis no software, verificando qual valor do arrasto mais se aproximava do valor disponível na literatura. Desta forma pode-se verificar através da gráfico da Figura 6.14 que o modelo cujo resultado mais se aproximava do valor teórico foi o $k-\epsilon$. Segundo Alencar (2009) apud Arantes (2007), em simulação de escoamento em torno de corpos rombudos, o modelo de turbulência mais indicado é o $k-\epsilon$ (K-Epsilon), o autor ressalta que o mesmo é indicado para escoamentos completamente turbulentos com alta escala de turbulência, não sendo indicado para baixos regimes de escoamentos e em geometrias complexas. Nos casos bidimensionais analisados nesta dissertação a geometria era de grande simplicidade e o escoamento era bastante turbulento, com número de Reynolds variando de 10^4 a 2×10^6 conforme Eq. (2.18).

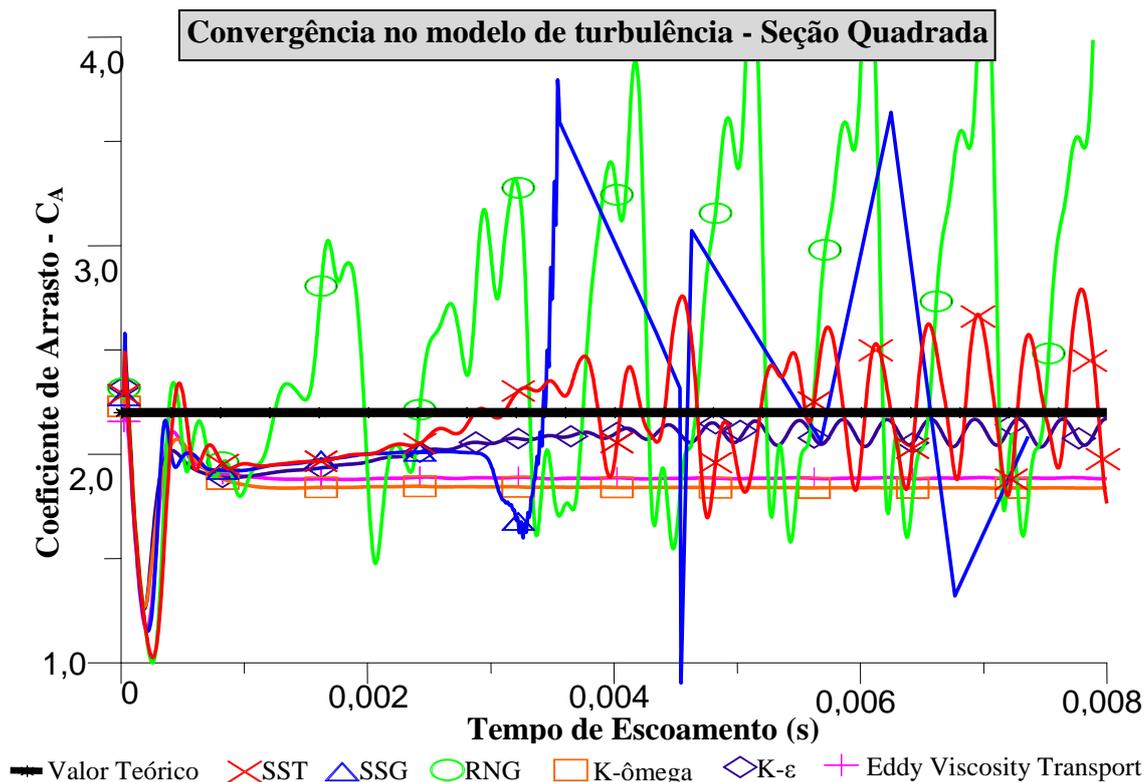


Figura 6.14 – Convergência no modelo de turbulência- Seção quadrada.

- Características temporais: Inicialmente foram realizadas simulações em regime estacionário. Entretanto percebeu-se a não convergência para a última iteração, conforme gráfico da Figura 6.15.

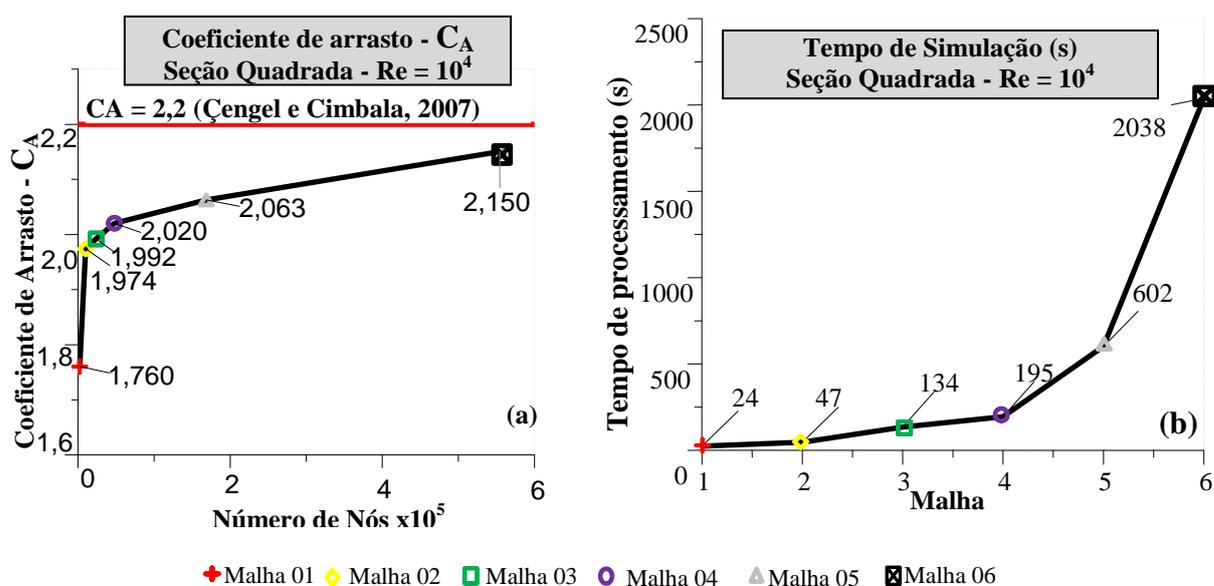


Figura 6.15 – a) Convergência de Malhas. b) Tempo de processamento- Seção quadrada- Estacionário.

Diante destes gráficos e da variação do comportamento do arrasto para pequenas mudanças de malha, foi constatado que o regime estacionário não representava bem o escoamen-

to. Verifica-se que o coeficiente de arrasto aumenta conforme aumenta o refinamento de malha, não garantindo a convergência do modelo. Foi analisado o RMS do momento e da turbulência para este regime e percebido que possuía um alto valor conforme a Figura 6.16, ao submeter a mesma seção com a mesma malha intermediária em um escoamento transiente verificou-se um menor resíduo conforme a Figura 6.17, onde o RMS cai de 10^{-4} para 10^{-7} , apontando que o transiente representa melhor este fenômeno. Segundo SYMSCAPE (2002) a escolha entre estacionário e transiente para escoamentos turbulentos não é uma decisão fácil, deve-se inicialmente realizar simulação em regime estacionário que possui baixo custo computacional, fornecendo resultados rápidos, e se for verificado a não convergência, ou seja aumento no resíduo, deverá partir para uma simulação em estado transiente. O arrastos e sustentação são características oscilatórias, ou seja suas variáveis detêm uma periodicidade.

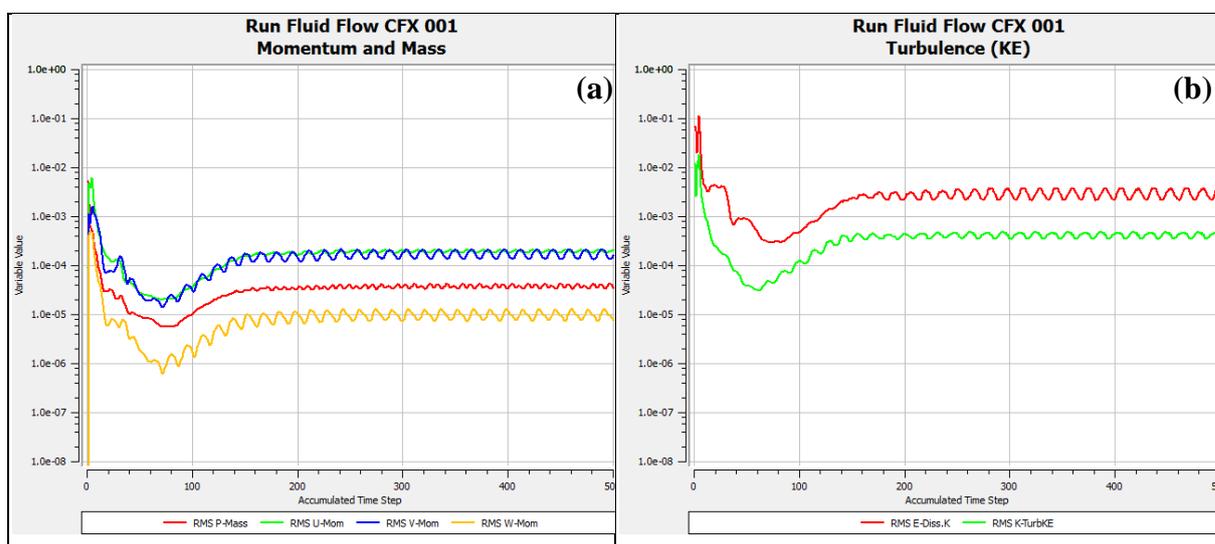


Figura 6.16 – RMS do Regime Estacionário- Seção Quadrada: a) Momento; b) Turbulência.

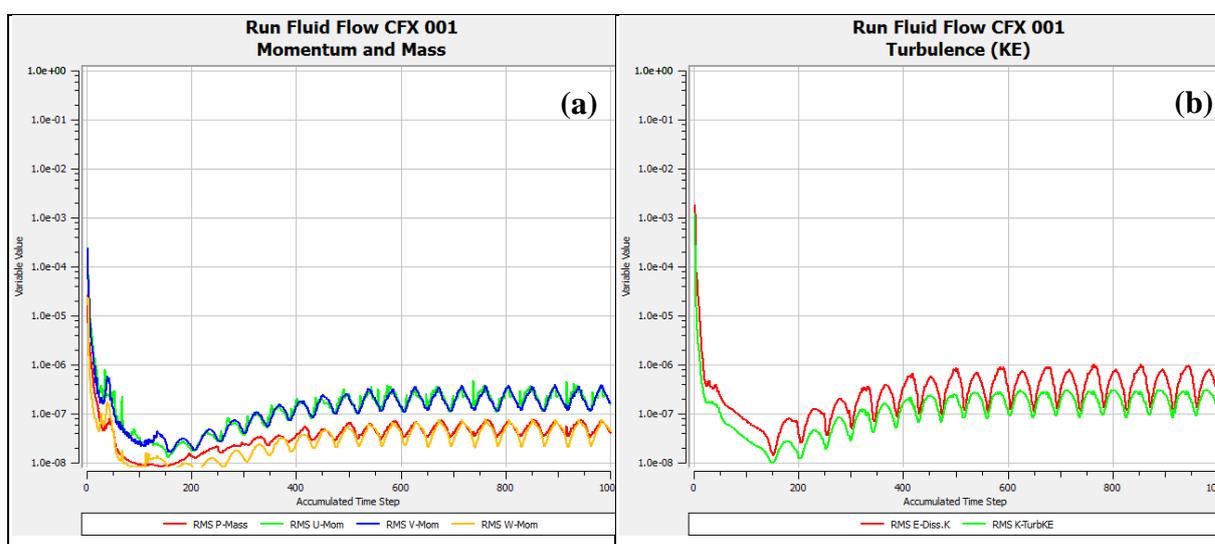


Figura 6.17 – RMS do Regime Transiente- Seção Quadrada: a) Momento; b) Turbulência.

Desta forma partiu-se para o estudo no estado transiente, adotando as características indicadas no capítulo 5. Considerando um tempo total de escoamento tal que o fluido escoe até a variável atingir estabilidade. Para a seção quadrada foi percebido que este valor é aproximadamente a partir de dez vezes o tempo necessário para o fluido atravessar o domínio. Ou seja, a partir da Eq. (2.6) da definição de velocidade, temos para as dimensões do domínio e velocidade adotada a Eq. (6.1).

$$u = \frac{dx}{dt} \rightarrow 10000 = \frac{20}{t} \quad (6.1)$$

$$t = 0,002 \rightarrow t_{escoamento} = 10 \times t = 0,02s$$

De maneira sucinta pode-se relatar que foram variadas as malhas, conforme a tabela 6.1, em seguida foi avaliado o passo de tempo, entretanto não se sabia qual o valor do Número de Courant ideal para tal simulação, desta forma verificou-se a convergência deste valor, ou seja, qual o maior passo de tempo que fornecia resultados confiáveis, custando pouco tempo computacional. Foi elaborada a tabela 6.4 para teste de diferentes números de Courant, variando apenas o mesmo para a malha intermediária. Desta forma foi plotado o gráfico da Figura 6.18. Este permite analisar que para o Courant menor que 20, tem-se aproximadamente curva sobre curva, ou seja, independente do passo de tempo temos os mesmos resultados, com isto se estabeleceu que o Courant para esta simulação deve estar entre 10 e 20.

Tabela 6.4– Convergência do número de Courant- Seção quadrada

Passo de Tempo (s)	1×10^{-4}	5×10^{-5}	2×10^{-5}	1×10^{-5}	5×10^{-6}	$2,5 \times 10^{-6}$	2×10^{-6}	1×10^{-6}
Courant	180	110	43	26	13	7	5	2

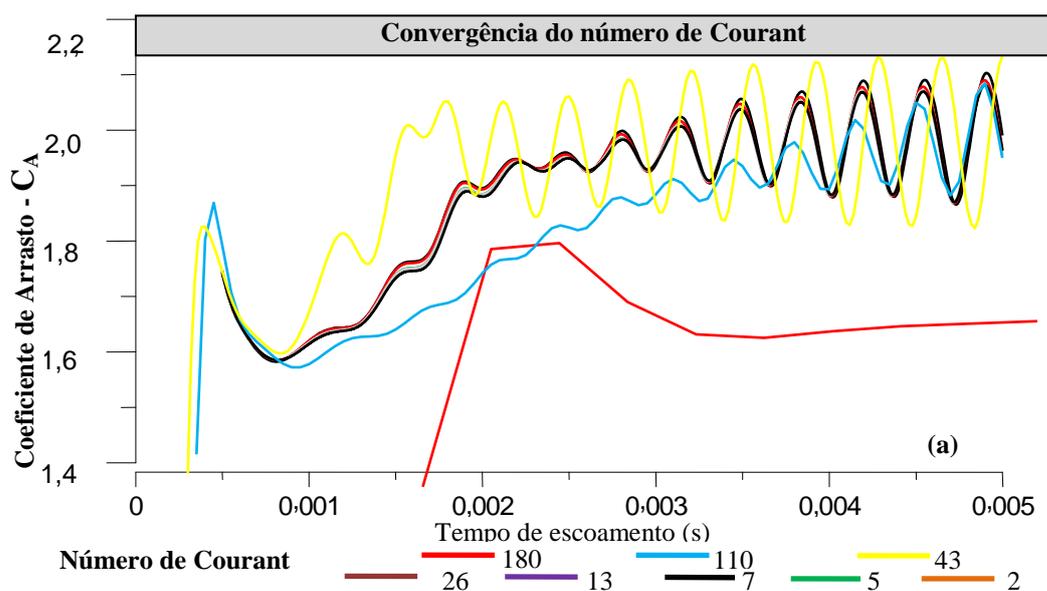


Figura 6.18 – Convergência do número de Courant- Seção quadrada.

O software também possui uma quantidade de iterações para cada passo de tempo. O default do programa é 10, entretanto foi realizado um teste para analisar a influência deste, conforme os gráficos da Figura 6.19.

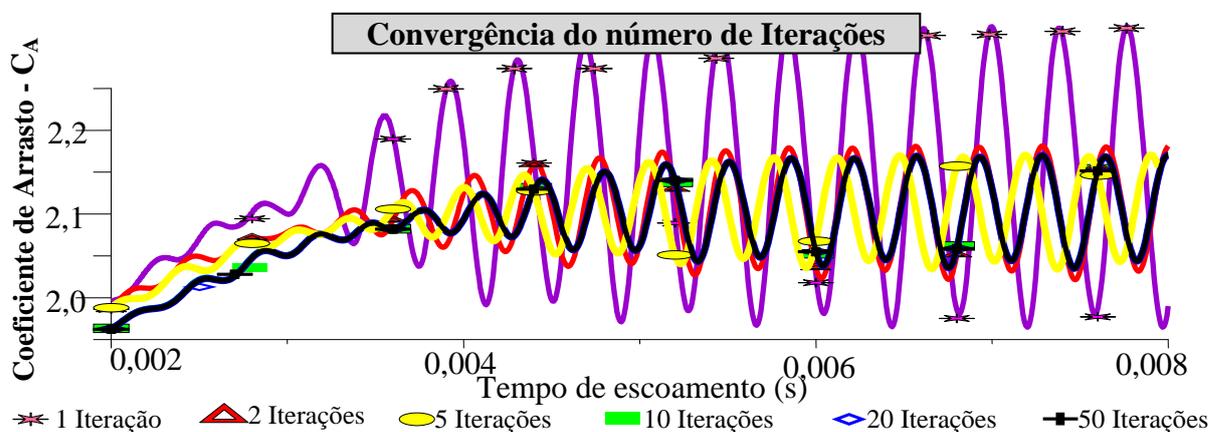


Figura 6.19 – Convergência no número de iterações- Seção quadrada.

Percebe-se então que o número de iterações pode ser reduzido para 5 sem perdas na precisão, reduzindo quase pela metade o tempo de processamento, entretanto para mitigar os erros foi adotado o default do Ansys (10 iterações) pois verificou-se que para 10, 20 e 50 iterações tinha-se curva sobre curva, provando a independência no número de iterações.

- Expressões: Foram inseridas no Ansys expressões para cálculo do arrasto, explicitando este valor direto na tela. A partir da equação 2.133, sabendo que A é a área frontal, dada pela altura multiplicada pela espessura da geometria, teremos a equação 6.2:

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1 \times 10000^2 \times 1 \times 0,05}$$

$$C_A = 4 \times 10^{-7} \times F_D \quad (6.2)$$

- Control Solver: Na literatura há diversos critérios de convergência, tais como as instruções propostas por Cóstola (2006) apud Cost (2004) e Ansys (2014) para o estado estacionário:
 - Número de iterações igual a 100 e Resíduo (RMS) inferior a 10^{-4} .

O resíduo (RMS) é a diferença de uma grandeza, neste caso a velocidade do fluido em uma iteração e a velocidade na iteração seguinte. Entretanto foi realizado um teste de convergência no tempo de escoamento e número de iterações onde para a malha intermediária, foi verificado a partir de que ponto a curva demonstrava seu comporta-

mento cíclico (oscilatório). Para evitar a parada por resíduo foi adotado um resíduo pequeno, considerando o valor de 10^{-10} objetivando que a simulação não pare pelo resíduo e sim seguindo o critério:

- Para uma determinada iteração no regime estacionário;
- Para um determinado tempo de escoamento no regime transiente.
- Output Control: Foram impressos apenas os resultados da variável em questão, o arrasto, para os seguintes casos:
 - A cada iteração no regime estacionário;
 - Para cada passo de tempo no regime transiente.

6.2.1.5 Resultados - Seção quadrada - Escoamento bidimensional

A partir das informações relatadas até o momento foi possível realizar as simulações em estado transiente para a seção quadrada, obtendo valores para o arrasto conforme ilustrado nos gráficos da Figura 6.20. Não foi possível simular a malha 6, devido ao alto custo computacional e também devido à já ser perceptível a convergência da malha. Com base no valor disponível na literatura, $C_A=2,20$ de acordo com Çengel e Cimbala (2007) foi possível plotar graficamente o erro da simulação, em relação ao C_A teórico, conforme a Figura 6.21.

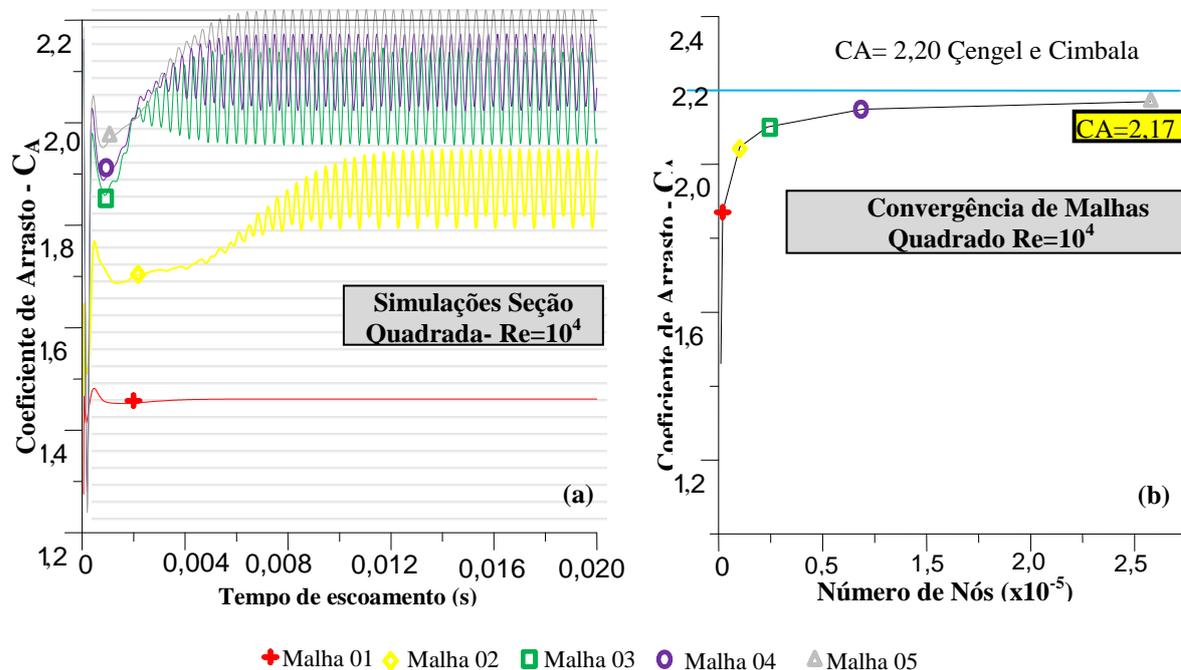
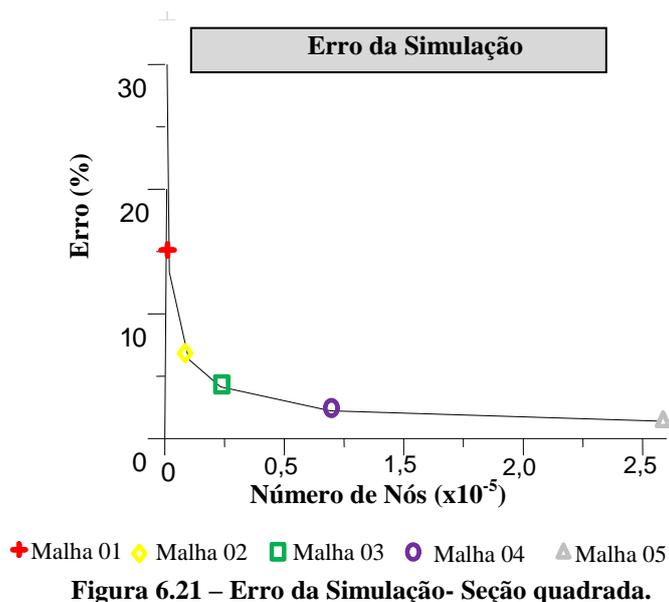


Figura 6.20 – Convergência de Malha - Seção quadrada- a) Arrasto instantâneo. b) Arrasto médio.



6.2.2 Seção retangular- Aqueduto do São Francisco com vento idealizado- Modelo 02

A geometria do problema é definida por uma seção U com abertura na face superior, conforme indicado na Figura 6.22 (Sarmiento, Souza Junior e Ribeiro, 2014). Para efeito de cálculo a seção transversal é tomada como um retângulo com dimensões de 655 x 440cm tendo variações sobre os apoios e abertura superior, desprezadas neste artigo. A seção transversal será considerada como um retângulo hermético, mesmo sabendo que no caso real há uma região de vazio sobre a lâmina d'água para a borda superior, e também que a rugosidade da água é diferente do concreto, sendo desprezada também a evaporação do fluido pelo arrasto do ar. Sabe-se ainda que a colisão do fluido, quando em baixa velocidade, nas paredes internas poderá aumentar o arrasto, entretanto foi desprezado este efeito. Conforme analisado o aqueduto permite o escoamento do fluido pela parte inferior e superior do tabuleiro conforme visto na Figura 6.22.

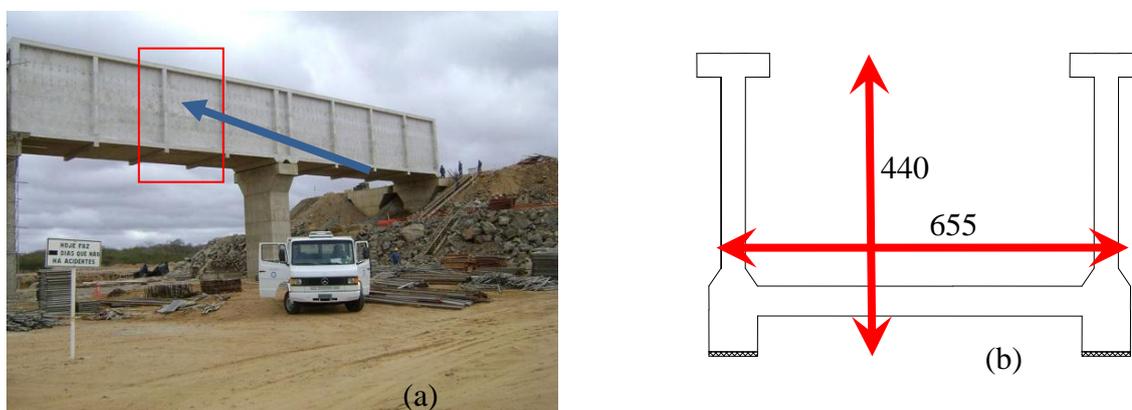


Figura 6.22 –Aqueduto São Francisco. a) Trecho da Obra, b) Seção Transversal (unidades em centímetro)
Fonte: SARMENTO et al (2014)

6.2.2.1 Coeficiente de arrasto disponível na literatura- Aqueduto

Com base nas dimensões do aqueduto, de acordo com a Figura 6.22, é possível indicar que para esta obra especial a relação: L/D esperada é de 1,489, que pode ser aproximado para 1,5 por ser apenas estimativo. De acordo com a Figura 6.2, é possível fazer a interpolação linear:

Tabela 6.5- Interpolação linear do arrasto a partir de uma tabela 11.1 em Çengel e Cimbala (2007)

L/D	1,0	1,5	2,0
Coeficiente de arrasto	2,2	1,95	1,7

Desta forma o coeficiente de arrasto esperado para o aqueduto, segundo uma interpolação linear da tabela disponível em Çengel e Cimbala (2007) para seções retangulares com relação entre a largura e altura de 1,5 é: $C_A=1,95$.

6.2.2.2 Coeficiente de arrasto Disponível na norma vigente- Aqueduto

A NBR 6123/1988 (Forças devidas ao vento em edificações) indica em seu item 6.3.4 que a relação entre a largura (h) e altura (l_1) dos corpos pode ser tomada como infinita quando o corpo está confinado em ambos os extremos por superfícies suficientemente extensas. Desta forma para estruturas não assentes no terreno, a uma distância maior que sua altura com vento incidente perpendicular ao plano desta página (Figura 6.24). Este item indica coeficientes de arrasto apropriados (seção transversal da estrutura no Quadro 6.1).

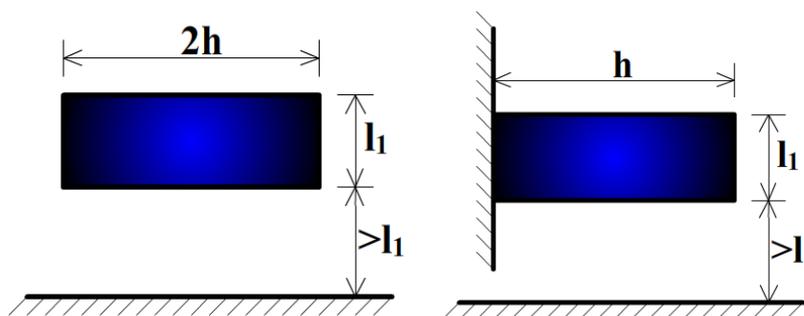
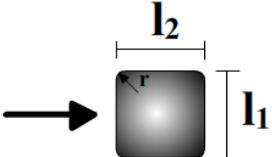
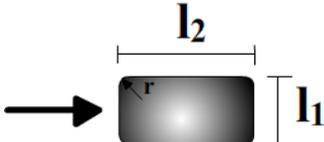


Figura 6.23 - Seção submetida a vento perpendicular ao plano da Figura (NBR 6123/1988).

Fonte: Adaptado da NBR 6123/1988

Percebe-se na Figura 6.24 que as recomendações de norma exigem estruturas afastadas do solo a uma distância mínima l_1 .

Conforme o Quadro 6.1, na Tabela 10 da NBR 6123/1988 não existe referência a seções retangulares onde a relação entre base e altura é igual a 1,5, ou seja: $l_1/l_2=2/3$. Com isto se verifica que a atual norma de ação do vento não possui valores para o C_A de tal estrutura.

Planta	Re	$h/l_1 = \infty$
 $l_1/l_2 = 1$ $r/l_1 = 1/6$	$\leq 7 \times 10^5$	1,3
	$\geq 8 \times 10^5$	0,6
 $l_1/l_2 = 1/2$ $r/l_1 = 1/6$	Todos os Valores	0,7

Quadro 6.1 - Coeficiente de arrasto em estruturas de seção quadrada submetida ao escoamento do vento

Fonte: Adaptado da NBR 6123/1988

6.2.2.3 Domínio Computacional- Aqueduto - Escoamento bidimensional

Foram seguidas as mesmas prescrições conforme o item 6.2.1.1. De maneira geral o comprimento do domínio é entre 16D e 20D, sendo D a dimensão (ou diâmetro) característica. Considerando desta vez a D igual a 4,40m conforme a Figura 6.24.

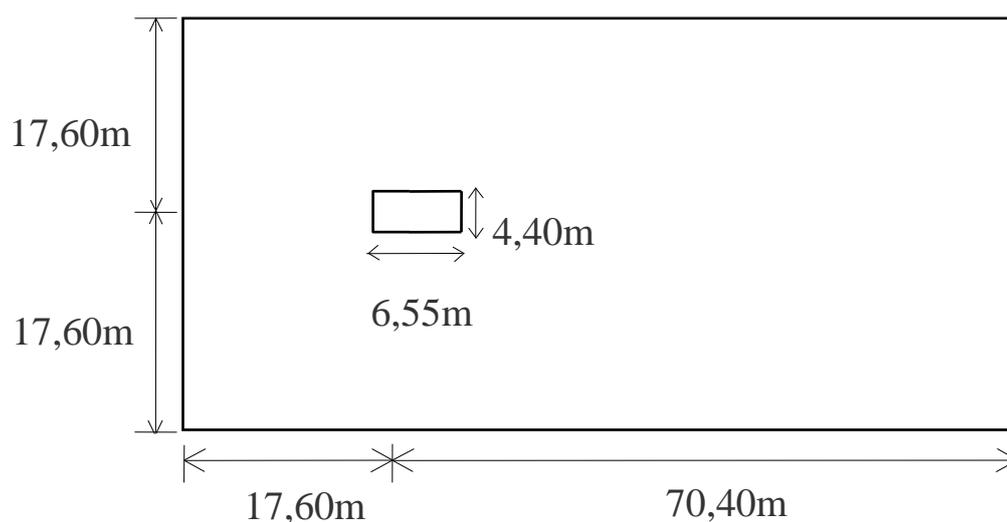


Figura 6.24 – Dimensões do domínio para o aqueduto.

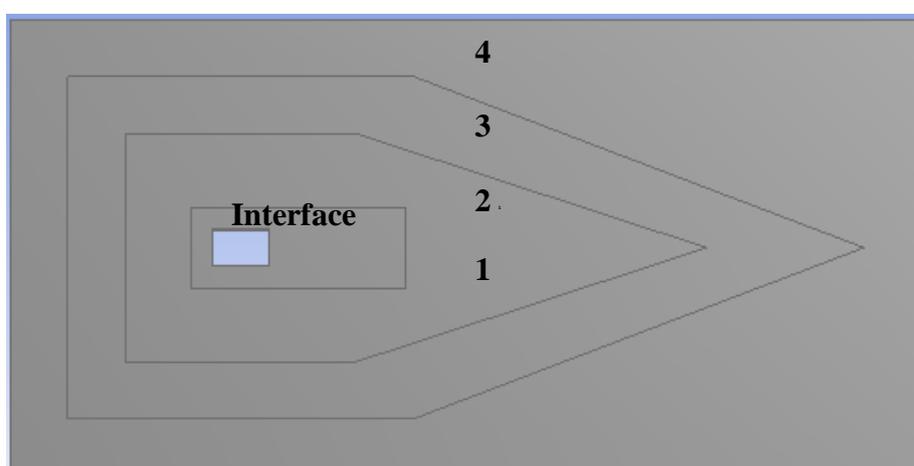


Figura 6.25 – Domínio e subdomínios para o aqueduto.

Para a espessura deste subdomínio (dimensão normal ao plano da figura) foram seguidas as razão indicada no item 6.2.1 (1/20D). Ou seja, a geometria ficou com uma espessura de 0,22, para fins práticos, aproximou-se para 0,2. Com isto, o domínio para a seção do aqueduto foi desenhado no próprio software Ansys em sua interface "Design Model" a partir da imagem da Figura 6.6. Também foram reduzidos os subdomínios para a geração de malha.

6.2.2.4 Malha Computacional - Aqueduto Idealizado- Escoamento Bidimensional

Foram seguidos os mesmos procedimentos adotados na seção quadrada. Numerando os domínios de maneira semelhante ao item 6.2.1.1. Sabendo que o subdomínio 1 é o que envolve a seção (Objeto) e o subdomínio 4 é o último (Domínio total) que abrange a entrada e saída do escoamento, foram numerados então conforme a Figura 6.25.

Foi montada a tabela 6.6 com tamanho dos elementos para a seção do aqueduto.

Tabela 6.6– Refinamento da malha nos subdomínios - Tamanho dos elementos em metros (m)

Subdomínio	Malha 01	Malha 02	Malha 03 (In-	Malha 04	Malha 05	Malha 06
1	4,4	0,88	0,44	0,22	0,088	0,044
2	8,8	1,76	0,88	0,44	0,176	0,088
3	17,6	3,52	1,76	0,88	0,352	0,176
4	35,2	7,04	3,52	1,76	0,704	0,352
Interface	0,44	0,088	0,044	0,022	0,0088	0,0044
Quantidade de Nós						
Aqueduto	3.042	10.551	20.665	47.727	178.043	303.045

Para o refino de malhas na direção de menor dimensão (espessura do domínio) também foram divididos em dois volumes de controle. É possível visualizar este detalhe e todas as malhas para tal seção a partir da Figura 6.26. De maneira semelhante à seção anterior, não foi representada a malha 06.

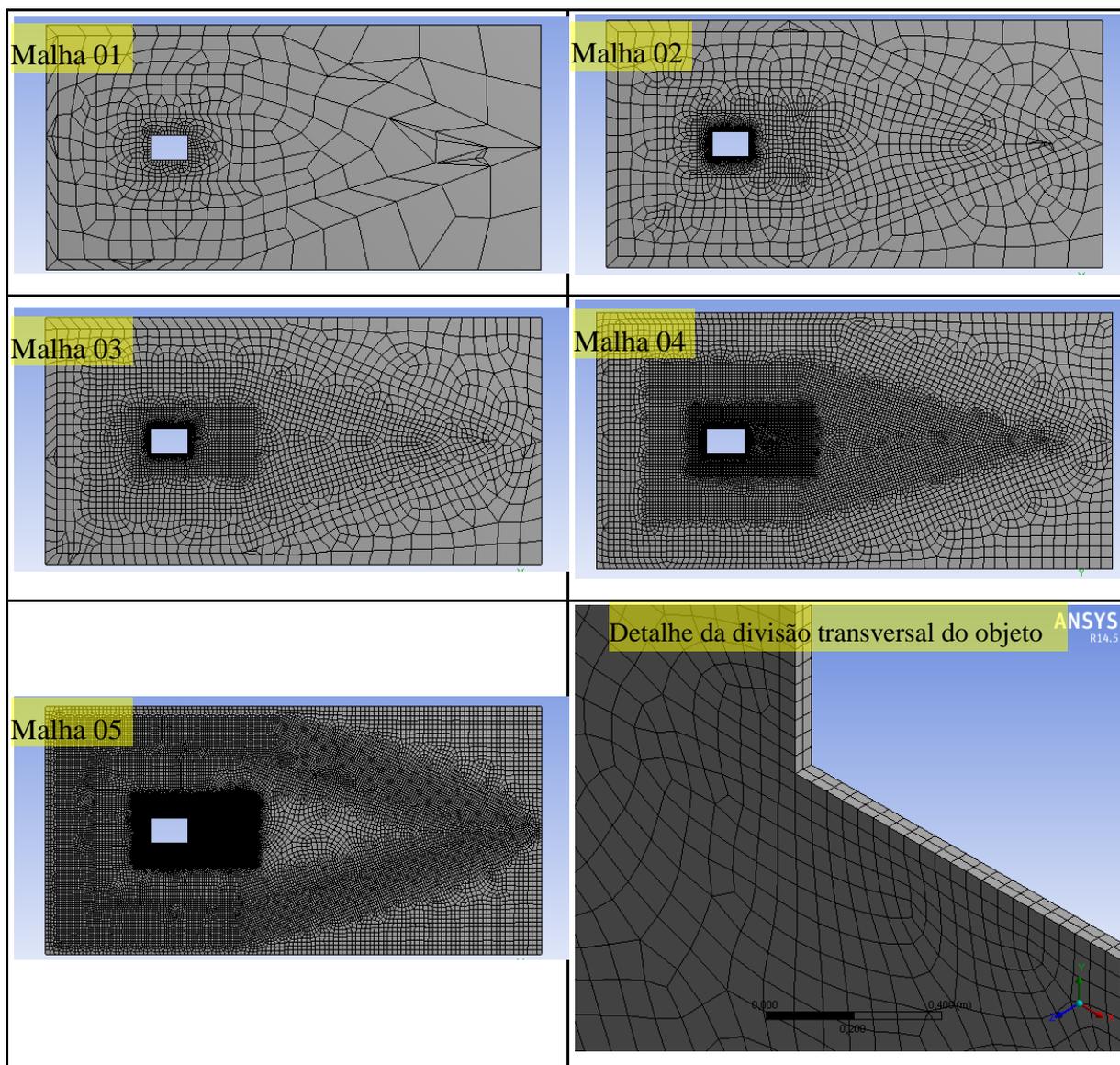


Figura 6.26 – Detalhes das malhas- Seção do Aqueduto.

6.2.2.5 Qualidade de malha

Conforme realizado no item 6.2.1.2, também foi analisada a qualidade da malha para o domínio computacional do aqueduto verificando quais os elementos com menores e maiores deformação conforme a Figura 6.27 e Figura 6.28 respectivamente.

Foi encontrada a deformação mínima de $1,31 \times 10^{-10}$ e a máxima de 0,87. Para a análise completa foi elaborada a Tabela 6.7 com a quantidade de elementos e sua deformação.

Tabela 6.7– Skewness da malha 03- Aqueduto.

Nº de elementos	4.650	3.440	2.400	1.530	902	630	68	12	2
Deformação	0,0437	0,131	0,219	0,306	0,394	0,481	0,569	0,656	0,743

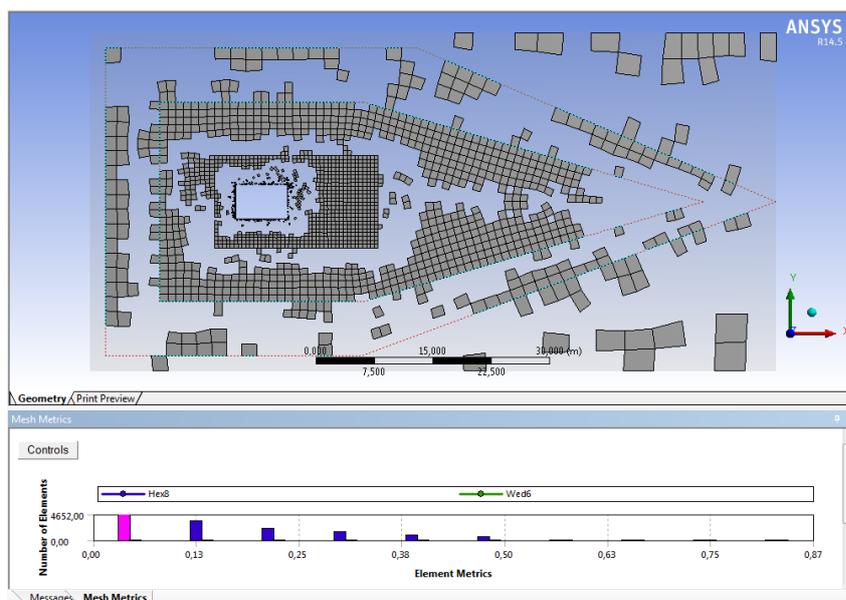


Figura 6.27 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)- Aqueduto

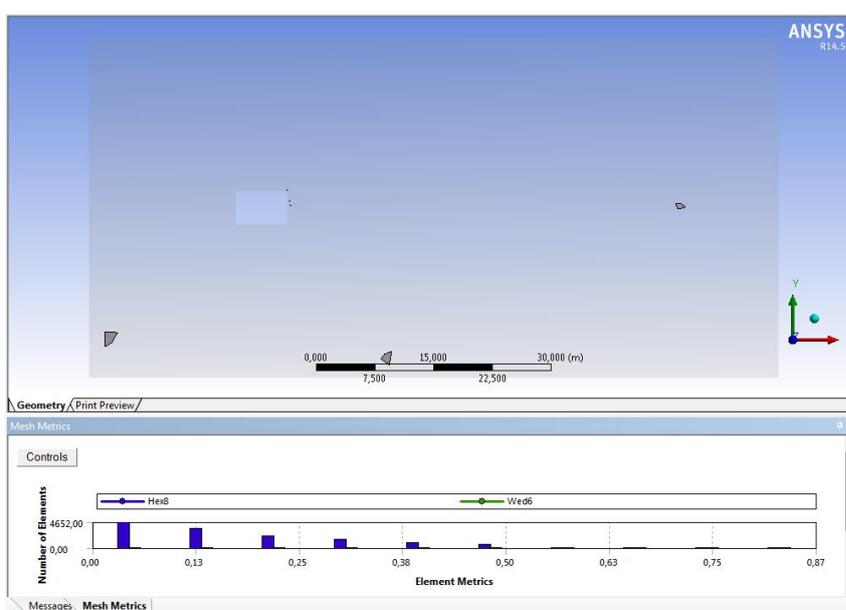


Figura 6.28 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Aqueduto.

Também foi analisada a ortogonalidade da malha, elaborando a Tabela 6.8. A Figura 6.29 e Figura 6.30 ilustram a situação de maior ortogonalidade e menor respectivamente. O máximo valor da ortogonalidade encontrado foi de 1, já o menor valor para tal malha foi 0,25.

Tabela 6.8– Orthogonal Quality da malha 03- Aqueduto

Nº de elementos	11.100	1.460	278	416	8	2	0
Ortogonalidade	0,962	0,887	0,811	0,736	0,661	0,585	0,510

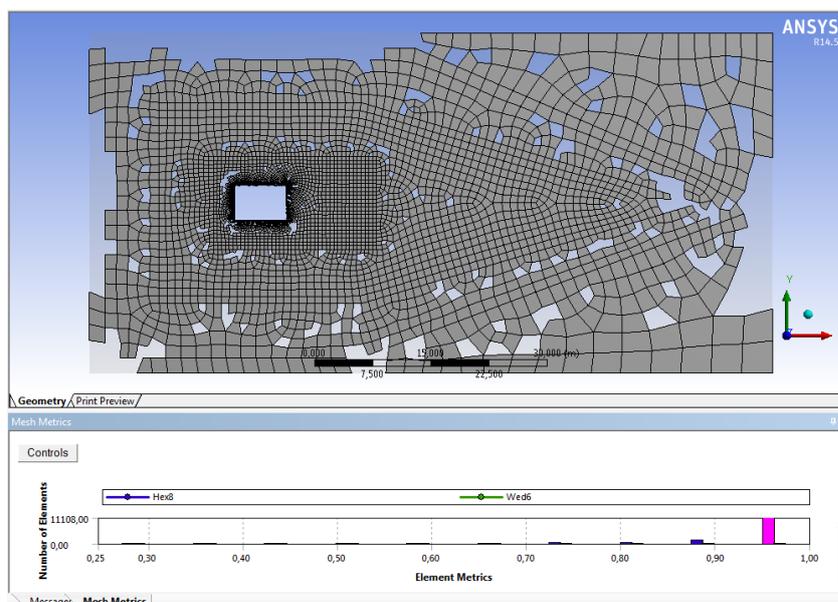


Figura 6.29 – Elementos com maiores ortogonalidades (Na Regiões de interesses)- Aqueduto.

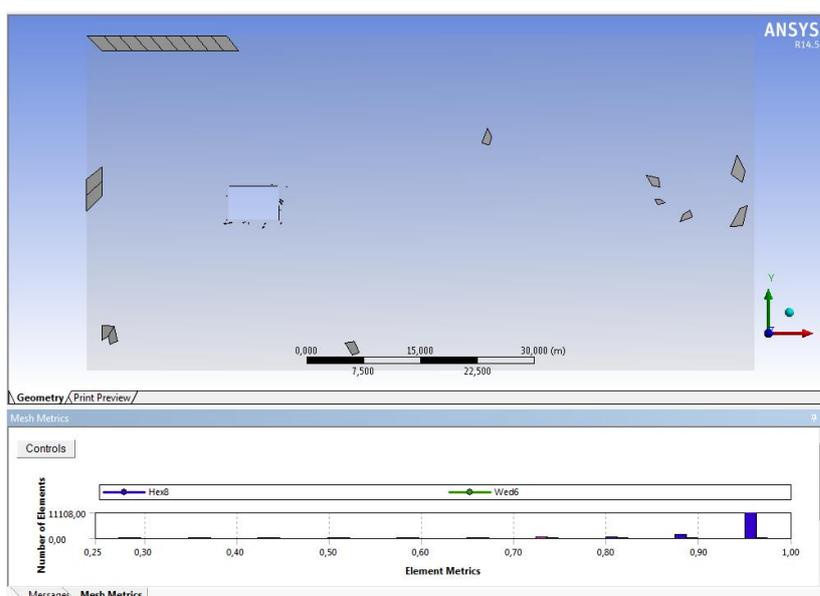


Figura 6.30 – Elementos com menores ortogonalidades (Fora da Regiões de interesses)- Aqueduto.

6.2.2.6 Setup - Aqueduto Idealizado- escoamento Bidimensional

De acordo com a Figura 1.2 foram utilizadas as mesmas características conforme a seção quadrada (Item 6.2.1.4), uma vez que só foram variadas as suas dimensões. Utilizado o mesmo material com características unitárias utilizado na seção quadrada, assim como o mesmo modelo de turbulência, velocidade de entrada, pressão e condições nas paredes do domínio e objeto. O tempo de escoamento para esta seção foi de 0,05s uma vez que o domínio computacional foi maior em relação à seção quadrada. Foram realizadas simulações em estado estacionário e transiente. Entretanto de maneira semelhante à seção quadrada foi verificada

uma instabilidade nos valores do arrasto no regime estacionário. Estes resultados e também o tempo de processamento encontram-se na Figura 6.31.

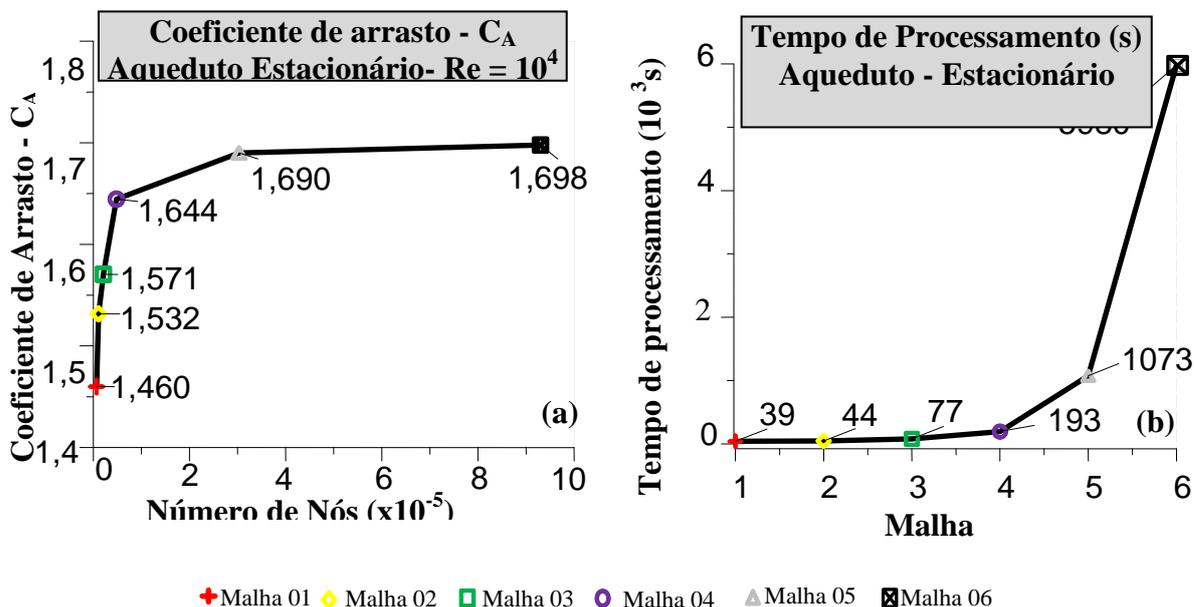


Figura 6.31 –Aqueduto com vento ideal- Estacionário: a) Convergência de Malhas b) tempo de processamento

- Expressões: Foram inseridas no Ansys expressões para cálculo do arrasto, explicitando este valor direto na tela. De acordo com a equação 2.127, sabendo que A é a área frontal, dado pela altura multiplicada pela espessura da geometria, têm-se a equação 6.3:

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1 \times 10000^2 \times 4,4 \times 0,2}$$

$$C_A = 2,27 \times 10^{-8} \times F_D \tag{6.3}$$

- Control Solver: Utilizado o mesmo critério de escoamento conforme item (6.2.1.3)
- Output Control: Impresso apenas os resultados da variável em questão, o arrasto.

6.2.2.7 Resultados - Aqueduto Idealizado- Escoamento Bidimensional

De posse das informações foram realizadas as simulações computacionais para o escoamento transiente e plotado o arrasto médio e tempo de simulação na Figura 6.32. Não foi realizado a análise do erro, pois para esta estrutura não se tinha valor disponível na literatura.

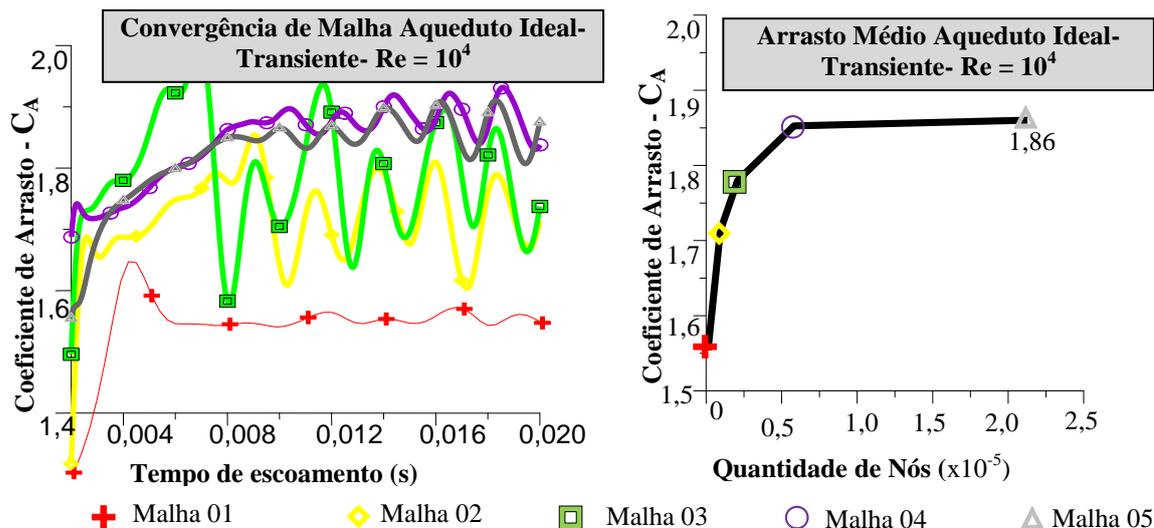


Figura 6.32 – Convergência de Malha - Aqueduto ideal- a) Arrasto instantâneo. b) Arrasto médio.

6.2.3 Seção retangular - Aqueduto do São Francisco com vento real - Modelo 03

Nesta etapa foi seguida a modelagem do Item 6.2.2, variando apenas as propriedades do ar, como velocidade, massa específica, viscosidade, entre outras.

Para a velocidade característica do ar foi tomado o valor conforme a NBR 6123/1988. Os fatores adotados de acordo com o Item 5 desta norma no projeto do aqueduto foram: S₁= 1,00; S₂= 1,04; S₃= 0,95; V₀= 30,0m/s (Velocidade básica na região)

Desta forma a velocidade característica conforme a Equação (4.2) retirada da NBR 6123 é dada de acordo com as Equações (6.4):

$$\begin{aligned}
 V_k &= V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \\
 V_k &= 30 \times 1,00 \times 1,04 \times 0,95 \\
 V_k &= 29,64 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{6.4}$$

Para se conhecer o coeficiente de arrasto na estrutura, inicialmente é necessário conhecer o número de Reynolds, conforme foi visto na Equação (2.18). É possível estimar este valor tomando para a viscosidade dinâmica valores do próprio software e também encontrados na literatura. Desta forma pode ser visto na Eq. (6.5).

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} = \frac{1,185 \times 29,64 \times 4,4}{1,831 \times 10^{-5}} = Re = 8,4 \times 10^6
 \tag{6.5}$$

Como o valor do arrasto proposto por Çengel e Cimbala (2007), conforme citado no item anterior foi de 1,95 para Reynolds maior que 10⁴, percebe-se que para esta estrutura poderá ser usado este valor como referência. A NBR6123 não dispõe de valor para tal estrutura conforme já mencionado no item 6.2.2.

6.2.3.1 Domínio Computacional - Aqueduto- vento real - Escoamento Bidimensional.

O domínio computacional foi o mesmo do item 6.2.2.3, uma vez que só foram alteradas as propriedades do meio.

6.2.3.2 Malha Computacional - Aqueduto com vento real- Escoamento Bidimensional

Foi utilizada a mesma malha computacional conforme o item 6.2.2.4, mantendo a mesma denominação, qualidade e refino de malha.

6.2.3.3 Setup - Aqueduto com vento real- Escoamento Bidimensional

Nesta etapa foi inserida a física do escoamento, conforme citado no item 5.2.3.

A NBR6118/1988 não indica os valores de referência quanto às características do material, entretanto destaca que o ar está a 15°C, desta forma todas as constantes deverão ser tomadas com base neste parâmetro. Sabendo que a massa específica não é suficientemente diferente para variar o coeficiente de arrasto (fato que poderia ser dominante caso mudasse o meio, para água ou óleo por exemplo), ficando este apenas dependente da forma e do número de Reynolds. Desta forma foi realizado um teste para confrontar o valor do arrasto para a massa específica indicada em norma (1,225kg/m³) e a usada no modelo de ar padrão do Ansys, que é o Ar a 25°C (1,185kg/m³). A verificação das curvas encontra-se na Figura 6.33.

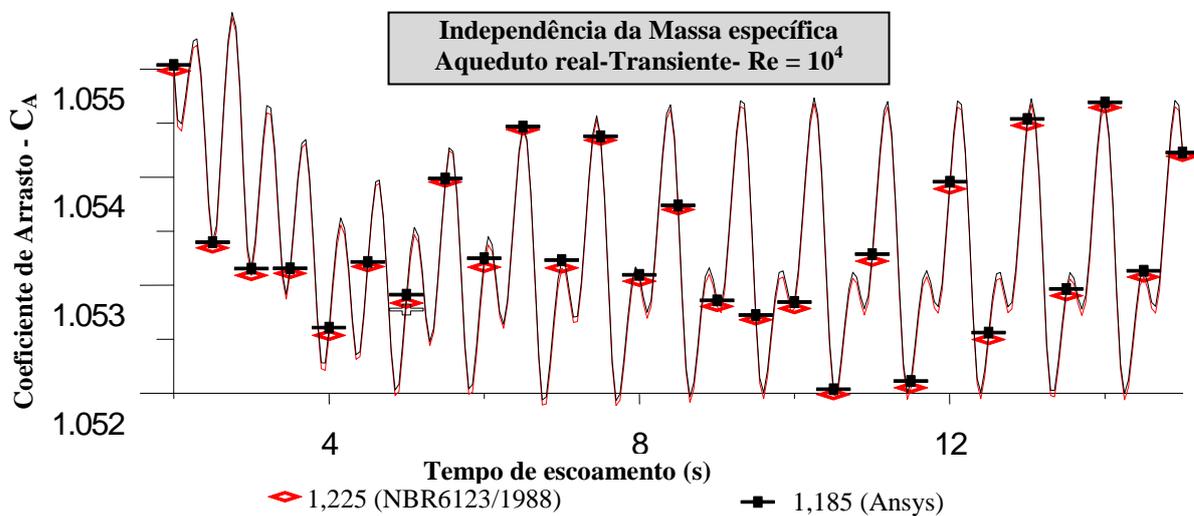


Figura 6.33 – Independência da Massa específica do modelo.

Percebe-se então que uma curva está praticamente sobre a outra, verificando desta forma uma independência da massa específica com um erro máximo de 0,0079%, que será desprezado aqui afim de se obter um material padrão para todas as simulações.

- Foi utilizada as propriedades do ar a 25°C do Ansys, que trata o fluido com suas características conforme valores existentes na literatura em Çengel e Cimbala (2007), White (2010), Kundun e Cohen (1990), Potter et al (2011), kundu et al (2011):
 - Massa específica = 1,185kg/m³;
 - Viscosidade dinâmica = 1,831 kg/m.s;
 - Pressão atmosférica = 1 atm;
 - Foram desprezados os efeitos térmicos.
- Modelo de turbulência: Adotado o k-ε (K- Epsilon) devido ao estudo de convergência realizado anteriormente.
- As características físicas foram adotadas conforme já mencionadas no capítulo 5.
 - Entrada: Selecionada a face de entrada, e considerada a velocidade como 29,64 m/s de acordo com a equação 6.4, que é a velocidade característica real da estrutura.
 - Saída: Considerado o mesmo valor do item 6.2.2.3, que foi 0 Pa.
 - Paredes: Foram adotadas as mesmas condições da simulação anterior.
- Características temporais: De maneira semelhante foram realizadas simulações em estado estacionário. Foi plotado o arrasto e o tempo de simulação conforme 6.35

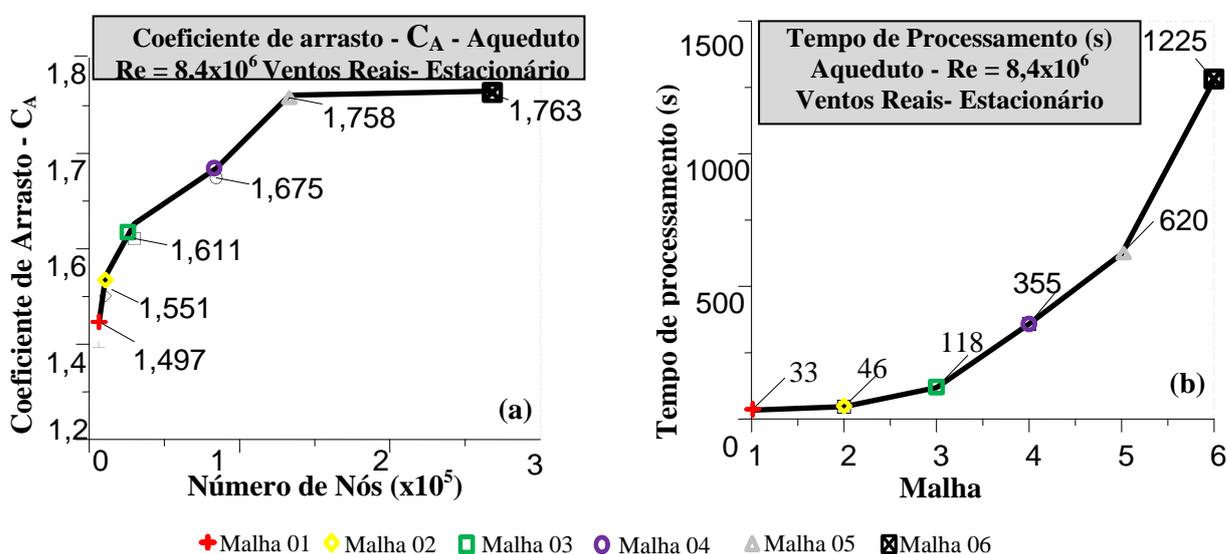


Figura 6.34 – a) Convergência de Malhas. b) Tempo de processamento- Aqueduto Vento Real.

De maneira semelhante às demais seções simuladas até o momento, foi verificada a necessidade de simular o escoamento em regime transiente, logo, foi realizado inicialmente um teste de convergência do Número de Courant com uma malha intermediária (malha 03), foram adotados passos de tempo conforme a Tabela 6.9. Os valores do arrasto encontrado podem ser vistos através da Figura 6.35. Diante dos resultados de convergência desta Figura,

foi analisado que para cada malha, deveria se estabelecer o máximo Número de Courant igual a 20, pois para valores inferiores a este, uma curva se situa aproximadamente sobre a outra.

Tabela 6.9– Convergência do Número de Courant- Aqueduto com Ventos Reais.

Passo de Tempo (s)	0,1	0,05	0,02	0,01
Courant	100	50	20	10

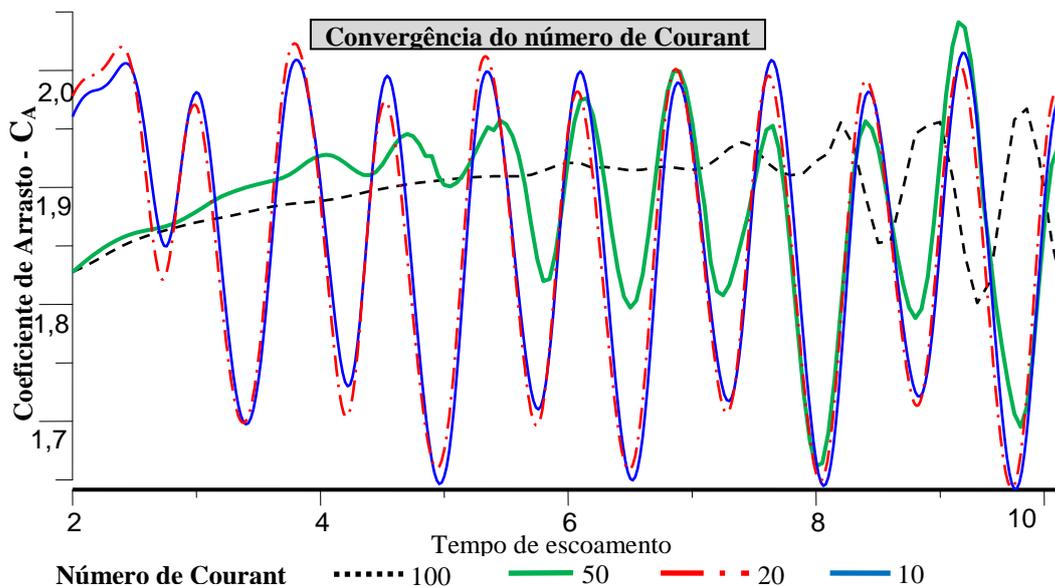


Figura 6.35 – a) Convergência no número de Courant- Aqueduto Vento Real.

- Expressões: Foi utilizada a mesma expressão para o arrasto conforme a seção do aqueduto com vento idealizado, conforme a Equação 6.3.
- Control Solver: Foram adotados os mesmos critérios de convergência do Item 6.2.2.6.
- Output Control: Foram impressos apenas os resultados da variável em questão.

6.2.3.4 Resultados - Aqueduto com vento real - Escoamento Bidimensional

A partir das informações relatadas até o momento foi possível realizar as simulações em estado transiente para o aqueduto com vento real, ou seja este é o modelo computacional mais próximo do real, obtendo valores para o arrasto numericamente, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 6.36. Não foi possível simular a malha 6, devido ao alto custo computacional e também devido a já ser perceptível a convergência da malha. Com base no valor interpolado a partir de valores da literatura conforme já mencionado anteriormente foi possível plotar graficamente o erro da simulação, conforme a Figura 6.37.

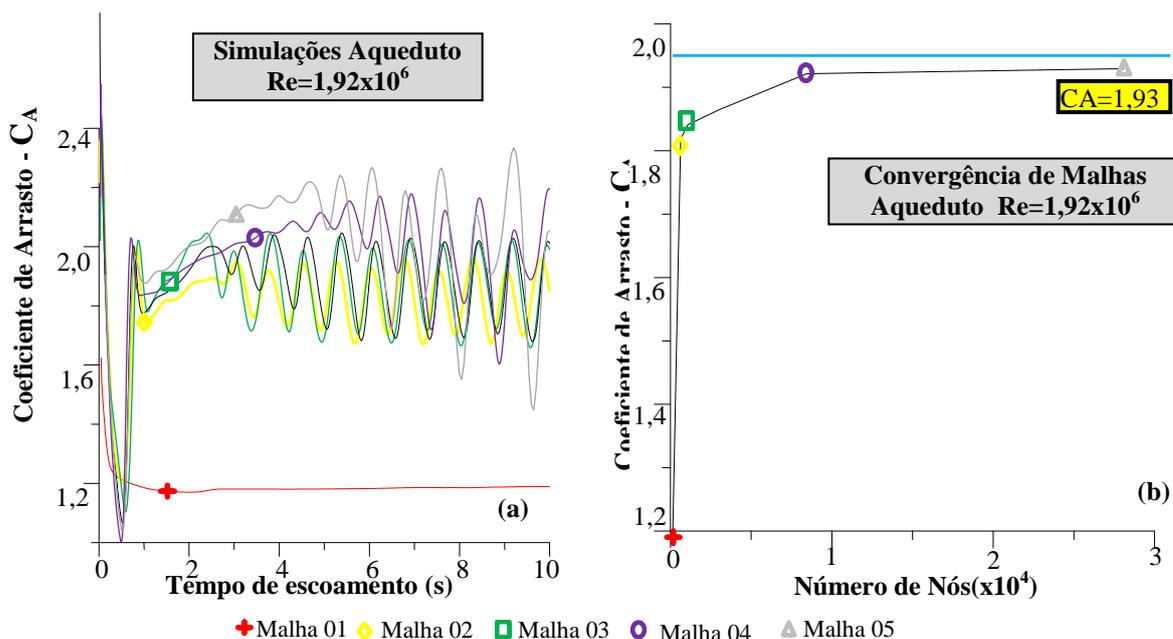


Figura 6.36 – Convergência de Malha- Aqueduto: a) Arrasto instantâneo; b) Arrasto médio.

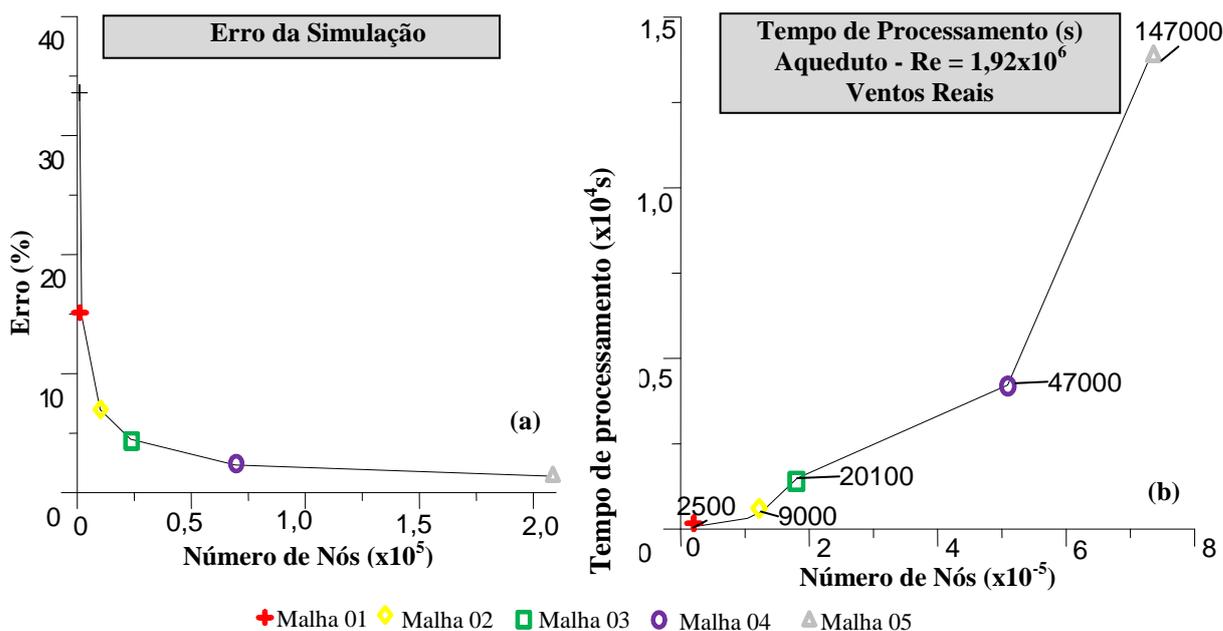


Figura 6.37 – Aqueduto: a) Erro da Simulação; b) Tempo de processamento.

Devido ao resultado do Aqueduto em sua malha mais refinada, malha 05, não apresentar um ciclo, conforme visto na Figura 6.36a, foi necessário simular o modelo para um tempo de escoamento maior, neste caso usado 15s. Isso foi necessário devido a espera de que o fenômeno de variação do arrasto se apresente com oscilações em torno de um valor médio. Desta forma foi plotado o gráfico na Figura 6.38 e verificado que esta variável descreveu um movimento harmônico, como esperado.

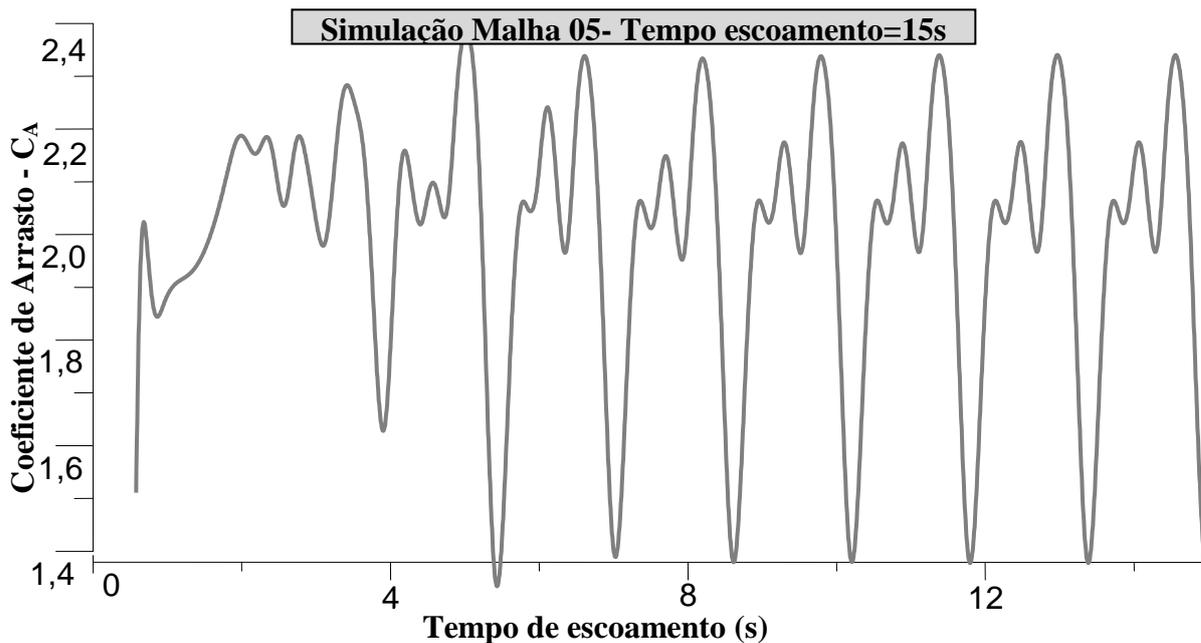


Figura 6.38 –Aqueduto Real- Detalhe da Malha 05- Escoamento em 15s.

6.2.4 Resumo das simulações - Bidimensional

A partir das simulações foi elaborada uma tabela resumo para tornar a consulta do trabalho direta e objetiva. Desta forma a tabela 6.10 indica o resumo para o escoamento bidimensional.

Tabela 6.10– Resumo das simulações- Escoamento Bidimensional.

Modelo	V-RMS	Convergência	Coeficiente de Arrasto (C_A)			
			Simulação		Çengel e Cimbala (2007)	N- BR6123/19
			Médio	Máximo		
Estado Estacionário						
01-Seção Quadrada	1×10^{-4}	NÃO	2,15	2,15	2,20	1,30
03-Aqueduto Real	1×10^{-3}	SIM	1,76	1,76	1,95	0,60 - 0,70
Estado Transiente						
01-Seção Quadrado	6×10^{-7}	SIM	2,17	2,22	2,20	1,30
03-Aqueduto Real	2×10^{-7}	SIM	1,93	2,33	1,95	0,60 - 0,70

6.2.5 Streamlines das simulações - Escoamento bidimensional

Na interface "Results" foram coletadas as linhas de correntes da simulação, apenas em caráter qualitativo, para a malha intermediária (malha 03). Como o escoamento foi em regime transiente, só foi coletado para a última evolução no tempo. As linhas foram para a variável velocidade. Desta forma pode ser visto o escoamento conforme as Figura 6.39 e Figura 6.40.

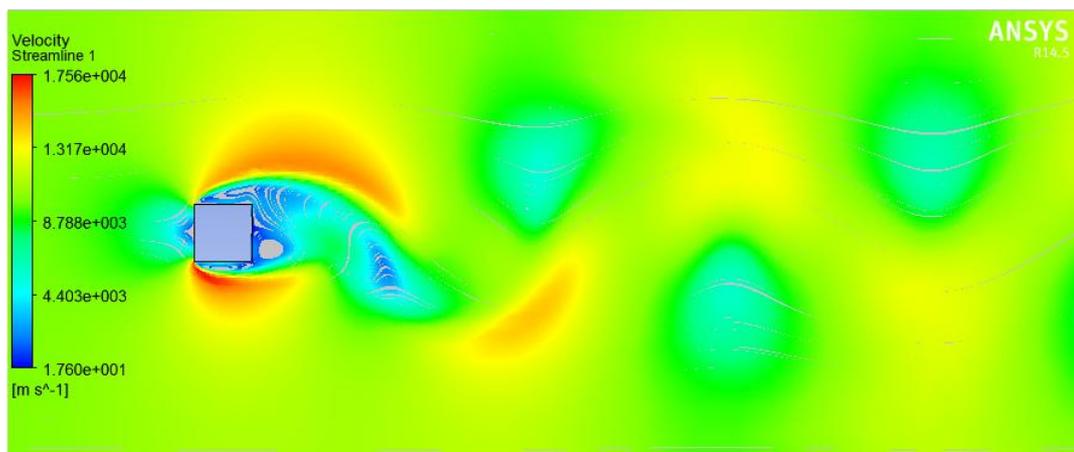


Figura 6.39 – Linhas de corrente- Escoamento em torno da Seção Quadrada

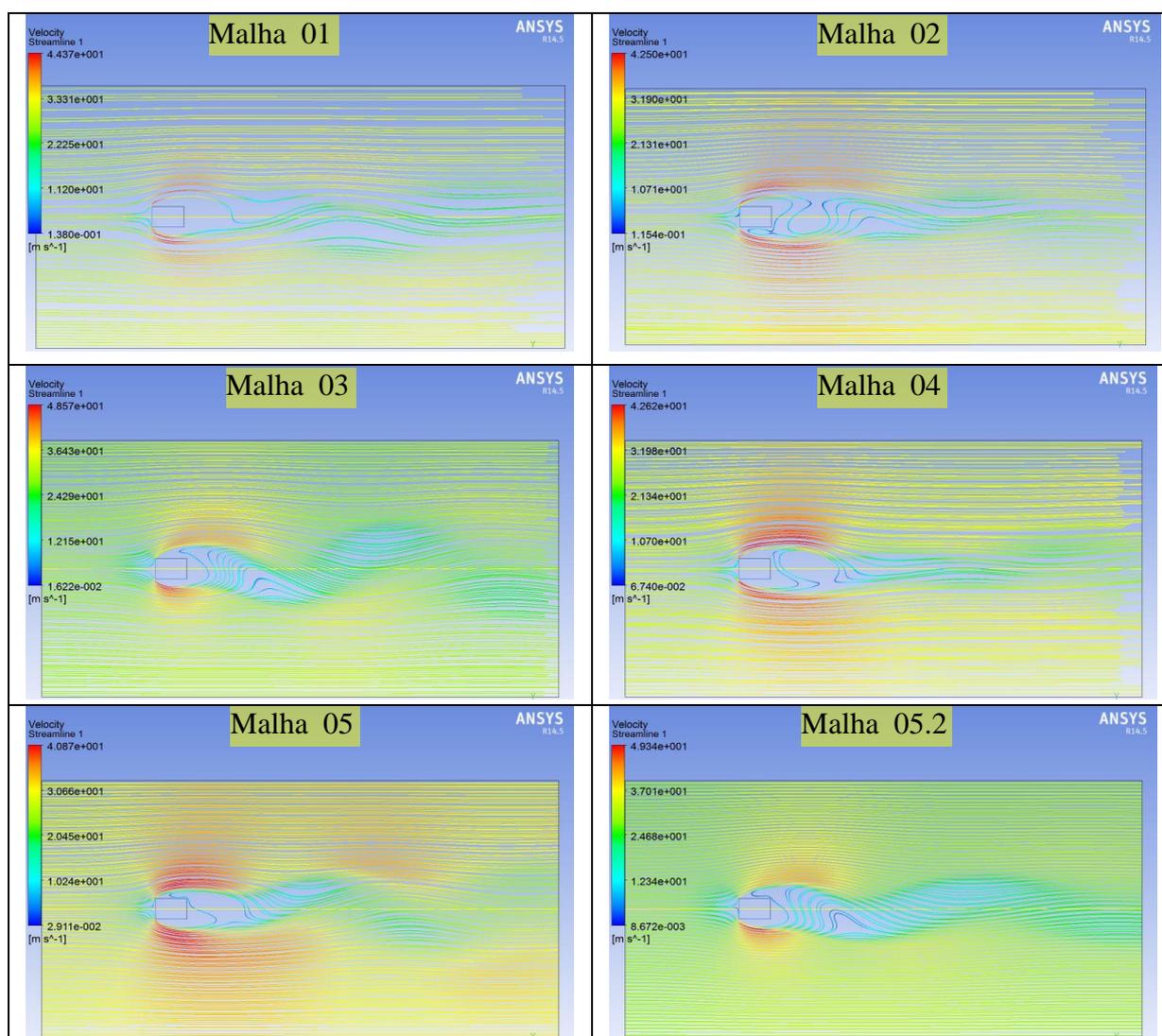


Figura 6.40 – Linhas de corrente- Escoamento em torno do Aqueduto Real

6.3 ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL

Escoamentos tridimensionais são aqueles onde as três dimensões do sólido são relevantes ao fenômeno e conseqüentemente empregadas na análise. De maneira geral edificações devem ser consideradas como estruturas tridimensionais, uma vez que tanto suas dimensões em planta quanto sua altura contribuem para o arrasto.

Nesta etapa deste trabalho foi analisado o escoamento em torno de um objeto real, um edifício de 40 pavimentos (130,30 m). Simulações de figuras geométricas básicas e consagradas na literatura foram realizadas previamente de acordo com a Figura 1.3. Conforme a Figura 6.41, inicialmente foram realizadas simulações para um dos corpos, tridimensionais, mais simples, um cubo com dimensões unitárias, imerso em um domínio tridimensional. Para este sólido foram seguidas prescrições de domínio a partir do escoamento bidimensional. O valor do coeficiente de arrasto numérico foi confrontado com valores disponíveis em Çengel e Cimbala (2007). A partir das informações desta simulação foi possível evoluir para um modelo mais próximo da realidade, prédios idealizados assentes no solo, com geometria prismática, cujas dimensões podem ser aplicadas em ábacos da NBR 6123/1988 fornecendo valores para o arrasto. A partir desta, foi possível evoluir para a estrutura real, cujo valor encontrado foi confrontado com resultados de túnel de vento.

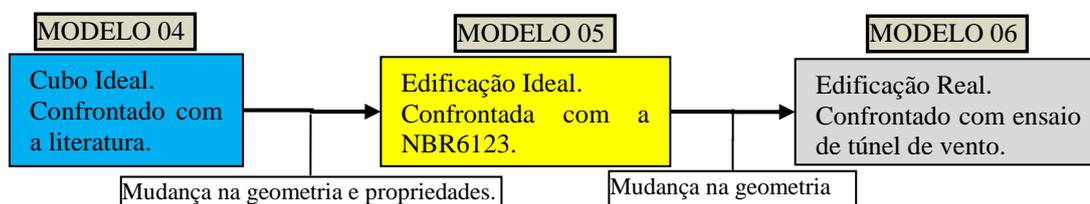


Figura 6.41 –Evolução da Modelagem - Escoamento Tridimensional

6.3.1 Cubo - Modelo 04- Escoamento Tridimensional

Na literatura há valores predefinidos para o coeficiente de arrasto em corpos tridimensionais de dimensões conhecidas. De acordo com Çengel e Cimbala (2007), para escoamento em torno de um cubo com dimensões unitárias e com $Re > 10^4$, o C_A é de 1,05.

6.3.1.1 Domínio Computacional - Cubo - Escoamento Tridimensional

Para o domínio computacional foram seguidas prescrições adotadas no escoamento bidimensional, acrescentando apenas a dimensão ortogonal ao plano desta página, conforme visto na Figura 6.42.

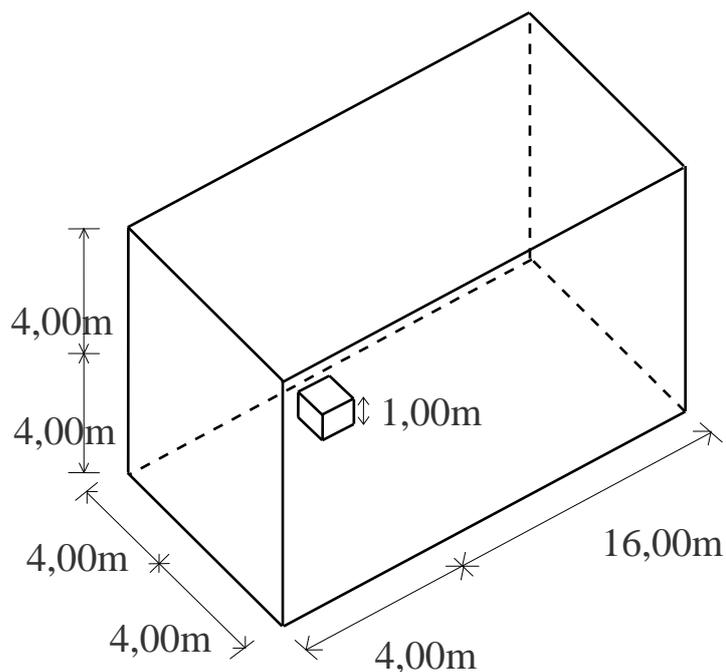


Figura 6.42 – Dimensões do domínio para o cubo.

Devido à simplicidade geométrica desta Figura e de seu domínio, a mesma foi desenhada diretamente na plataforma "Design Model" do software conforme a Figura 6.43. Também é possível visualizar nesta imagem os subdomínios criados para gerar refino local.

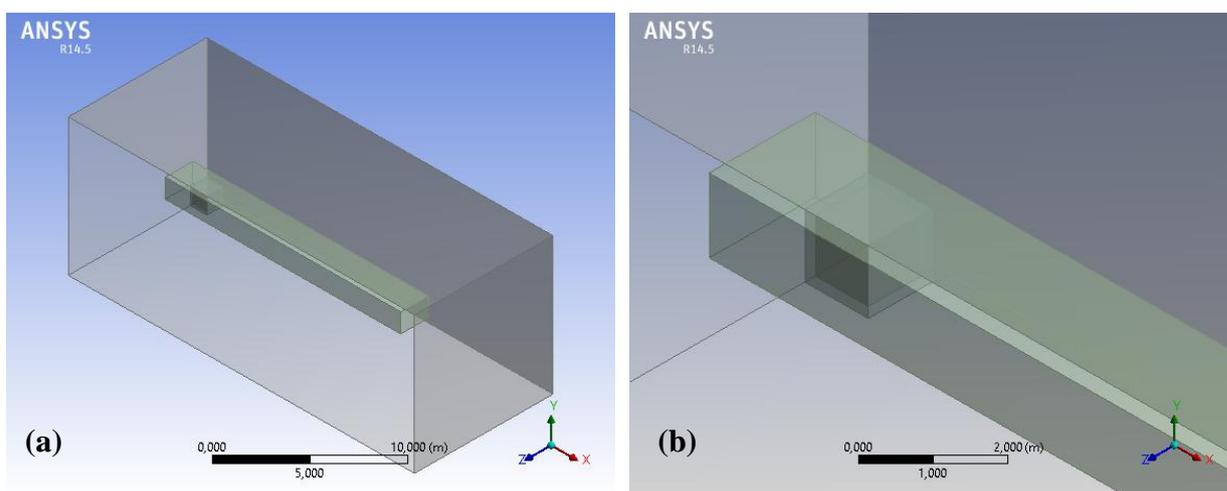


Figura 6.43 –a) Domínio e subdomínios para a seção tridimensional; b) Detalhe do Cubo.

6.3.1.2 Malha Computacional - Cubo - Escoamento Tridimensional

Foram utilizados volumes tetraédricos mudando a malha para verificação da convergência. O domínio foi subdividido para melhor refinamento da malha na região da camada limite e esteira, ficando a região de interesse com menores tamanhos dos volumes de controle, conforme já visto na seção 6.2. Sabendo que a interface é a região que envolve o sólido, o

subdomínio 1 é o que envolve esta interface e o 2 é o último (Domínio total) que abrange a entrada, saída do escoamento e suas paredes, foram numerados então conforme a Figura 6.44.



Figura 6.44 – Domínio e subdomínios para o cubo.

Nos subdomínios foram discretizados sempre em malhas cujo tamanho do elemento é a metade do elemento da malha anterior conforme a Tabela 6.10, análogo às seções anteriores, tomando apenas 5 malhas para o estudo de convergência. Esta tabela foi montada com tamanho dos elementos em metros para o objeto em estudo. É possível visualizar as malhas para tal objeto a partir da Figura 6.45.

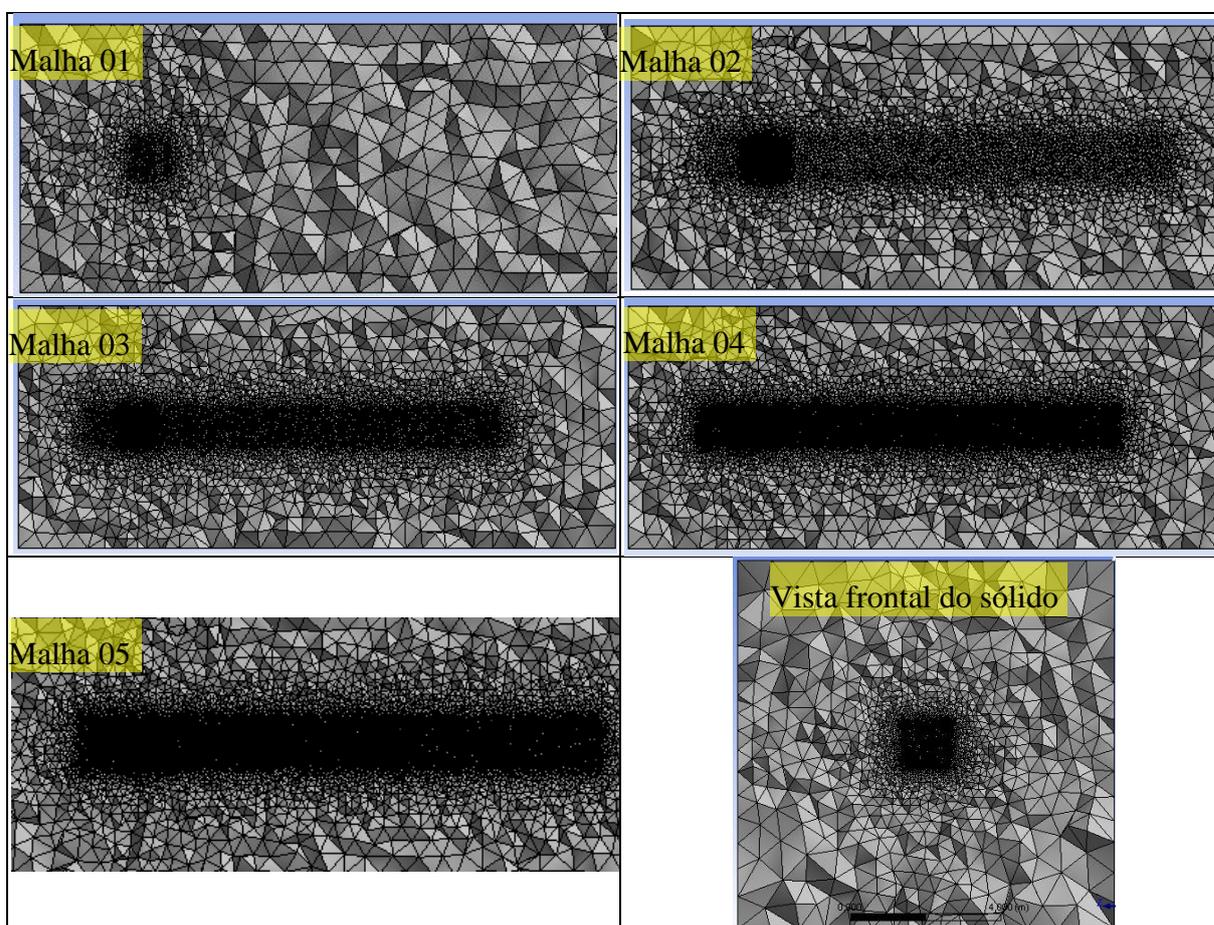


Figura 6.45 – Detalhes das malhas- Cubo.

Para o teste de convergência foram utilizadas malhas refinadas e verificada a tendência para o arrasto, tomando-o como uma assíntota horizontal.

Tabela 6.11– Refinamento da malha nos subdomínios - Tamanho dos elementos em metros (m)

Subdomínio	Malha 01	Malha 02	Malha 03	Malha 04	Malha 05
1	0,2	0,1	0,05	0,025	0,02
2	1,0	0,5	0,25	0,15	0,1
Interface	0,1	0,05	0,025	0,015	0,01
Quantidade de nós					
Cubo	14.999	101.322	165.380	314.168	569.366

6.3.1.3 Qualidade de malha

Conforme já descrito na Seção 6.2, para a malha intermediária (Malha 03), os elementos com menores e maiores deformação podem ser visualizados nas Figura 6.46 e Figura 6.47, respectivamente.

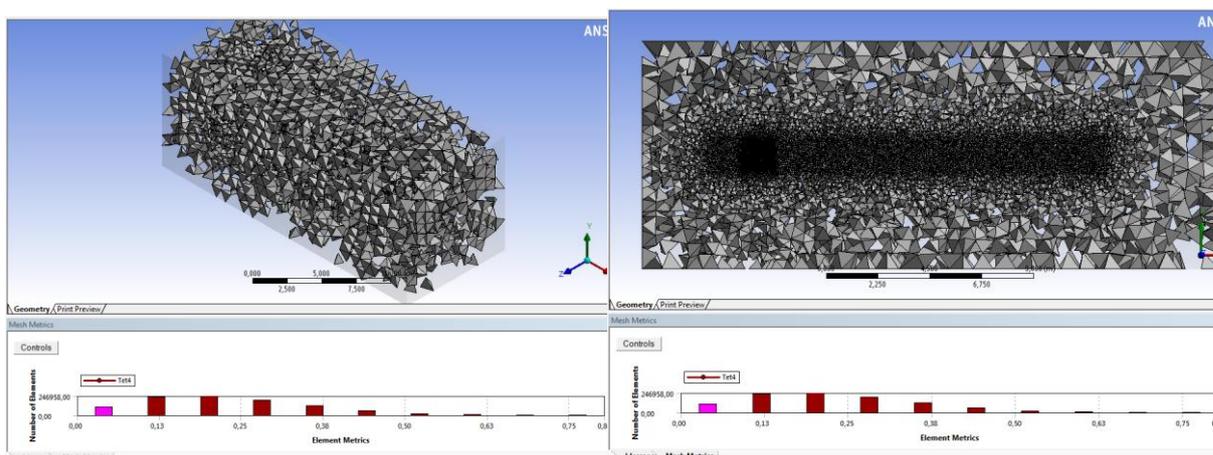


Figura 6.46 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)- Cubo.

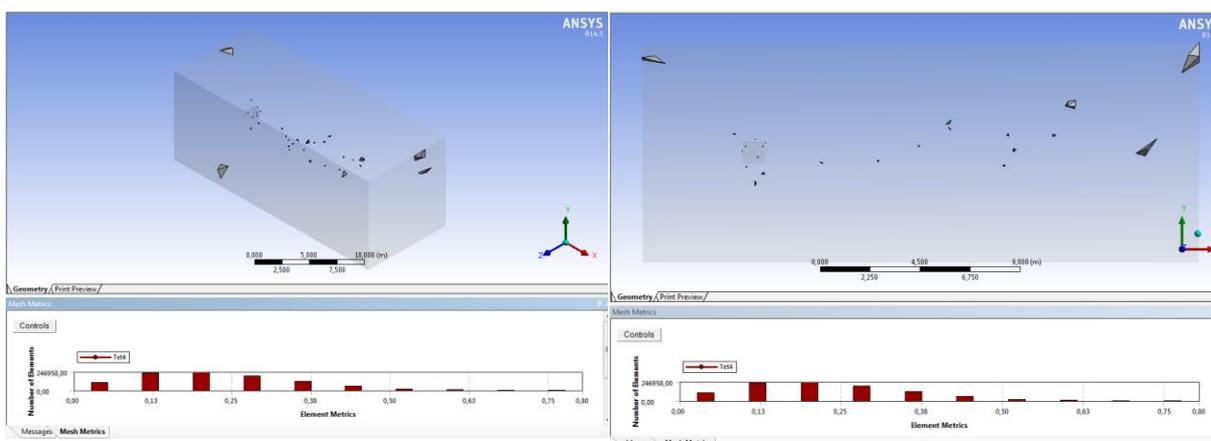


Figura 6.47 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Cubo.

Foi encontrada a deformação mínima de $4,97 \times 10^{-4}$ e a máxima de 0,80. Para a análise

completa foi elaborada a Tabela 6.12 com a quantidade de elementos e sua deformação.

Tabela 6.12– Skewness da malha 03- Cubo.

Nº de elementos	101.000	247.000	189.000	117.000	5.9400	19.400	4.390	642
Deformação	0,0407	0,201	0,282	0,362	0,442	0,523	0,603	0,683

De maneira semelhante, também foi analisada a ortogonalidade da malha, elaborando a Tabela 6.13 para tal verificação. As Figura 6.48 e Figura 6.49 ilustram a situação de maior e menor ortogonalidade respectivamente. O máximo valor da ortogonalidade encontrado foi de 0,99, já o menor valor para tal malha foi 0,23.

Tabela 6.13– Orthogonal Quality da malha 03- Cubo.

Nº de elementos	272.000	389.000	185.000	74.900	31.900	12.200	3.540	759
Ortogonalidade	0,958	0,882	0,806	0,729	0,653	0,577	0,501	0,424

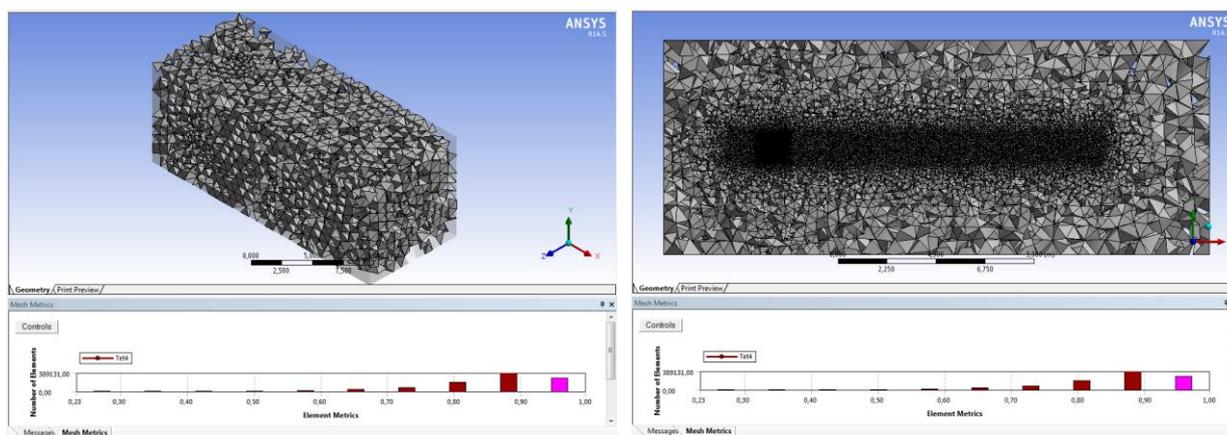


Figura 6.48 – Elementos com maiores ortogonalidade (Na Regiões de interesses)- Cubo.

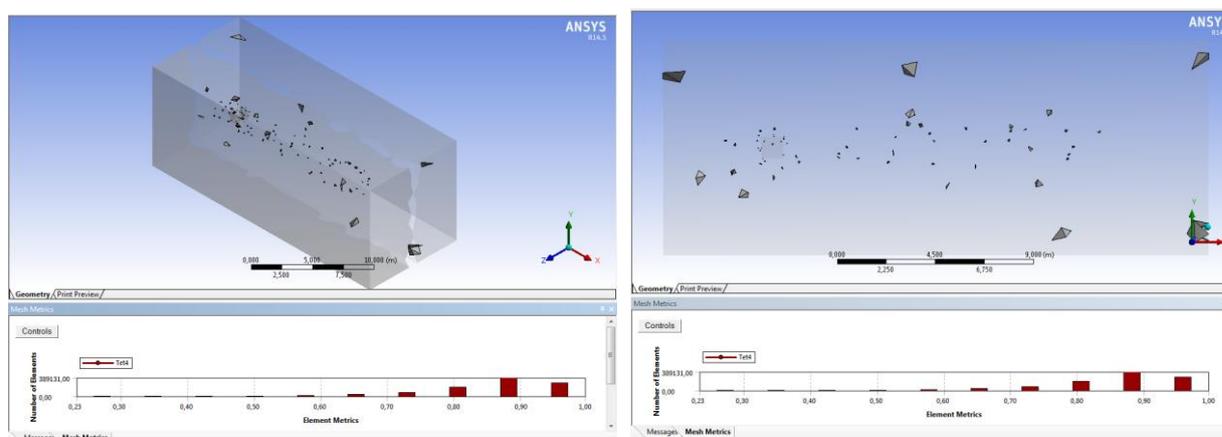


Figura 6.49 – Elementos com menores ortogonalidade (Fora da Regiões de interesses)- Cubo.

6.3.1.4 Setup - Cubo - Escoamento Tridimensional

Nesta etapa foram inseridas as características físicas do escoamento. Conforme já mencionado no item 5.2.3.

- Foi criado um novo material para inserir as características do vento idealizado:
 - Massa específica = $1,0\text{kg/m}^3$;
 - Viscosidade = $1,0\text{ m}^2/\text{s}^2$;
 - Pressão atmosférica = 1 atm;
 - Foram desprezados os efeitos térmicos.
- Modelo de turbulência: De maneira semelhante à seção quadrada foi realizado um teste de convergência no modelo de turbulência, conforme a Figura 6.50. Onde é possível verificar que alguns modelos podem ser inicialmente descartados, tal que BSL, Smagorinsky, RNG, zero equação e a simulação sem modelo de turbulência. Verifica-se que o valor mais próximo do teórico foi o modelo SST, conforme já corroborado por Mendis et al (2007) e Abraumchuk (2013), estes autores destacam que o modelo de turbulência SST é o mais indicado para tais simulações tridimensionais.

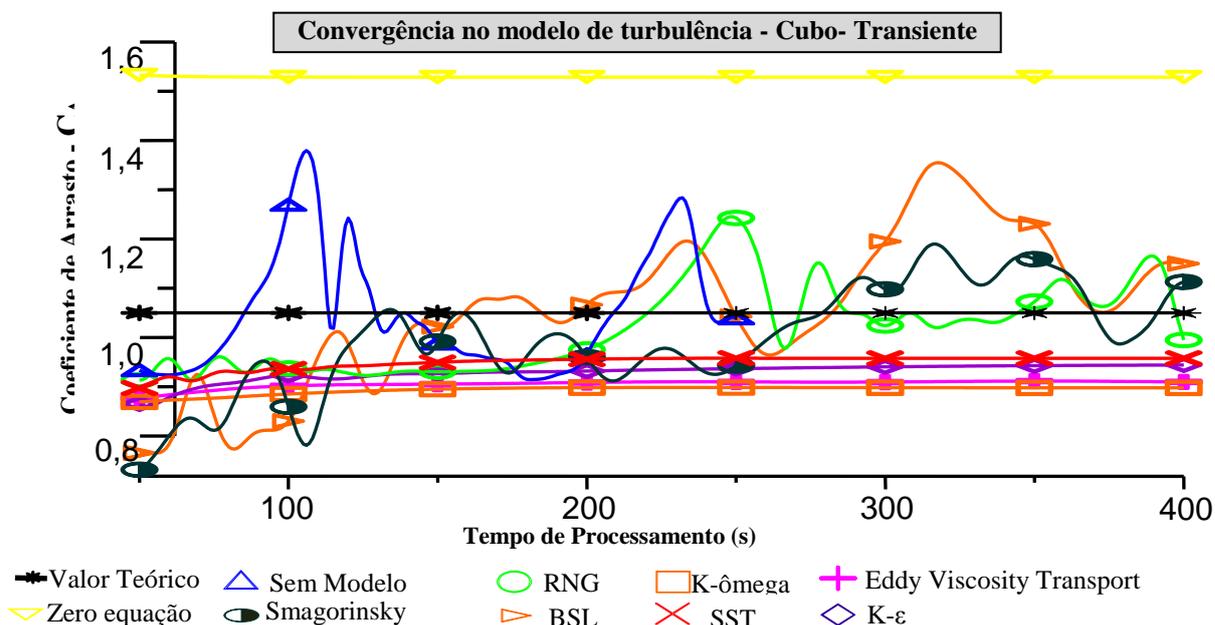


Figura 6.50 – Convergência do Modelo de turbulência- Cubo

- As características físicas foram adotadas conforme já mencionadas no capítulo 5, resultaram no domínio conforme a Figura 6.51.
 - Entrada: Seleccionada a face de entrada, e considerada a velocidade como 10^4 m/s , para desta forma obter um $\text{Re} = 10^4$.
 - Saída: Nesta etapa adota-se uma pressão absoluta de 0 Pa.

- Paredes: É considerado nos contornos superior, inferior e laterais do domínio a condição de *Free Slip Wall*, ou seja livre para escoar. Nas paredes do objeto em estudo (cubo) é considerada a condição de *No Slip Wall*.

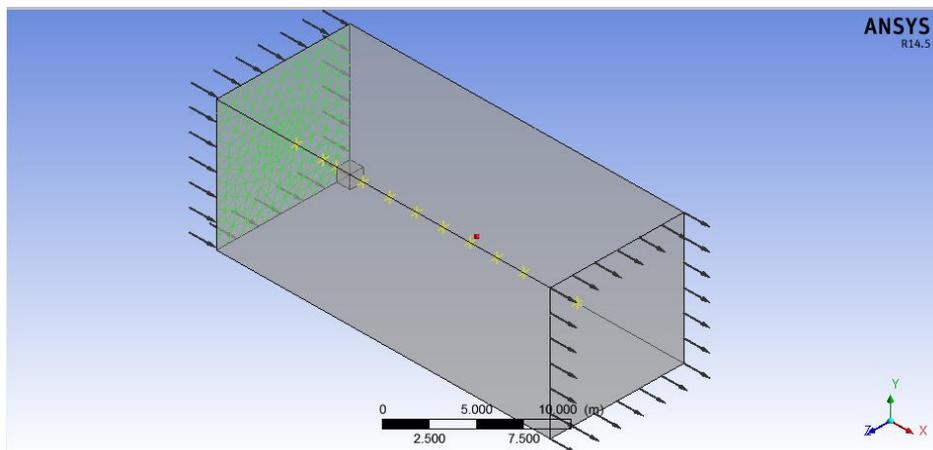


Figura 6.51 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Cubo.

- Características temporais: Devido ao alto custo computacional, e por ter sido analisado a necessidade de simulação em estado transiente, não foram realizadas simulações em estado estacionário. Para a simulação em transiente foram adotadas as características indicadas na Seção 5. Como o domínio computacional do cubo tem a mesma extensão do domínio utilizado na seção quadrada, foi utilizado o tempo de escoamento visto na Equação (6.1). Foram variadas as malhas, conforme a Tabela 6.11, em seguida foi variado o passo de tempo. Não se sabia *a priori* qual o valor do Número de Courant ideal para tal simulação, desta forma foi verificada a convergência deste valor, informando qual o maior valor do número de Courant capaz de fornecer resultados confiáveis, com menor custo computacional. Foi elaborada a Tabela 6.14 para teste de diferentes Números de Courant, variando apenas o passo de tempo para a malha intermediária. Desta forma foi plotado o gráfico da Figura 6.52, que permite analisar que: na situação final, após a estabilização do fenômeno, todos os passos de tempo mostraram o mesmo resultado. Entretanto, pela variação na situação inicial até 1/4 do tempo de escoamento, foi analisado que de maneira semelhante ao escoamento bidimensional, para o Courant menor que 20, tem-se aproximadamente curva sobre curva. Com isto se estabeleceu o valor para o Courant entre 10 e 20.

Tabela 6.14– Convergência do número de Courant- Cubo

Passo de Tempo (s)	4×10^{-4}	$3,2 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	8×10^{-5}	4×10^{-5}	2×10^{-6}	1×10^{-6}
Courant	80	60	30	15	7,5	4	2

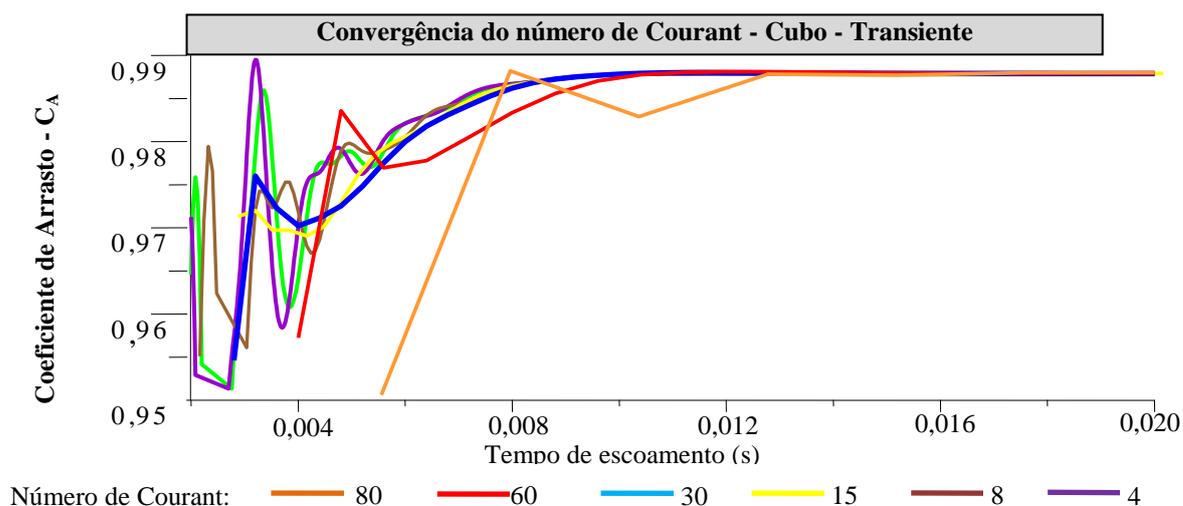


Figura 6.52 – Convergência do número de Courant- Cubo.

De maneira semelhante ao escoamento bidimensional, foi realizado um teste de convergência no número de iterações por passo de tempo (ver Figura 6.53) verificando que a partir de 20 iterações o fenômeno converge. Para 10 iterações (default do software) surge um erro mínimo, então de maneira semelhante ao escoamento bidimensional foi tomando este valor para todas as simulações, uma vez que para iterações menores que 10 o erro aumenta bastante resultando em curvas discrepantes da convergida (acima de 20 iterações).

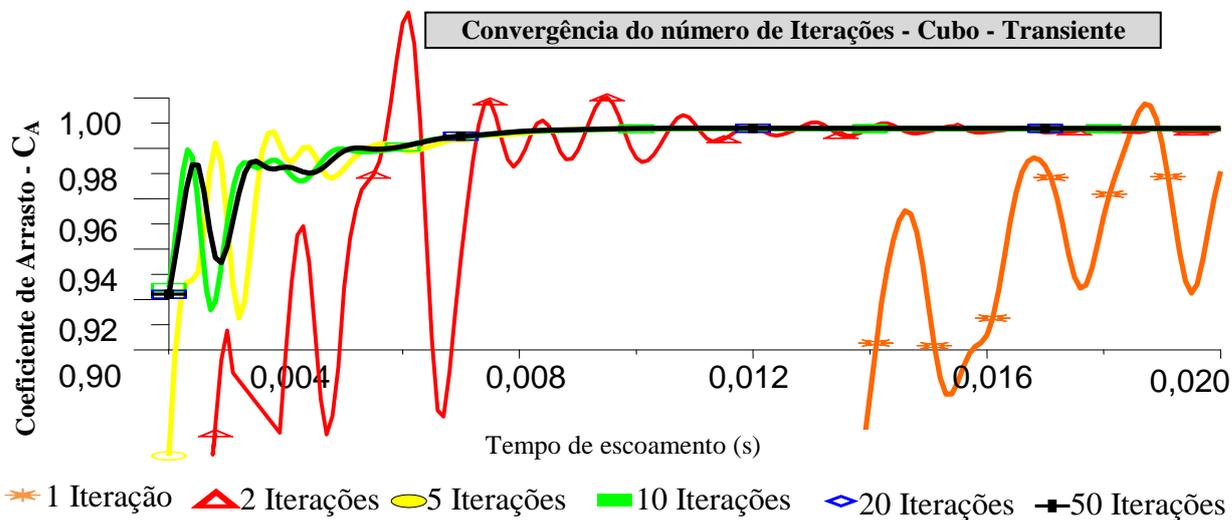


Figura 6.53 – Convergência no número de Iterações- Cubo.

- Expressões: Foram inseridas no Ansys expressões para cálculo do arrasto, explicitando este valor direto na tela. De acordo com a equação 2.133, sabendo que A é a área frontal, dado pela altura multiplicada pela espessura da geometria cúbica, teremos a Equação (6.6).

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1 \times 10000^2 \times 1 \times 1}$$

$$C_A = 2 \times 10^{-8} \times F_D \quad (6.6)$$

- Control Solver: Os Critérios de convergência foram seguidos conforme o escoamento bidimensional, ou seja, foi adotado um resíduo pequeno para a parada, considerando o valor de 10^{-10} objetivando desta forma que a simulação não pare pelo resíduo e sim para um determinado tempo de escoamento, pois trata-se de estado transiente.
- Output Control: Foram impressos apenas os resultados da variável em questão, o arrasto, para cada passo de tempo no regime transiente.

6.3.1.5 Resultados - Cubo - Escoamento Tridimensional

A partir das informações relatadas até o momento foi possível realizar as simulações em estado transiente para o cubo, obtendo valores para o arrasto conforme ilustrado nos gráficos da Figura 6.54. Com base no valor disponível na literatura, $C_A=1,05$ de acordo com Çengel e Cimbala (2007) foi possível plotar o erro da simulação, conforme a Figura 6.55.

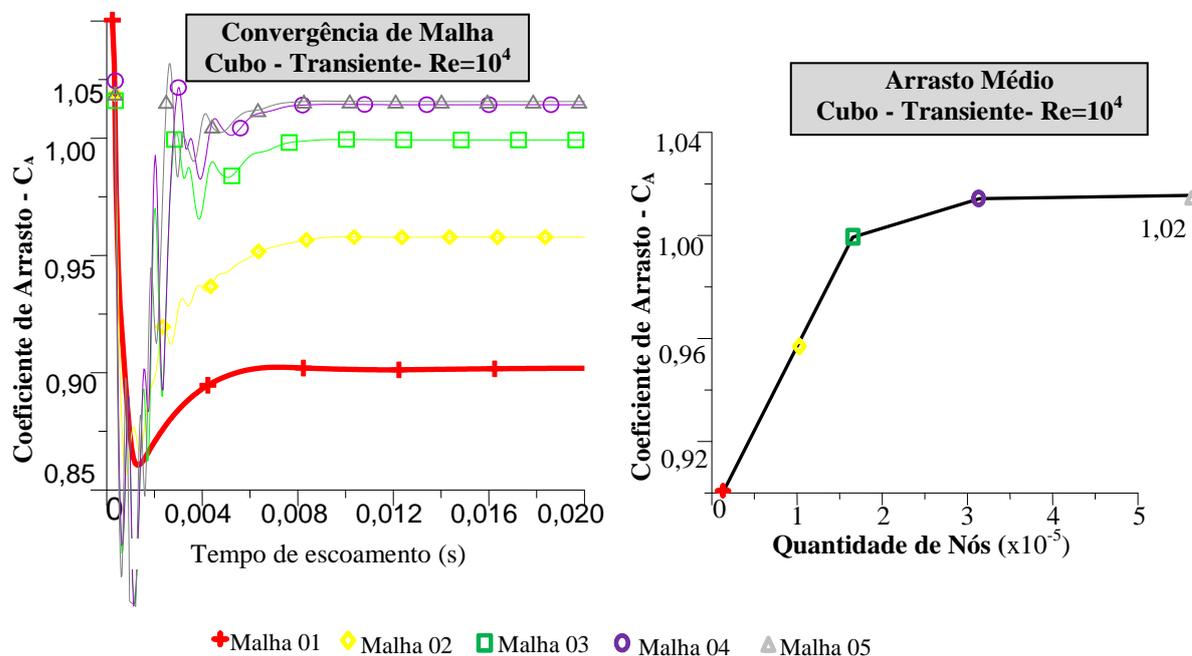


Figura 6.54 – Convergência de Malha - Seção quadrada: a) Arrasto instantâneo; b) Arrasto médio.

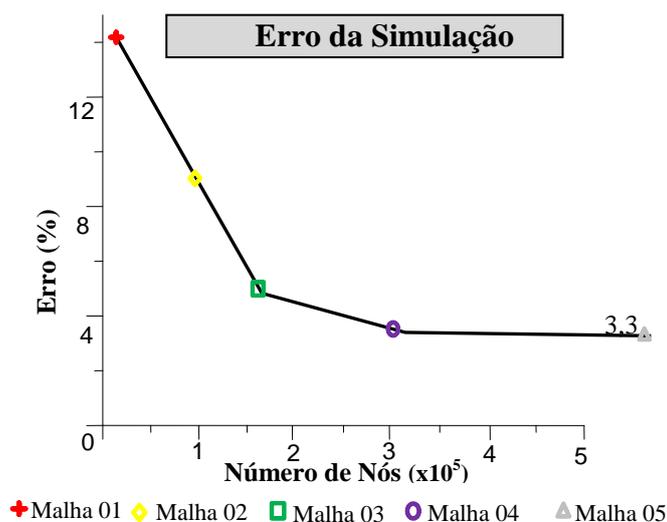


Figura 6.55 – Erro da Simulação- Cubo.

6.3.2 Edifícios idealizados de acordo com a NBR6123/1988- Modelo 05

Conforme já mencionado na Figura 1.3, e corroborado pela Figura 6.41, foram elaborados edifícios ideais, recebe esta denominação a edificação não necessariamente real, que foi criada com dimensões simples, cuja forma regular em planta, tal que um retângulo, que tenha seus valores disponíveis na norma NBR 6123/1988. Destaca-se que o objetivo desta etapa foi evoluir do modelo tridimensional cúbico centrado no domínio computacional para um modelo mais próximo da situação real: uma geometria paralelepipedica assente no solo com a velocidade real do vento.

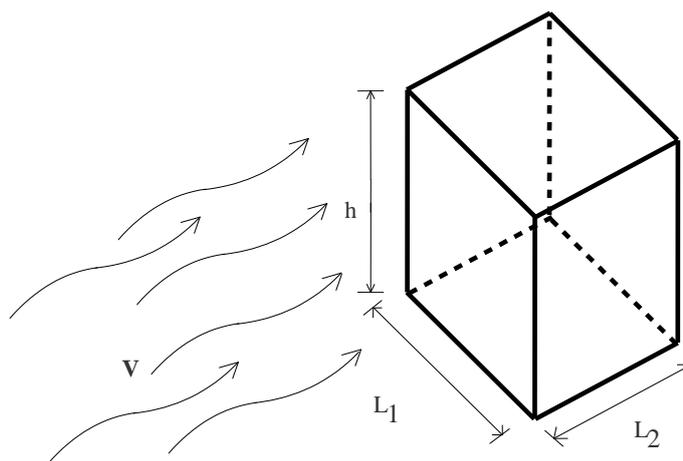


Figura 6.56 –Edifício idealizado.

O valor do coeficiente de arrasto foi extraído da Figura 4 da NBR6123/1988 que trata o coeficiente de arrasto para edificações paralelepipedicas em vento de baixa turbulência. Considerou-se vento de baixa turbulência conforme já mencionado na subseção 4.6.

Desta forma foi elaborada a Tabela 6.14 com as dimensões (conforme a Figura 6.56) adotadas em cada submodelo e o coeficiente de arrasto conforme a NBR 6123/1988.

Mesmo considerando estas geometrias bastante simples, e com a possibilidade de consulta direta da norma vigente, foi avaliada apenas a calibração do túnel de vento numérico com o experimental, permitindo a evolução do modelo para o edifício real.

Tabela 6.15–Características dos Edifícios e coeficiente de arrasto de acordo com a NBR6123/1988

Modelo	h (m)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	C _A
5.a	30	10	10	1,32
5.b	40	5	10	1,13
5.c	40	10	5	1,49
5.d	130	30	20	1,47

Nota-se que nesta Tabela a dimensão "h" equivale a dimensão característica "D" utilizada até esta etapa do trabalho.

Os passos desta simulação foram adotados para todos os submodelos da Tabela 6.15, entretanto as figuras serão utilizadas apenas para a malha intermediária (malha 03) subModelo 05.a (30x10x10m), adotando que os demais foram realizados de maneira semelhante. Mantendo desta forma o mesmo padrão de desenho da estrutura, tratamento de malha, setup e processamento (solver).

6.3.2.1 Domínio Computacional - Edifício idealizado - Escoamento Tridimensional

Foram seguidas as instruções conforme o item 6.3.1.1, entretanto desta vez situando o sólido no piso (Face inferior do domínio). As demais dimensões utilizadas foram as mesmas relações do cubo, sendo D a altura (h) da edificação, conforme a Figura 6.57, ou seja:

- Distância do Edifício à entrada, as laterais e ao teto: 4D
- Distância do Edifício ao fundo (saida): 16D.

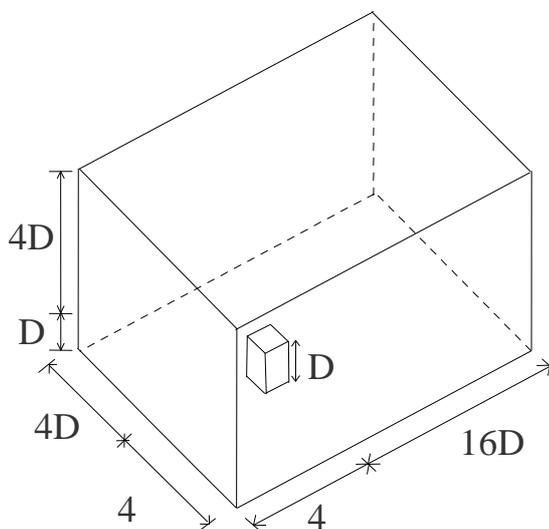


Figura 6.57 – Dimensões do domínio genérico.

É possível analisar que o domínio computacional terá o tamanho de $20D \times 8D \times 5D$, desta forma podemos ressaltar que o Modelo 05.a necessitará de um domínio com $600m \times 240m \times 150m$ já o Modelo 05.b e 5.c precisará de $800m \times 320m \times 200m$ e de maneira semelhante o Modelo 05.d necessitará de um domínio computacional de $2.600m \times 1.040m \times 520m$. Devido à discrepância com os demais modelos foi realizado a redução deste modelo, objetivando utilizar uma escala reduzida, neste caso 1:10, o que remete ao edifício do 05.d agora possuir as dimensões de $13m \times 3m \times 2m$ e domínio $260m \times 104m \times 52m$.

Devido a simplicidade da geometria, a mesma foi desenhada diretamente na plataforma CAD (Design Model) do Ansys 14.5 conforme a Figura 6.58.

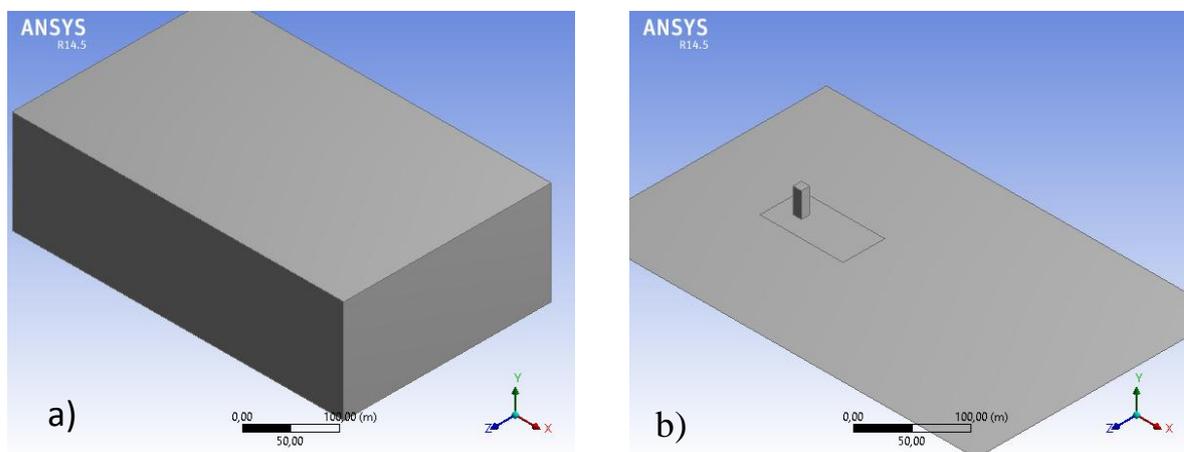


Figura 6.58 – Edifício idealizado a) Domínio; b) Detalhe da edificação, ocultado as faces do domínio.

6.3.2.2 Malha Computacional - Edifício idealizado - escoamento Tridimensional

Foram utilizados volumes tetraédricos mudando a malha para verificação da convergência. O domínio foi subdividido para melhor refinamento da malha na região de esteira, ficando a região de interesse com menores tamanhos dos volumes de controle, conforme já visto na Figura 6.6. O refinamento foi realizado no piso, e verificada uma transição de malha em parte da esteira, desta forma foram resolvidos 2 problemas referente a captura de efeitos no piso e na esteira com apenas um refinamento de malha. Desta forma não foram realizados subdomínios análogos ao escoamento bidimensional; foi elaborada apenas uma interface conforme a Figura 6.58b. Os detalhes das malhas encontram-se na Figura 6.59. Nesta figura é possível visualizar as malhas geradas a partir do subModelo 05.a.

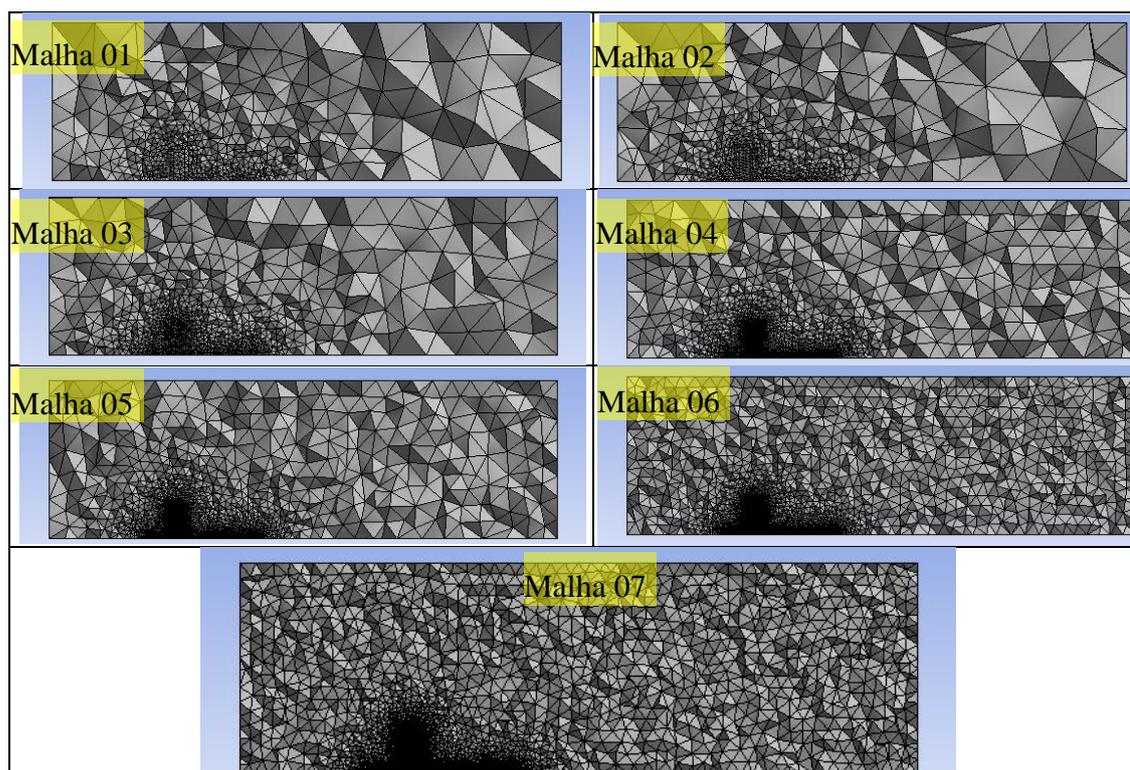


Figura 6.59 – Detalhes das malhas- Edifício idealizado- SubModelo 05.a.

Logo, foi elaborada a tabela 6.16 com tamanho dos elementos para os edifícios do Modelo 05. Por tratar-se de uma tabela genérica, os valores foram expressos em função da altura, a depender do submodelo utilizado. Inicialmente foram adotadas malhas grosseiras para o Modelo 05a, entretanto percebeu-se que as malhas iniciais estavam gerando resultados iniciais com grandes erros, fornecendo apenas uma estimativa inicial, bastante longe do resultado convergido. Isto ocorre devido a discretização com poucos elementos. Diante da progressão das simulações, algumas malhas não foram analisadas, isto foi adotado objetivando uma análise mais direta, uma vez que já se tinha resultados para os submodelos iniciais.

Tabela 6.16– Refinamento malha - Edifício idealizado - Tamanho dos elementos em metros (m).

Região	Malha 00	Malha 01	Malha 02	Malha 03	Malha 04	Malha 05	Malha 06	Malha 07
Piso	0,4D	0,3D	0,3D	0,15D	0,10D	0,10D	0,05D	0,05D
Interface e Prédio	0,20D	0,15D	0,10D	0,075D	0,050D	0,025D	0,015D	0,010D
Paredes do domínio	1D	0,75D	0,75D	0,75D	0,3D	0,3D	0,15D	0,15D
Modelo	Quantidade de Nós							
5.a (30x10x10)	3.487	6.669	9.185	18.473	53.142	80.573	256.724	451.204
5.b (40x5x10)			39.766	142.993	281.494	359.146	426.943	812.630
5.c (40x10x5)				198.319	374.478	483.330	579.191	1.164.574
5.d (130x30x20)			18.822		230.195	408.076		807.488

6.3.2.3 Qualidade de malha

De maneira semelhante as demais simulações, para a análise de qualidade de malha foi utilizado apenas o próprio software Ansys, em sua interface Mesh. Desta forma foi possível verificar a qualidade da malha através de gráficos para todas os refinamentos em questão, entretanto só foi descrito, neste trabalho, para a malha intermediária (Malha 03) do modelo 5a, quais os elementos com menores e maiores deformação conforme as Figura 6.60 e Figura 6.61 respectivamente.

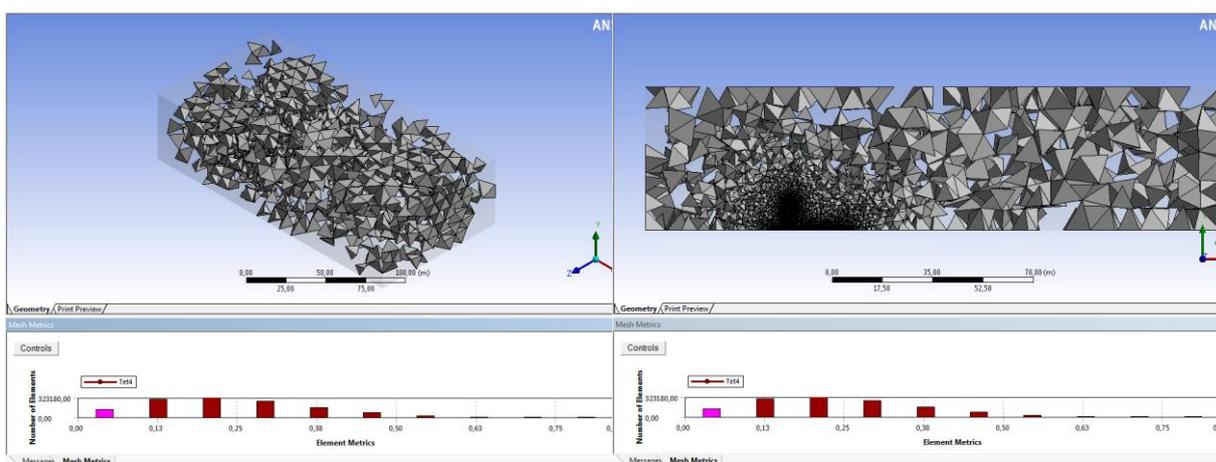


Figura 6.60 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses) Edifício idealizado

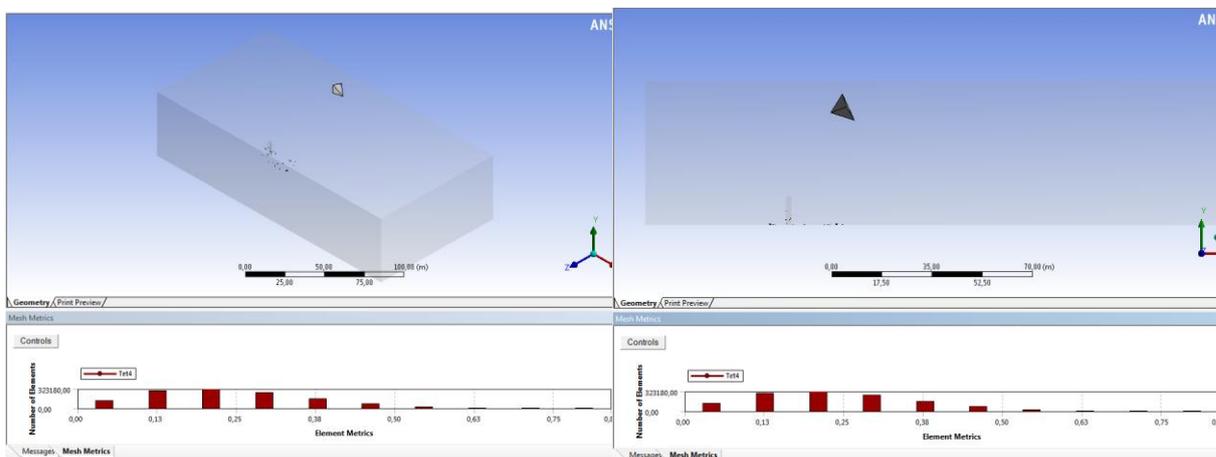


Figura 6.61 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Edifício Real.

Foi encontrada a deformação mínima de $2,75 \times 10^{-4}$ e a máxima de 0,84. Para a análise completa foi elaborada a Tabela 6.17 com a quantidade de elementos e sua deformação.

Tabela 6.17– Skewness da malha 03- Edifício idealizado.

Nº de elementos	127.000	289.000	323.000	256.000	158.000	71.000	21.800	43.400	642	46
Deformação	0,0423	0,126	0,210	0,294	0,378	0,462	0,546	0,630	0,714	0,798

De maneira semelhante, também foi analisada a ortogonalidade da malha, elaborando a Tabela 6.18 para tal verificação. As Figura 6.62 e Figura 6.63 ilustram a situação de maior ortogonalidade e menor respectivamente. O máximo valor da ortogonalidade encontrado foi de 0,99, já o menor valor para tal malha foi 0,23.

Tabela 6.18– Orthogonal Quality da malha 03- Edifício idealizado.

Nº de elementos	290.000	513.000	273.000	109.000	43.500	17.200	51.400	11.500	197	18
Ortogonalidade	0,959	0,883	0,807	0,731	0,655	0,579	0,503	0,426	0,350	0,274

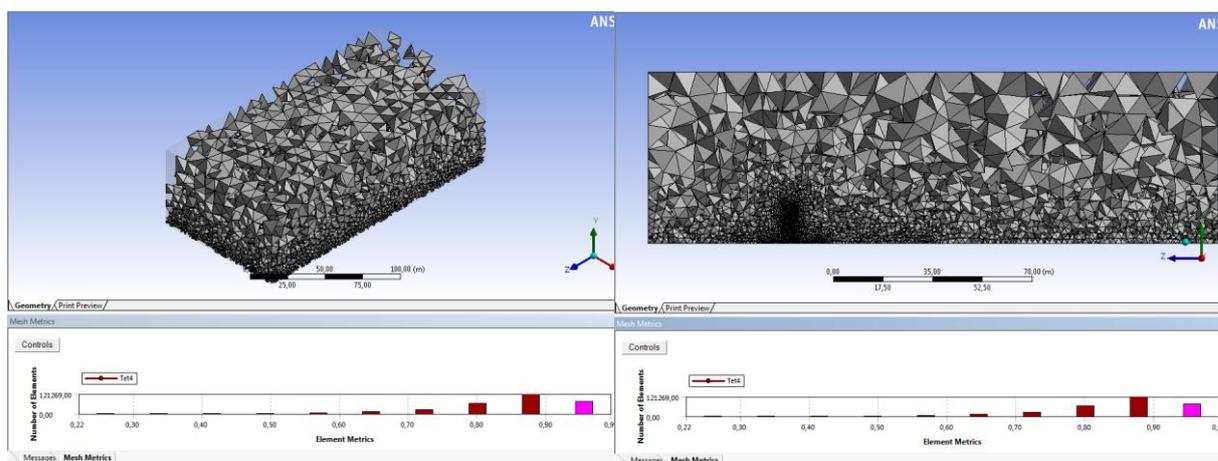


Figura 6.62 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses) Edifício idealizado.

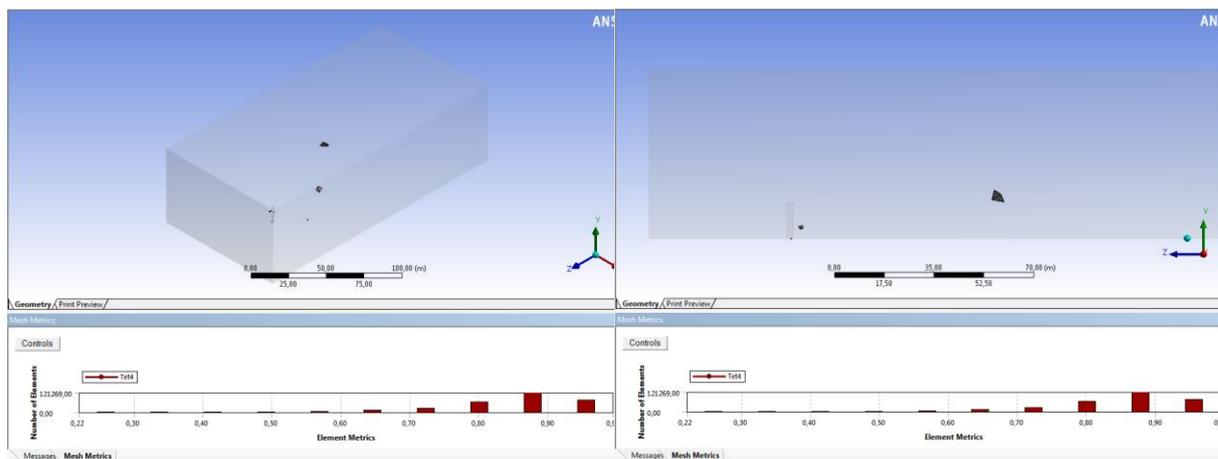


Figura 6.63 - Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses) Edifício idealizado.

6.3.2.4 Setup - Edifício idealizado - escoamento Tridimensional

Nesta etapa foram inseridas as características físicas do escoamento. Conforme já mencionado no item 5.2.3. verifica-se o domínio através da Figura 6.64.

- Foi utilizado o próprio material do software intitulado ar a 25°C, conforme já utilizado no aqueduto com vento real (Escoamento bidimensional).
 - Massa específica = 1,185kg/m³;
 - Viscosidade dinâmica = 1,831 kg/m.s;
 - Pressão atmosférica = 1 atm;
 - Foram desprezados os efeitos térmicos.
- Modelo de turbulência: Adotado o SST (Shear Stress Transport) devido ao estudo de convergência realizado para objetos tridimensionais (Cubo).
- As características físicas foram adotadas conforme já mencionadas na Seção 5.
 - Entrada: Selecionada a face de entrada, e considerada a velocidade de entrada como 30m/s, apenas como um valor estimativo, por não ser um caso particular.
 - Saída: Considerado o mesmo valor do item 6.2.2.3, que foi 0 Pa.
 - Paredes: Considerado livre escoamento (Free Slip Wall) em suas paredes laterais e superior (Teto) e considerado a condição de não deslizamento (No Slip Wall) na parede inferior (Piso) e na edificação.

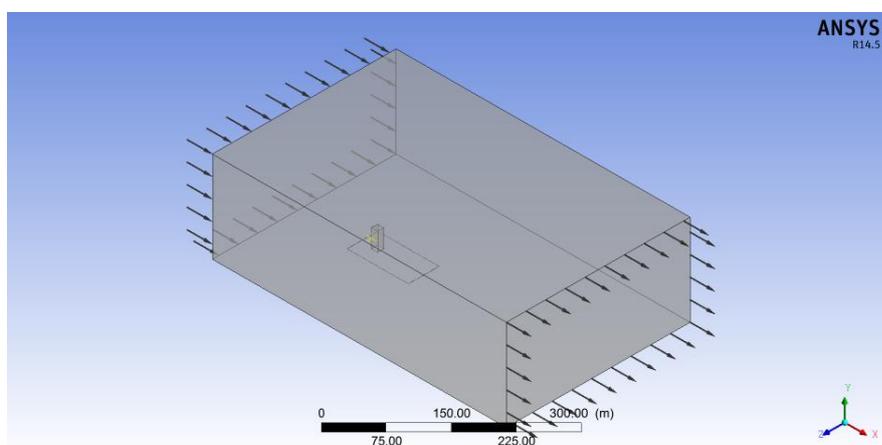


Figura 6.64 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Edifício idealizado.

- Características temporais: Conforme já verificado no escoamento tridimensional anterior, cubo, foi necessário realizar simulações em estado transiente.

Para a simulação em transiente foi considerado um tempo total de escoamento tal que o fluido escoe até a variável (velocidade, pressão, força ou arrasto) atingir estabilidade, ou seja, até sua variável manter o caráter oscilatório mantendo a mesma amplitude. Para a edificação (ideal) foi percebido que este valor é aproximadamente a partir de dez vezes o tempo

necessário para o fluido atravessar o domínio. Ou seja, a partir da equação (2.7) podemos montar a eq. (6.7).

$$u = \frac{dx}{dt} \rightarrow 30 = \frac{600}{t} \quad (6.7)$$

$$t = 20 \rightarrow t_{escoamento} = 10 \times t = 200s$$

Após realizar as simulações foi analisado que a partir de 150s o escoamento já se estabilizava. Analogamente ao cubo, foram variadas as malhas, conforme a tabela 6.15, em seguida foram analisado os passos de tempo. Entretanto não se sabia qual o valor do Número de Courant ideal para tal simulação, desta forma foi verificada a convergência deste número, ou seja: qual o maior Número de Courant capaz de produzir resultados confiáveis, com menor custo computacional. Foi elaborada a Tabela 6.19 para teste de diferentes números de Courant, variando apenas o passo de tempo para a malha intermediária do submodelo 5.a. Desta forma foi plotado o gráfico da Figura 6.65, que permite analisar que para Courant menor que 20 tem-se curvas bastante coincidentes, ou seja: independente do passo de tempo teremos os mesmos resultados. Com isto se estabeleceu o Courant próximo a 10, sabendo que este depende do tamanho dos elementos da malha.

Tabela 6.19– Convergência do número de Courant- Edifício idealizado.

Passo de Tempo (s)	2,50	1,00	0,50	0,25	0,1	0,05
Courant	100	50	20	10	5	2

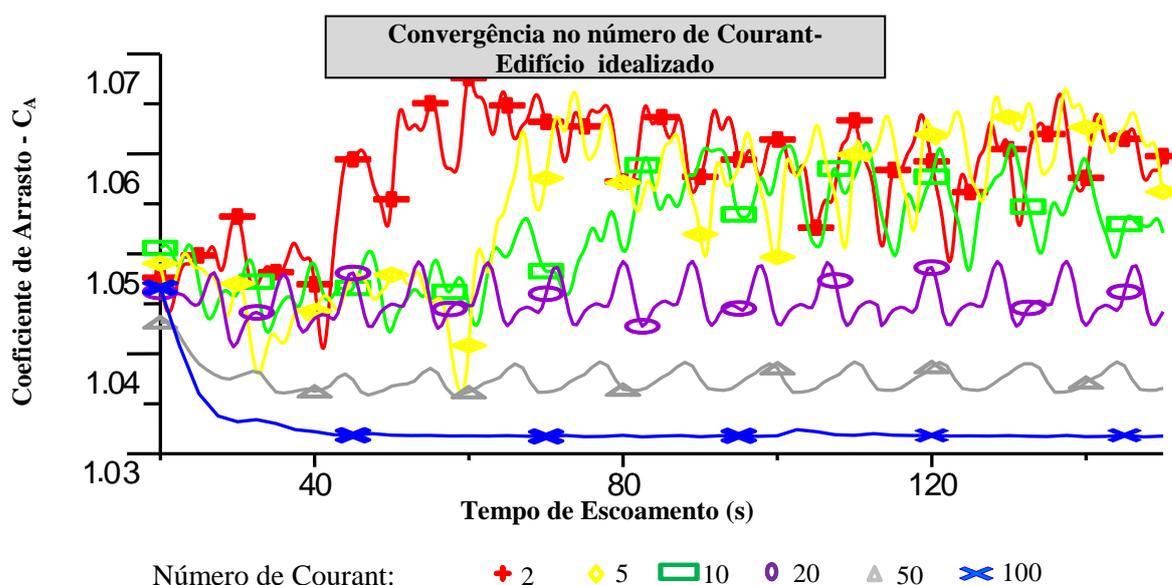


Figura 6.65 – Convergência do número de Courant - Seção quadrada.

De maneira semelhante à simulação no cubo, foi realizado um teste para analisar a influência da quantidade de iterações por passo de tempo, para este teste foi utilizada a malha

intermediária (malha 03) do submodelo 5.a, o resultados são plotados nos gráficos da Figura 6.66. Percebe-se então que não foi verificado um comportamento de curva sobre curva conforme as simulações anteriores, mas percebe-se a partir de 5 iterações (5,10 e 20) os valores estão em torno de um mesma média, conforme já mencionado a partir da Figura 2.14.

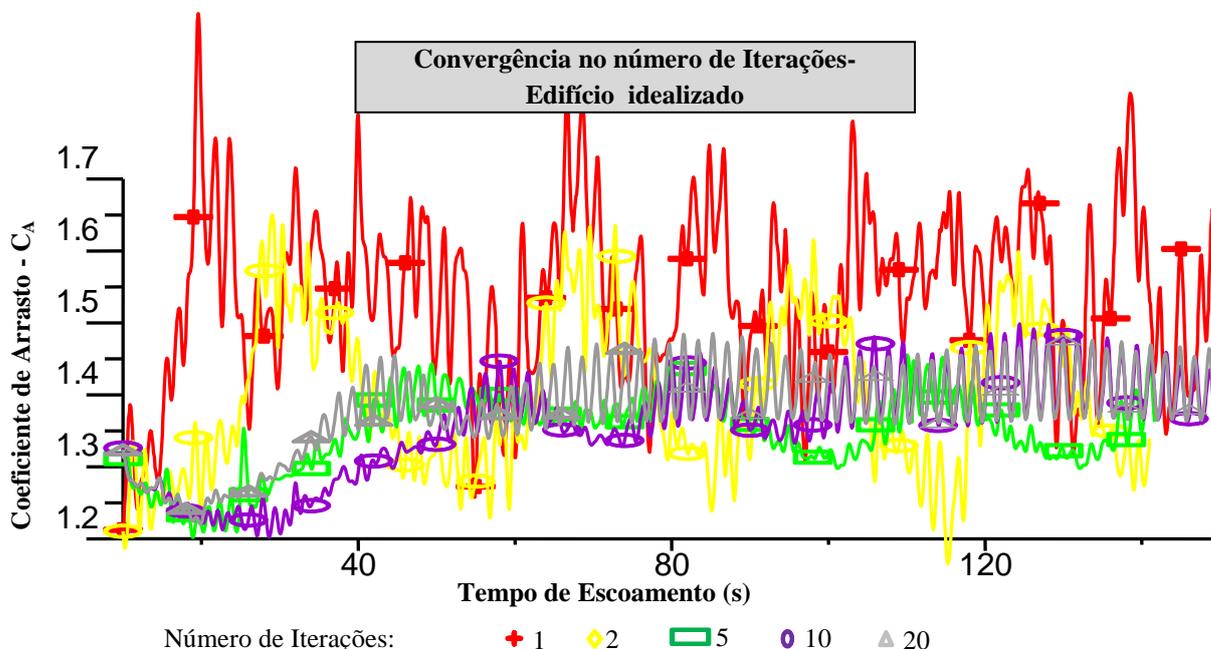


Figura 6.66 – Convergência no número de Iterações- Edifício idealizado.

- Expressões: Foram inseridas no Ansys expressões para cálculo do arrasto, explicitando este valor direto na tela. De acordo com a Equação 2.133, sabendo que A é a área frontal, dado pela altura multiplicada pela da largura (L_1) pela altura (D) da geometria, sabendo que cada submodelo terá sua equação a partir de da Eq. (6.8):

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1,185 \times 30^2 \times D \times L_1}$$

$$C_A = 1,8753 \times 10^{-3} \times \frac{F_D}{D \times L_1} \quad (6.8)$$

- Control Solver: Os critérios de convergência foram seguidos conforme o escoamento bidimensional e simulação do cubo, ou seja, foi adotado um resíduo pequeno para a parada, considerando o valor de 10^{-10} objetivando desta forma que a simulação não pare pelo resíduo e sim para um determinado tempo de escoamento.
- Output Control: Foram impressos apenas os resultados da variável em questão, o arrasto, para cada passo de tempo no regime transiente.

6.3.2.5 Resultados - Edifícios idealizados - escoamento Tridimensional

A partir das informações relatadas até o momento foi possível realizar as simulações em estado transiente para os edifícios do Modelo 05, obtendo valores para o arrasto conforme ilustrado nos gráficos das Figura 6.67 a Figura 6.70. Com base no valor disponível na NBR 6123/1988, visto na tabela 6.14, foi possível plotar o erro da simulação, conforme a Figura 6.71.

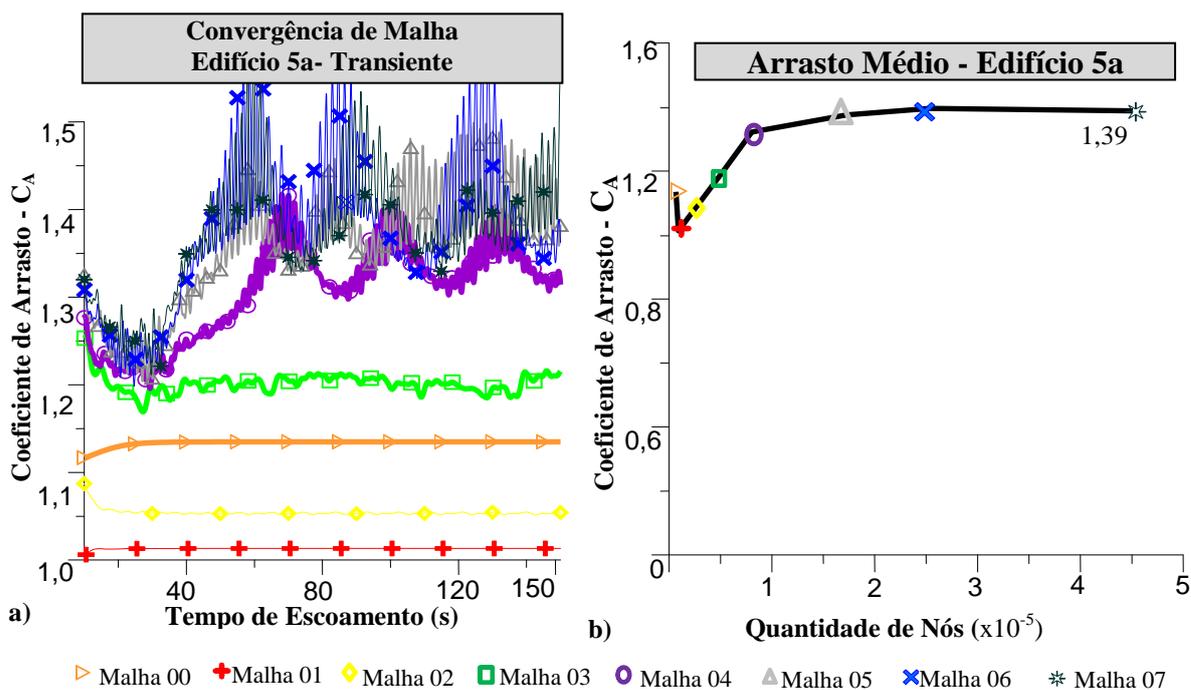


Figura 6.67 – Convergência de Malha - Edifício 30x10x10 (5a) - a) Arrasto instantâneo. b) Arrasto médio.

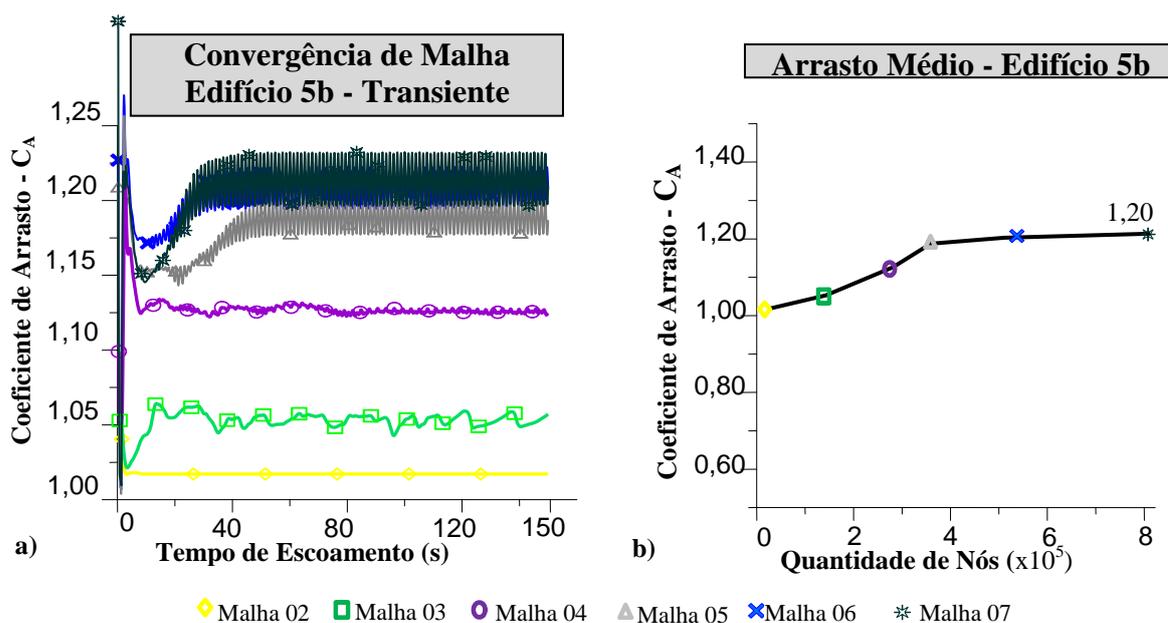


Figura 6.68 – Convergência de Malha - Edifício 40x5x10 (5b) - a) Arrasto instantâneo. b) Arrasto médio

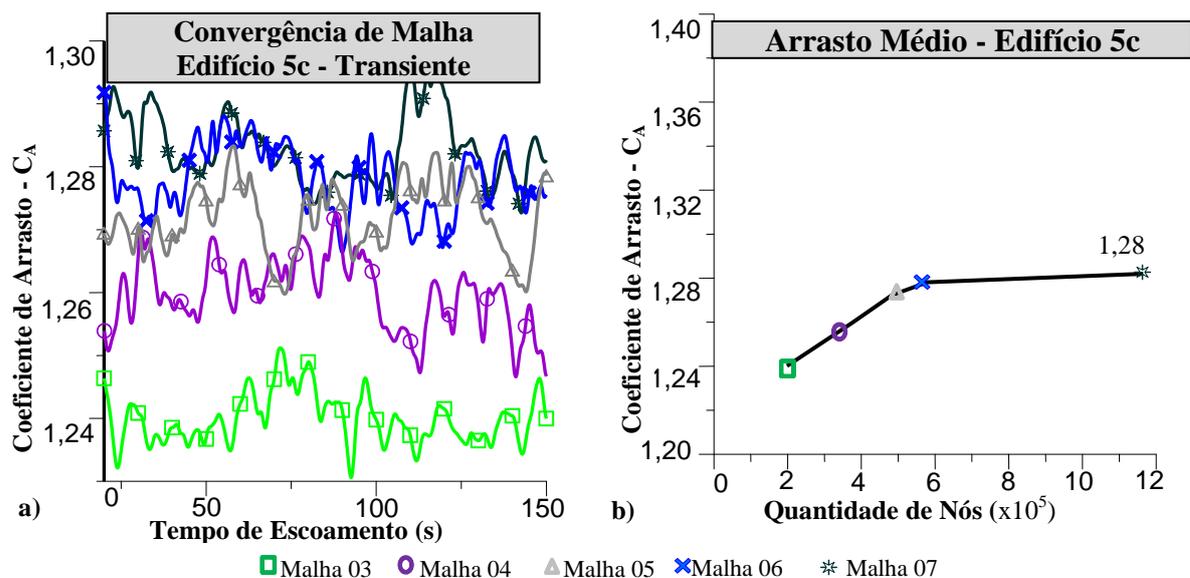


Figura 6.69 – Convergência de Malha - Edifício 40x10x5 (5c) - a) Arrasto instantâneo. b) Arrasto médio.

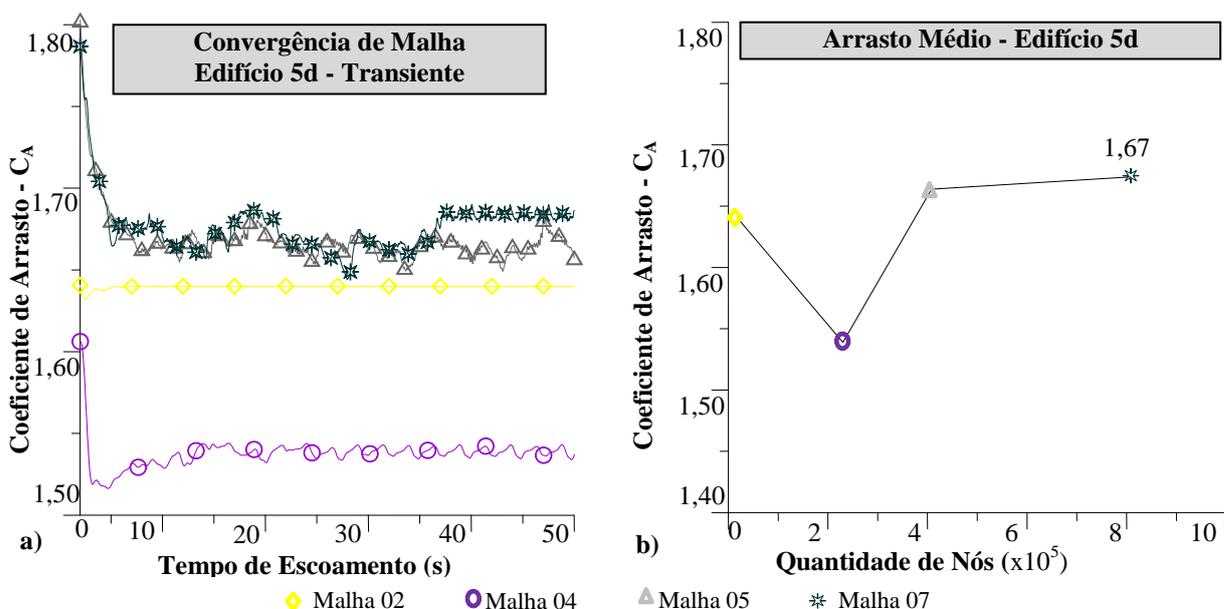


Figura 6.70 – Convergência de Malha - Edifício 130x30x20 (5d): a) Arrasto instantâneo; b) Arrasto médio.

Verifica-se desta forma que as edificações com menores dimensões frontais possuem uma menor perturbação no coeficiente de arrasto global. Destaca-se também uma discrepância na edificação do modelo 5.d, entretanto espera-se em todas as malhas o comportamento do modelo 5.a, onde inicialmente parte de um valor bastante discrepante e em seguida, ao refinar a malha, percebe-se o início da captura dos efeitos da turbulência, através da oscilação da variável (C_A).

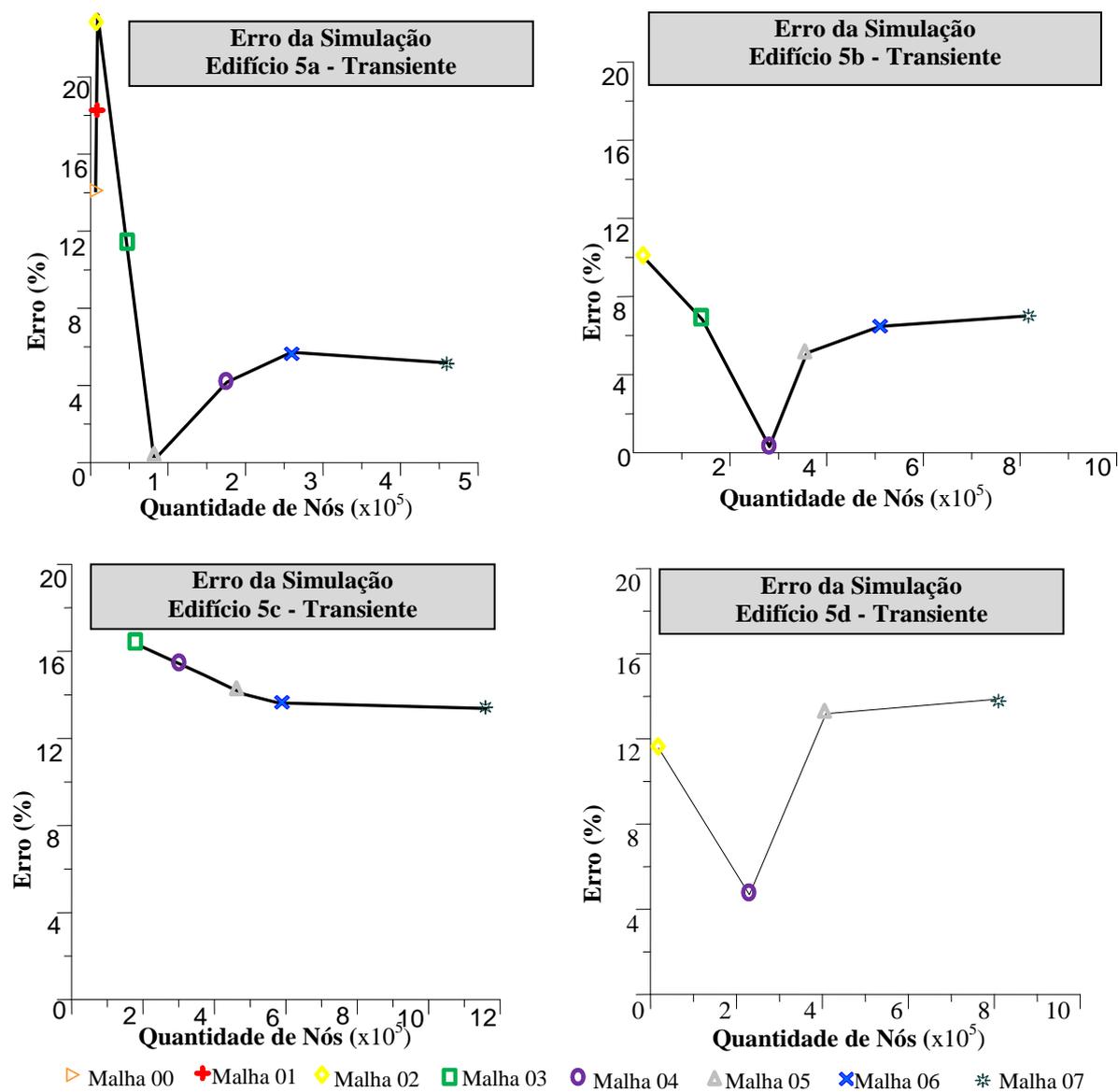


Figura 6.71 – Erro da Simulação: a) Edifício 30x10x10m, b) Edifício 40x05x10m, c) Edifício 40x10x5m, d) Edifício 130x30x20m.

Mesmo as malhas intermediárias não (04 e 05) chegando mais próximo do valor teórico, não se espera que essas representem o comportamento do coeficiente de arrasto, pois a variável ainda não havia convergido. Fato este que só ocorreu nas malhas mais refinadas (06 e 07).

6.3.3 Edifício Real - Modelo 06

Este item trata da simulação de um edifício real, uma edificação com a geometria não regular distinta das apresentadas até o momento. Trata-se de um prédio residencial de 42 pavimentos (130,30m) a ser construído em Caruaru-PE, conforme o Anexo A. Os valores do ensaio de túnel de vento são expressos em N (Newtons) e foram desta forma confrontados com o resultado da simulação computacional, não podendo, desta vez, utilizar apenas o valor global do arrasto e sim o valor da força nodal (por pavimento). No ensaio de túnel de vento foi criado um modelo em escala de 1:200, devido à impossibilidade de reproduzir a estrutura em tamanho real. Imagens do protótipo encontram-se no anexo B.

De maneira semelhante ao Edifício idealizado, foi criado um segundo submodelo, desta vez mais tetraédrico, objetivando mensurar, a partir da NBR6123/1988, o coeficiente de arrasto e forças por nós. Este submodelo foi criado considerando um cenário onde: um projetista de estruturas, ao se deparar com esta geometria e sem ensaios de túnel de vento, não tivesse um referencial e precisasse de informações de esforços solicitantes na estrutura. Desta forma teremos para este capítulo as características conforme a Tabela 6.20. Sabendo que o Modelo 06.b, cuja geometria é aproximada do edifício real, não será simulado computacionalmente, apenas calculado seus esforços do vento de acordo com a norma vigente. Este submodelo, tem suas dimensões tomadas como um retângulo capaz de envolver o edifício real (modelo 6.a).

Tabela 6.20–Característica do edifício real e seu respectivo modelo simplificado

Modelo	h (m)	L ₁ (m)	L ₂ (m)
06.a	Dimensões reais - ANEXO A		
06.b	130,30	18,60	29,80

6.3.3.1 Domínio Computacional - Edifício Real - escoamento Tridimensional

Devido à complexidade da geometria do edifício não foi possível desenhá-la diretamente no "Design Model" do Ansys. Desta forma foi elaborada a partir de um software específico para desenho, neste caso o AUTOCAD da Autodesk Inc. Partiu-se da planta baixa (Anexo A), extrudando-a verticalmente, e em seguida foi criado o domínio computacional, após isto foi exportado em ASIS formato .sat), que é um formato aceito pelo Ansys.

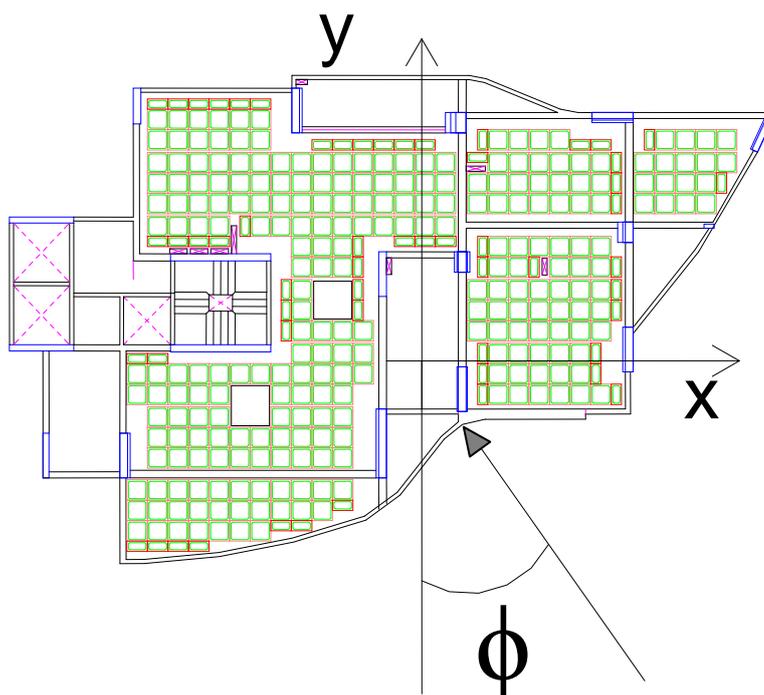


Figura 6.72 – Ângulo de Incidência do vento. Edifício Real.

No ensaio de túnel de vento realiza-se a verificação a cada 5° de incidência do vento na edificação, totalizando 71 possíveis casos ($360 \div 5$, sendo $360^\circ = 0^\circ$). A origem do ângulo de incidência (ϕ) está representada conforme na Figura 6.72. Para evitar as 71 simulações numéricas para validação deste trabalho foi realizado apenas para os ângulos de 0° e 90° .

6.3.3.1.1 Simplificações Adotadas

Foram necessárias algumas simplificações por tratar-se de um modelo aproximado, de simples execução, sabendo que esta decisão infere erros à simulação. Desta forma o desenho do modelo foi realizado desprezando os elementos da cobertura, tais como: caixa d'água, espaços no telhado, heliponto entre outros, finalizando no pavimento 40, na cota 130,30m. Nos pavimentos inferiores também foram adotadas aproximações, onde as áreas de convivências não foram modeladas, ficando o edifício igual em todos os pavimentos, do térreo à cobertura (40 pavimentos tipo).

Análogo ao Modelo 05.d, não foi possível inserir o edifício com suas dimensões reais devido a limitação no tamanho do domínio computacional, utilizando desta forma um modelo em escala reduzida, 1:10, ficando a edificação com 13,03m de altura. Como esta ficará no piso, foram adotadas as dimensões do domínio semelhantes às do modelo 05. Verifica-se na Figura 6.73 o edifício, sabendo que seu domínio será de $8D \times 20D \times 5D$, ou seja $106,4m \times 266m \times 66,5m$. Foi percebido que devido à essas dimensões serem apenas orientações de ordem de grandeza, sem necessidade de exatidão em cumprimento à precisão, foi adotado

um arredondamento, ficando o domínio computacional com as dimensões: 100x250x70m conforme indicado na Figura 6.74b.

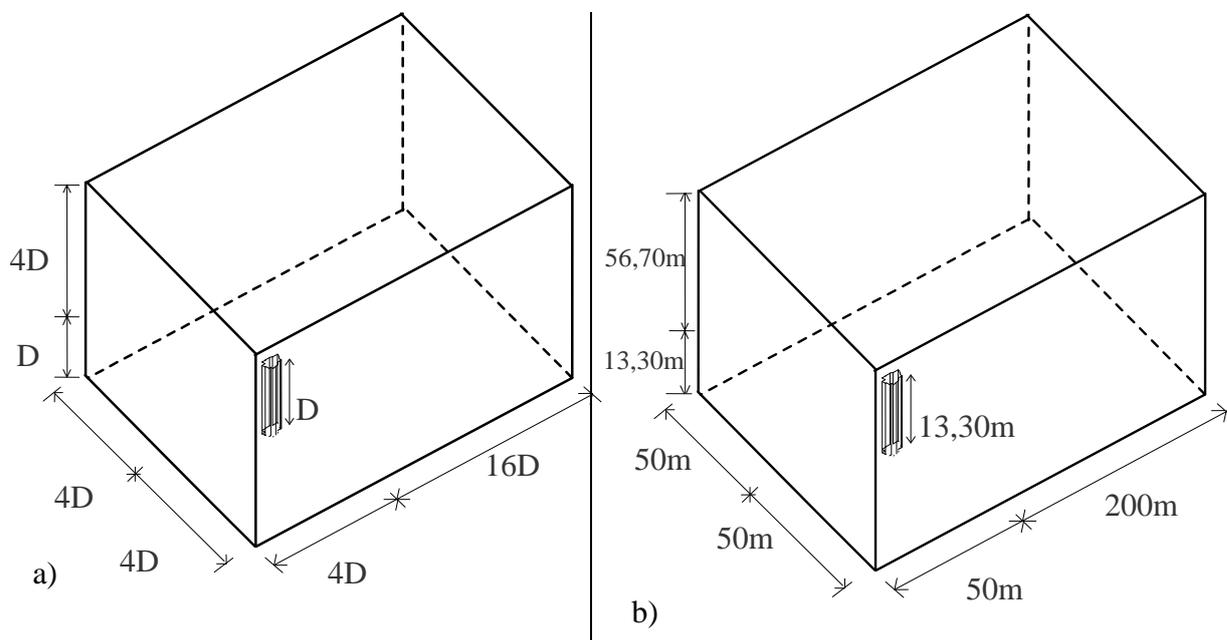


Figura 6.73 – Dimensões do domínio para o Edifício Real. a) genérica, b) Exata (Escala 1:10)

Ao exportar a geometria para a plataforma "*Design Model*" o sólido foi gerado de maneira semelhante aos casos anteriores, constante de um domínio e o objeto de estudo (Edificação) como sendo uma remoção de sólido deste espaço, realizando a mesma operação booleana das demais simulações. Na Figura 6.74a é possível ver a edificação dentro do domínio computacional. Neste as paredes foram omitidas para a visualização do objeto de estudo e as interfaces criadas. Na Figura 6.74b é possível ver os detalhes dos pavimentos criados para a medição da força nodal.

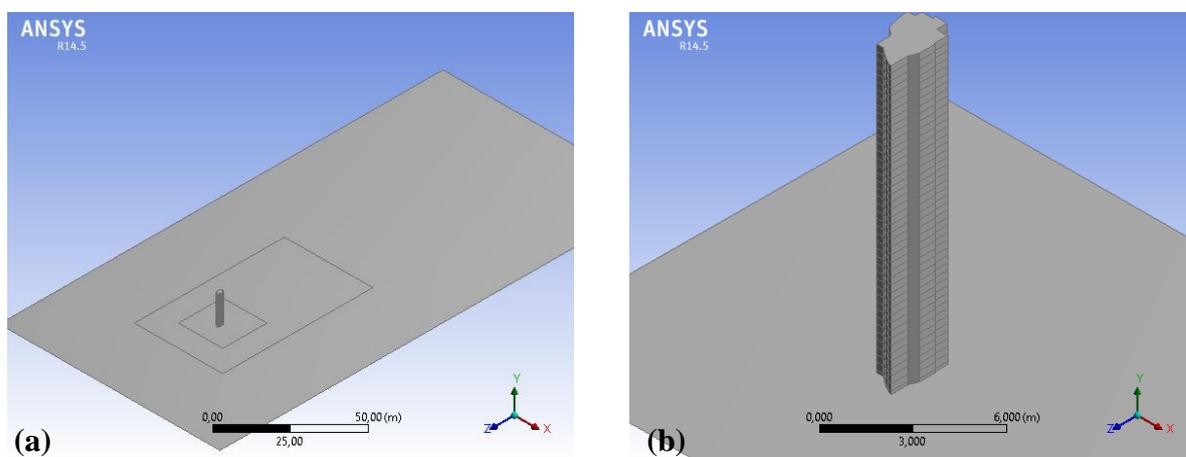


Figura 6.74 –a) Domínio da edificação. b) Detalhe dos pavimentos.

6.3.3.2 Malha Computacional - Edifício Real - Escoamento Tridimensional

Foram criadas interfaces conforme simulações anteriores para refinamento local conforme pode ser visto na Figura 6.75. Para uma boa transição entre malha foi adotado o edifício com o mesmo tamanho de malha da interface 1.

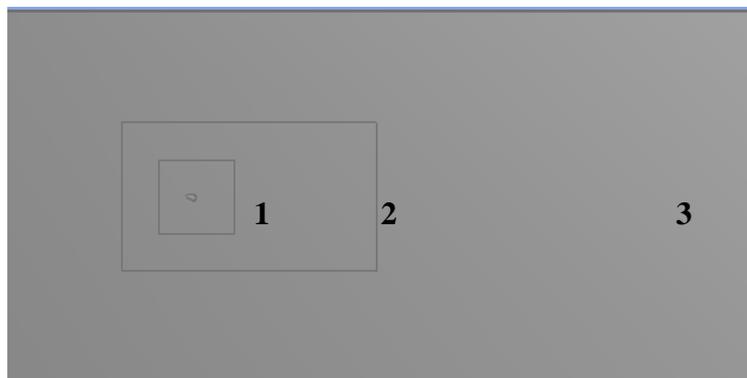


Figura 6.75 – Interfaces do domínio computacional- Edifício Real

Os subdomínios foram discretizados sempre em malhas com a metade do tamanho da malha anterior, conforme a Tabela 6.21, análogo às seções anteriores, tomando apenas 5 malhas para o estudo de convergência. Para o teste de convergência foram utilizadas malhas refinadas e verificada a tendência convergência da grandeza (arrasto ou força). A primeira malha que foi criada (Malha 00) obteve erros devido a seu tamanho, desta forma foi desprezada nas simulações. As malhas são visualizadas na Figura 6.76.

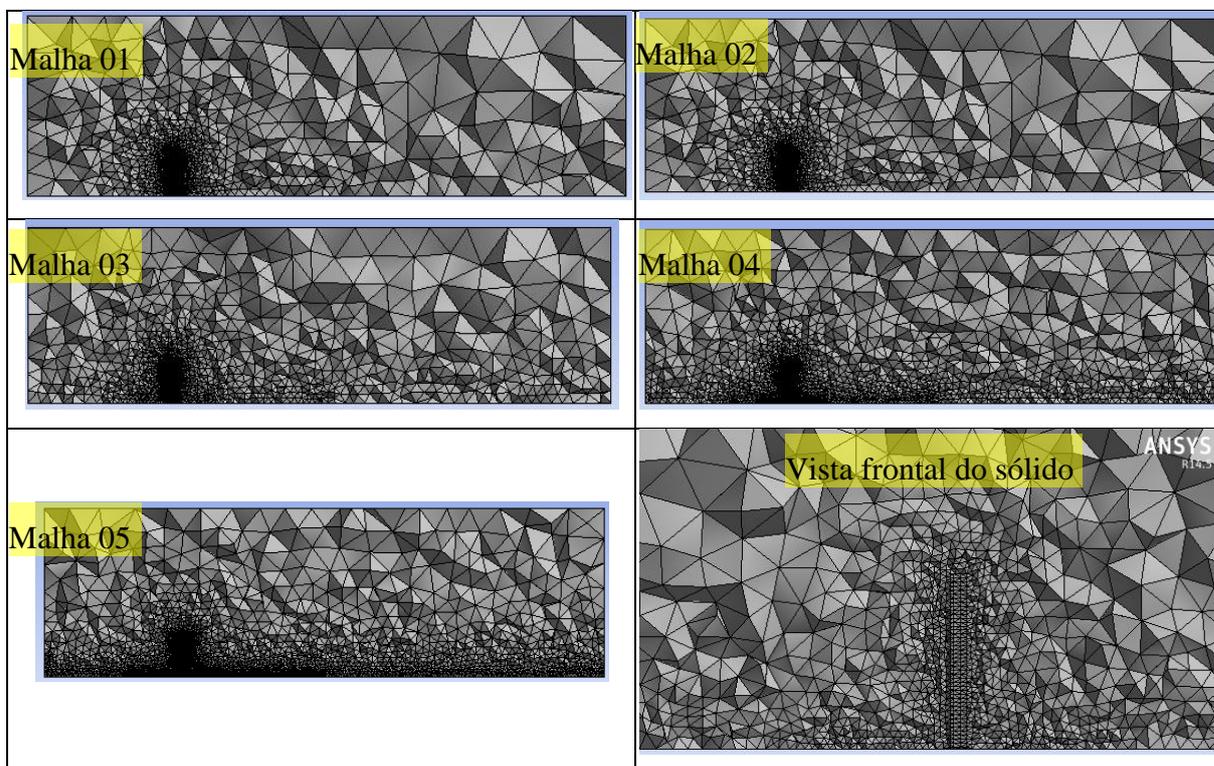


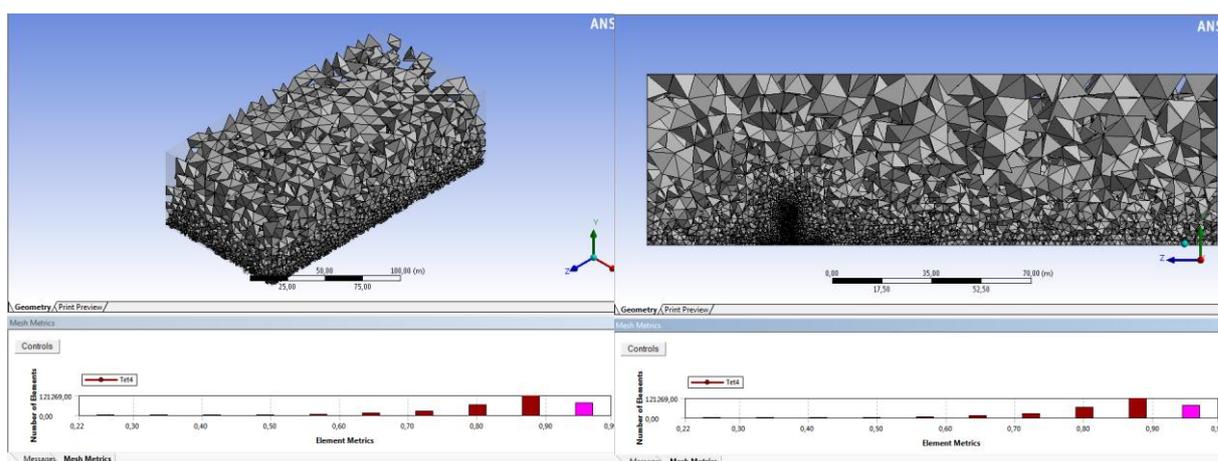
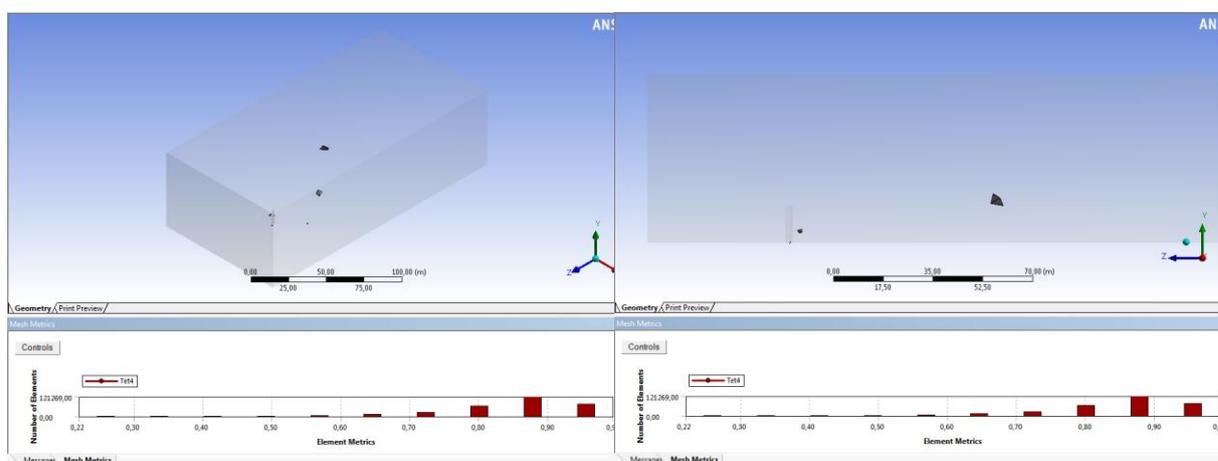
Figura 6.76 – Detalhes das malhas- Edifício Real.

Tabela 6.21– Refinamento de malha - Edifício Real- Tamanho dos elementos em metros (m)

Subdomínio	Malha 00	Malha 01	Malha 02	Malha 03	Malha 04	Malha 05
1	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,15
2	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,30
3	16,0	8,0	4,0	2,0	1,0	0,6
Quantidade de nós						
Edifício Real	23.212	23.212	32.656	56.264	203.282	658.007

6.3.3.3 Qualidade de malha

A análise de qualidade de malha foi realizada conforme os modelos anteriores. Foi objetivado o menor número de elementos deformados, ou seja com baixo Skewness. De maneira semelhante foi objetivado a ortogonalidade mais próxima de 1, ou seja elementos ortogonais entre si. Foi possível verificar a qualidade da malha para todos os refinamentos em questão, entretanto só foi descrito neste trabalho para a malha 03, quais os elementos com menores e maiores deformação conforme a Figura 6.77 e Figura 6.78 respectivamente.

**Figura 6.77 – Elementos com menores deformações (Em geral nas regiões de interesses)- Edifício Real****Figura 6.78 – Elementos com maiores deformações (Afastados das regiões de interesses)- Edifício Real.**

Foi encontrada a deformação mínima de $2,15 \times 10^{-4}$ e a máxima de 0,85. Para a análise completa foi elaborada a Tabela 6.22 com a quantidade de elementos e sua deformação.

Tabela 6.22– Skewness da malha 03- Edifício Real

N° de elementos	30.400	68.400	77.100	61.200	37.900	17.200	5.210	1.220	141	12
Deformação	0,0425	0,127	0,212	0,296	0,381	0,465	0,550	0,634	0,719	0,804

De maneira semelhante, também foi analisada a ortogonalidade da malha, elaborando a Tabela 6.23 para tal verificação. As Figura 6.79 e Figura 6.80 ilustram a situação de maior e menor ortogonalidade respectivamente. O máximo valor da ortogonalidade encontrado foi de 0,99, já o menor valor para tal malha foi 0,22.

Tabela 6.23– Orthogonal Quality da malha 03- Edifício Real

N° de elementos	73.900	121.000	63.700	24.900	9.870	3.700	1.040	232	43	6
Ortogonalidade	0,956	0,879	0,801	0,724	0,646	0,569	0,492	0,414	0,337	0,259

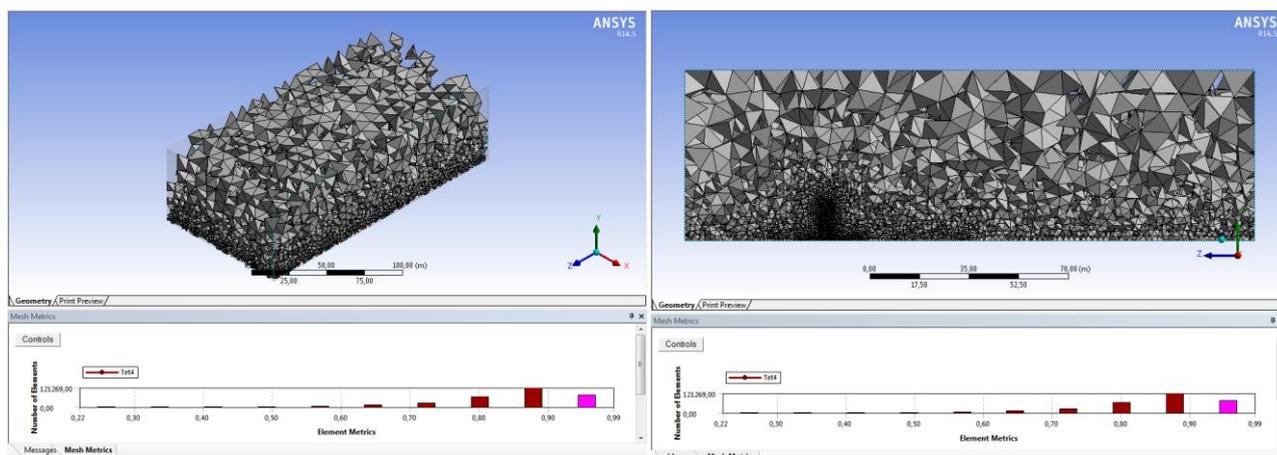


Figura 6.79 – Elementos com maiores ortogonalidade (Na Regiões de interesses)- Edifício Real.

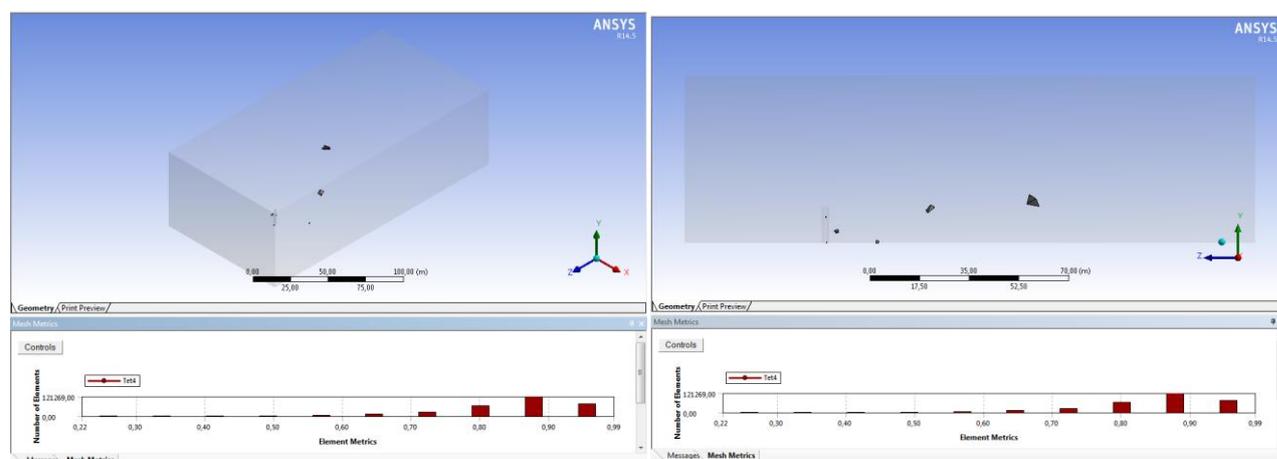


Figura 6.80 – Elementos com menores ortogonalidade (Fora da Regiões de interesses)- Edifício Real.

6.3.3.4 Setup - Edifício Real - escoamento Tridimensional

Nesta etapa foram inseridas as características físicas do escoamento, assim como o item 5.2.3 e também aplicado no Edifício idealizado. Pode ser visto o domínio na Figura 6.81.

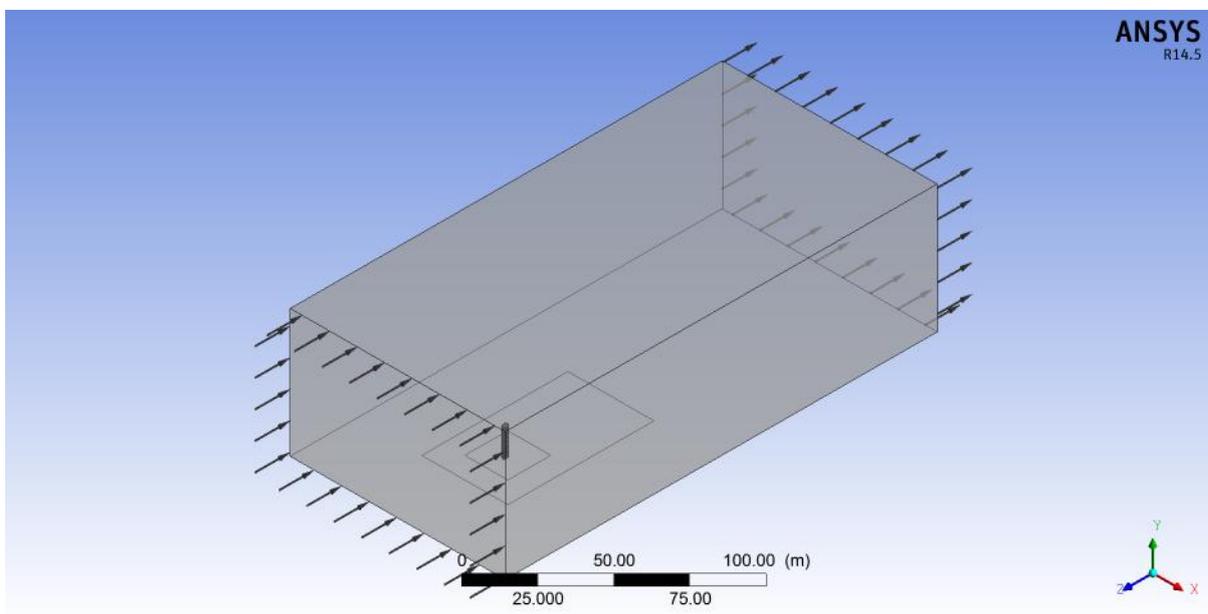


Figura 6.81 – Domínio computacional com as características físicas do fenômeno- Edifício Real

- Assim como o Edifício idealizado, foi utilizado o próprio material do software titulado ar à 25°C.
 - Massa específica = 1,185kg/m³;
 - Viscosidade dinâmica = 1,831 kg/m.s;
 - Pressão atmosférica = 1 atm;
 - Foram desprezados os efeitos térmicos.
- Modelo de turbulência: Adotado o SST (Shear Stress Transport) devido ao estudo de convergência realizado para objetos tridimensionais (cubo e Edifício idealizado)
- As características físicas foram adotadas conforme já mencionadas na Seção 5.
 - Entrada: Seleccionada a face de entrada, e considerada a velocidade na entrada como 29m/s, conforme o valor do ensaio de túnel de vento.
 - Saída: Considerado o mesmo valor do item 6.2.2.3, que foi 0 Pa.
 - Paredes: Considerado livre escoamento (Free Slip Wall) em suas paredes laterais e superior (Teto) e considerado a condição de não deslizamento (No Slip Wall) na parede inferior (Piso) e no edifício.

Quanto às características do piso, foi necessário acrescentar uma rugosidade ao mesmo, que até o momento não era considerada. Ou seja, na opção de piso, na aba "Wall Roughness", deixava-se o default do programa, a opção "Smooth Wall". Para manter as mesmas características do túnel de vento, foram inseridas as características conforme aponta o protótipo, gerado no próprio túnel de vento no ANEXO B, desta forma foi inserida na aba "Rough Wall" o comprimento de 0,32m (0,032m em escala). Para analisar a influência da rugosidade foi realizado um teste para uma malha intermediária (Malha 03) e verificado o arrasto e a força em diversos pavimentos conforme a Tabela 6.24. Este teste foi necessário para verificar se o escoamento era independente da rugosidade, ou se a mesma tem pequena influência nos parâmetros aerodinâmicos.

Tabela 6.24– Influência da Rugosidade- Edifício Real

Local da Força	Pav 01	Pav 05	Pav 10	Pav 15	Pav 20	Pav 25	Pav 30	Pav 35	Pav 40	Arrasto Global
Erro (%)	3,96	1,39	0,20	0,49	0,40	0,02	0,07	0,00	0,63	0,56

Desta forma analisa-se um maior erro nos pavimentos inferiores e superiores. Entre o 5° e o 35° pavimento, foi verificado um erro pequeno, menor que 0,5%, entretanto verificou-se um erro grande (3,96%) para o pavimento inferior. Desta forma, observa-se que a rugosidade no piso influencia diretamente os pavimentos inferiores. Logo foi adotado 0,32m no piso de todas as simulações deste modelo.

- Características temporais: Assim como o Edifício idealizado, poupando custo computacional, e por ter sido analisado a necessidade de simulação em estado transiente, não foram realizadas simulações em estacionário. Para a simulação em transiente foram adotadas as características indicadas no capítulo 5. Foram variadas as malhas conforme a Tabela 6.21, Para o Número de Courrant foi adotado o critério de convergência conforme o Edifício idealizado, ou seja: consideramos para tal simulação um valor entre 10 e 20. Para a quantidade de iterações, foi considerado o critério de convergência adotado no Edifício idealizado, ou seja: 10 iterações por passo de tempo.
- Expressões: Como se objetivava a informação da força, foi apenas solicitado a força em torno de cada um dos pavimentos. Também foram inseridas no Ansys expressões para cálculo do arrasto, explicitando este valor direto na tela. De acordo com a equação 2.127, sabendo que A é a área frontal, dado pela altura multiplicada pela largura (L_1) da Figura, teremos a Equação 6.9, para cada ângulo de incidência haverá uma largura.

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

$$C_A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1,185 \times 29^2 \times L_1 \times 13,03}$$

$$C_A = \frac{1,54018 \times 10^{-4} \times F_D}{L_1} \quad (6.9)$$

- Control Solver: Os critérios de convergência foram seguidos conforme os demais escoamentos, ou seja: adotado um resíduo pequeno para a parada, considerando o valor de 10^{-10} objetivando desta forma que a simulação não pare pelo resíduo e sim para um determinado tempo de escoamento, pois trata-se de estado transiente.
- Output Control: Foram impressos apenas os resultados da variável em questão, o arrasto, para cada passo de tempo no regime transiente.

6.3.3.5 Resultados - Edifício Real - Escoamento Tridimensional

A partir das informações relatadas até o momento foi possível realizar as simulações em estado transiente, obtendo valores para a força nodal e arrasto global conforme ilustrado nos gráficos da Figura 6.82.

Foi coletada a força em cada pavimento, entretanto será demonstrado apenas um pavimento em cada ângulo de incidência do vento, sabendo que os demais obtiveram convergência da mesma maneira.

Percebe-se que análogo ao edifício idealizado, nas malhas grosseiras a força em torno do pavimento as características do fenômeno cíclico, tendo seu valor constante em todo o passo de tempo. A força em torno da edificação pode ser relacionada ao arrasto através da Eq. (2.133), desta forma o comportamento da variável força deverá ser o mesmo do arrasto.

Ao realizar o refinamento de malha, efeitos são capturados e oscilações são percebidas mostrando as perturbações esperadas para tal fenômeno.

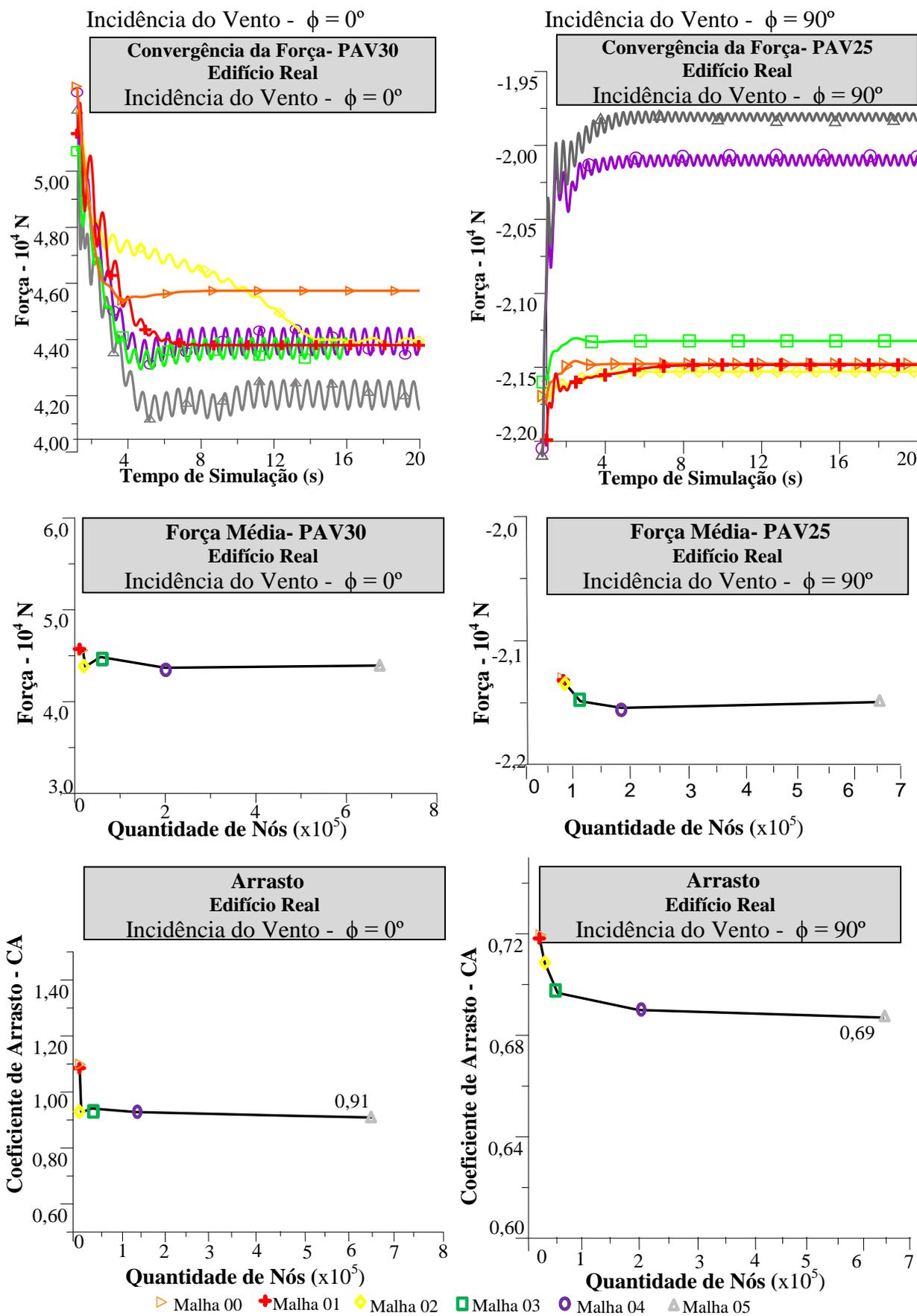


Figura 6.82 – Convergência de Malha - Edifício Real - Incidência do vento $\phi = 0^\circ$ e $\phi = 90^\circ$

6.3.3.6 Cálculo segundo a NBR 6123/1988.

Admite-se um cenário onde um responsável pelo projeto estrutural teve acesso à geometria da edificação, ANEXO A, e estava impossibilitado de realizar ensaios em túnel de vento, ou simulações computacionais. Assim para uma estimativa inicial foi empregado um modelo simplificado para o edifício, que aproximasse a planta a um retângulo conforme a Figura 6.83. As maiores dimensões da seção em planta são: 29,83m, em x, 18,60m, em y, e 130,30m em z (altura da edificação). Entretanto para simplificar, foi utilizado um retângulo de 30x20m, com altura de 130m. Destaca-se que esta simplificação foi bastante grosseira, uma vez que na norma vigente não há Figuras com tal geometria da edificação, tornando-a mais próxima a um retângulo. Foi utilizado dois ângulos (ϕ) de incidência do vento, 0° e 90° . Ressalta-se que o ângulo de 0° já foi simulado para a mesma geometria (retangular) no modelo 5.d, onde a edificação tinha 130x30x20m.

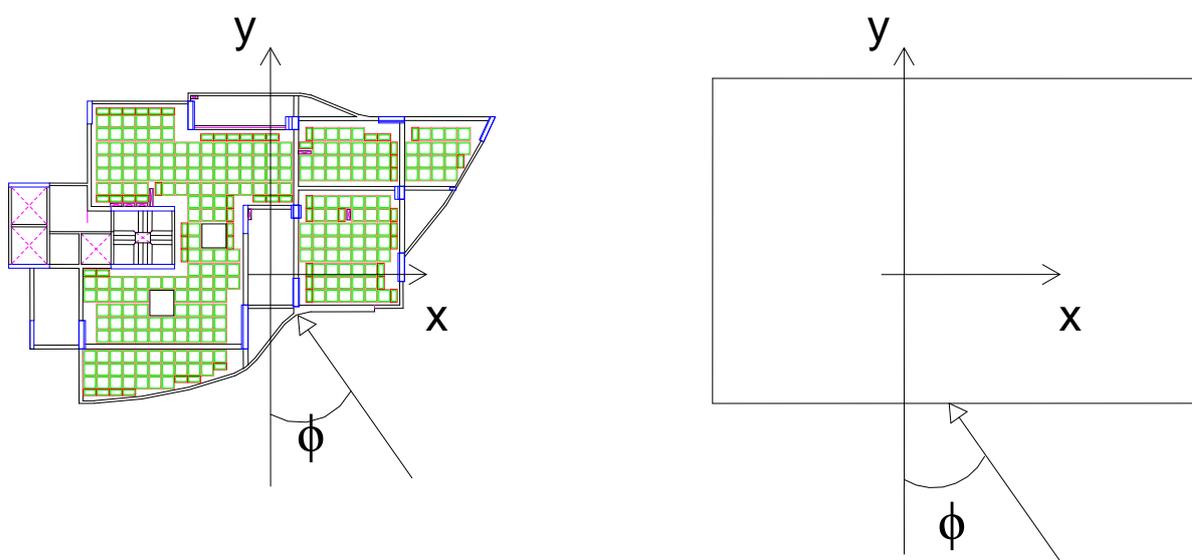


Figura 6.83 – Simplificação do Modelo (Edifício Real).

Para dimensionar a força nodal, foi necessário seguir os passos conforme a NBR6123/1988, que serão relatados a seguir.

1. Para o dimensionamento da força (eq. 4.4) foi necessário inicialmente conhecer os parâmetros S_1 , S_2 e S_3 . Esses parâmetros foram obtidos a partir da norma.

$S_1 = 1,0$. Terreno Plano ou fracamente acidentado

$S_2 =$ Função da altura(z). Calculado a partir da eq 4.3, sabendo que o valor de b, Fr e p são respectivamente 0,86 ; 0,69 ; 0,185, obtidos a partir da Tabela 21 do anexo A da NBR 6123/1988, considerando o intervalo de tempo para a obtenção da velocidade média como 600s conforme o ensaio de túnel de vento.

$S_3 = 1,0$. Obtido a partir da Tabela 23 da norma do vento para uma probabilidade de 0,63 e vida útil de 50 anos.

2. Cálculo da velocidade característica por pavimento a partir da Eq. 4.2.
3. Pressão dinâmica calculada a partir da Eq. 4.1.
4. Área de atuação será considerada para uma altura de 3,00m (entre pavimentos) e a largura será de 30m para o vento incidente a 0° e 20m para 90° .
5. O coeficiente de arrasto C_A foi obtido da Figura 4 (Coeficiente de arrasto para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência) da NBR 6123/1988. De acordo com a norma: C_A de 1,42 para o vento incidente a 0° e 1,20 a 90° .
6. Cálculo da força nodal a partir da Eq. 4.4.

De posse dos valores informados, foi possível elaborar a Tabela 6.25 com forças por pavimento para o vento incidente a 0° e 90° .

6.3.3.7 Considerações sobre o Ensaio em túnel de vento.

O ensaio em túnel de vento foi realizado através do Relatório técnico 138 649-205 em 20 de maio de 2014 pelo laboratório de Aerodinâmica Industrial e Engenharia do Vento do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), através do Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos CTMETRO. Este instituto possui um túnel de vento de camada limite atmosférica que permite realizar escoamento próximos à superfícies. Segundo Nader (2014) a seção do túnel de vento tem 3 m de largura, 2 m de altura e 28m de comprimento, que permite ensaiar modelos com até 1,40m de altura. Desta forma, segundo o autor, permite ensaiar protótipos com escala de 1:100 à 1:1000. Neste ensaio utilizou-se 285 pontos de tomada de pressão externas. Realizando medições a cada 5° de incidência do vento. A partir destas medições aplica-se em um modelo matemático para obter os modos e obter deslocamentos e acelerações para diferentes pontos ao longo da altura da edificações.

Tabela 6.25– Força nodal para o vento incidente a 0° e 90° - Método simplificado.

Pavimento	Altura-z (m)	S2	Velocidade Vk (m/s)	Pressão dinâmica	Vento a 0°	Vento a 90°
					Força por Pav. (N)	Força por Pav. (N)
Térreo	1,3	0,76	17,69	191,805	11670,5	6574,9
Vazado 1	4,3	0,86	22,07	298,595	18168,2	10235,6
Vazado 2	7,3	0,91	24,34	363,186	22098,3	12449,7
Mezanino	10,3	0,94	25,94	412,524	25100,3	14141,0
1	13,3	0,97	27,20	453,445	27590,1	15543,7
2	16,3	0,99	28,24	488,888	29746,7	16758,7
3	19,3	1,01	29,14	520,423	31665,4	17839,7
4	22,3	1,02	29,93	549,000	33404,2	18819,3
5	25,3	1,04	30,63	575,247	35001,2	19719,0
6	28,3	1,05	31,28	599,599	36482,9	20553,8
7	31,3	1,06	31,86	622,374	37868,7	21334,5
8	34,3	1,07	32,41	643,811	39173,1	22069,3
9	37,3	1,08	32,91	664,098	40407,4	22764,7
10	40,3	1,09	33,39	683,381	41580,7	23425,7
11	43,3	1,10	33,84	701,779	42700,2	24056,4
12	46,3	1,10	34,26	719,391	43771,7	24660,1
13	49,3	1,11	34,66	736,297	44800,4	25239,7
14	52,3	1,12	35,04	752,568	45790,4	25797,4
15	55,3	1,12	35,40	768,260	46745,2	26335,3
16	58,3	1,13	35,75	783,425	47667,9	26855,2
17	61,3	1,14	36,08	798,105	48561,2	27358,4
18	64,3	1,14	36,40	812,340	49427,3	27846,4
19	67,3	1,15	36,71	826,162	50268,3	28320,2
20	70,3	1,15	37,01	839,602	51086,1	28780,9
21	73,3	1,16	37,30	852,684	51882,1	29229,3
22	76,3	1,16	37,57	865,434	52657,8	29666,4
23	79,3	1,17	37,84	877,872	53414,6	30092,7
24	82,3	1,17	38,10	890,016	54153,5	30509,0
25	85,3	1,18	38,36	901,885	54875,7	30915,9
26	88,3	1,18	38,60	913,493	55582,0	31313,8
27	91,3	1,19	38,84	924,856	56273,4	31703,3
28	94,3	1,19	39,08	935,986	56950,6	32084,8
29	97,3	1,19	39,30	946,895	57614,4	32458,8
30	100,3	1,20	39,52	957,594	58265,3	32825,5
31	103,3	1,20	39,74	968,093	58904,2	33185,4
32	106,3	1,20	39,95	978,402	59531,4	33538,8
33	109,3	1,21	40,16	988,529	60147,6	33886,0
34	112,3	1,21	40,36	998,482	60753,2	34227,2
35	115,3	1,22	40,56	1008,270	61348,8	34562,7
36	118,3	1,22	40,75	1017,898	61934,6	34892,7
37	121,3	1,22	40,94	1027,374	62511,1	35217,5
38	124,3	1,22	41,12	1036,703	63078,8	35537,3
39	127,3	1,23	41,31	1045,891	63637,8	35852,3
40	130,3	1,23	41,48	1054,944	64188,7	36162,6

6.3.3.8 Resultados comparativos - Edifício Real - escoamento Tridimensional

Foi elaborada a tabela 6.26 para o vento incidente a 0° e a tabela 6.27 para o vento a 90°. Foi calculado o erro absoluto considerando o túnel de vento como valor de referência.

Tabela 6.26– Tabela comparativa- Força nodal para o vento incidente a 0° .

Pavimento	Altura-z (m)	Força (N)			Erro (%)	
		NBR6123/ 1988	Túnel de Vento	Simulação computacional	NBR 6123/1988 *	Simulação computacional
1	13,3	27590,1	32678,0	34396,0	15,6	5,3
2	16,3	29746,7	33927,6	34965,5	12,3	3,1
3	19,3	31665,4	33179,8	35251,8	4,6	6,2
4	22,3	33404,2	32258,5	35511,7	3,6	10,1
5	25,3	35001,2	32677,9	35806,2	7,1	9,6
6	28,3	36482,9	32349,2	35713,6	12,8	10,4
7	31,3	37868,7	31847,3	35816,6	18,9	12,5
8	34,3	39173,1	30570,4	35794,9	28,1	17,1
9	37,3	40407,4	31148,2	35746,6	29,7	14,8
10	40,3	41580,7	32068,4	35623,0	29,7	11,1
11	43,3	42700,2	31769,1	35953,1	34,4	13,1
12	46,3	43771,7	32167,3	35817,4	36,1	11,4
13	49,3	44800,4	32660,9	35957,9	37,2	10,1
14	52,3	45790,4	32887,2	36113,9	39,2	9,8
15	55,3	46745,2	33392,6	35991,9	40,0	7,8
16	58,3	47667,9	34165,7	36030,8	39,5	5,5
17	61,3	48561,2	34402,9	35917,6	41,2	4,4
18	64,3	49427,3	34839,2	35853,2	41,9	2,9
19	67,3	50268,3	35901,3	35760,5	40,0	0,4
20	70,3	51086,1	36094,2	35829,2	41,5	0,7
21	73,3	51882,1	36334,1	36025,3	42,8	0,9
22	76,3	52657,8	37390,0	36070,5	40,8	3,5
23	79,3	53414,6	37642,5	36252,9	41,9	3,7
24	82,3	54153,5	37736,2	36571,2	43,5	3,1
25	85,3	54875,7	38453,7	37153,3	42,7	3,4
26	88,3	55582,0	38730,3	37715,5	43,5	2,6
27	91,3	56273,4	38999,8	38604,0	44,3	1,0
28	94,3	56950,6	40014,1	39582,6	42,3	1,1
29	97,3	57614,4	40354,2	40770,9	42,8	1,0
30	100,3	58265,3	40438,2	42120,0	44,1	4,2
31	103,3	58904,2	41894,0	43444,9	40,6	3,7
32	106,3	59531,4	42359,6	44842,5	40,5	5,7
33	109,3	60147,6	42555,2	46099,2	41,3	8,3
34	112,3	60753,2	43462,6	47072,3	39,8	8,3
35	115,3	61348,8	43768,3	47874,4	40,2	9,4
36	118,3	61934,6	44063,9	48214,2	40,6	9,4
37	121,3	62511,1	44552,7	48580,9	40,3	9,1
38	124,3	63078,8	44868,9	47900,1	40,6	6,8
39	127,3	63637,8	44676,7	45863,7	42,4	2,7
40	130,3	64188,7	103868,1	30355,5	38,2	70,8

* Método simplificado com retângulo envolvente

Tabela 6.27– Tabela comparativa- Força nodal para o vento incidente a 90° .

Pavimento	Altura-z (m)	Força (N)			Erro (%)	
		NBR6123/ 1988	Túnel de Vento	Simulação computacional	NBR 6123/ 1988 *	Simulação computacional
1	13,3	15543,7	11659,9	17697,8	33,3	51,8
2	16,3	16758,7	11659,9	17764,6	43,7	52,4
3	19,3	17839,7	13120,3	17701,6	36,0	34,9
4	22,3	18819,3	14398,0	17557,8	30,7	21,9
5	25,3	19719,0	14398,0	17213,4	37,0	19,6
6	28,3	20553,8	14558,1	17119,3	41,2	17,6
7	31,3	21334,5	14741,1	17105,5	44,7	16,0
8	34,3	22069,3	14741,1	16648,8	49,7	12,9
9	37,3	22764,7	15202,7	16685,6	49,7	9,8
10	40,3	23425,7	15895,1	16682,9	47,4	5,0
11	43,3	24056,4	15895,1	16398,6	51,3	3,2
12	46,3	24660,1	16087,6	16172,2	53,3	0,5
13	49,3	25239,7	16472,7	16348,8	53,2	0,8
14	52,3	25797,4	16472,7	16074,2	56,6	2,4
15	55,3	26335,3	16632,4	16083,3	58,3	3,3
16	58,3	26855,2	17071,6	16180,2	57,3	5,2
17	61,3	27358,4	17071,6	16393,5	60,3	4,0
18	64,3	27846,4	17221,3	16937,2	61,7	1,6
19	67,3	28320,2	17820,2	17060,3	58,9	4,3
20	70,3	28780,9	17820,2	17268,8	61,5	3,1
21	73,3	29229,3	17932,0	16740,1	63,0	6,6
22	76,3	29666,4	18658,6	16517,6	59,0	11,5
23	79,3	30092,7	18658,6	16787,5	61,3	10,0
24	82,3	30509,0	18708,3	16903,9	63,1	9,6
25	85,3	30915,9	19404,3	17023,5	59,3	12,3
26	88,3	31313,8	19404,3	17621,5	61,4	9,2
27	91,3	31703,3	19404,3	18332,5	63,4	5,5
28	94,3	32084,8	19750,7	18338,1	62,4	7,2
29	97,3	32458,8	19750,7	18059,1	64,3	8,6
30	100,3	32825,5	19750,7	18872,8	66,2	4,4
31	103,3	33185,4	20125,2	17762,0	64,9	11,7
32	106,3	33538,8	20151,9	18196,2	66,4	9,7
33	109,3	33886,0	20151,9	17948,9	68,2	10,9
34	112,3	34227,2	20835,4	17543,8	64,3	15,8
35	115,3	34562,7	20940,5	17405,1	65,1	16,9
36	118,3	34892,7	20940,5	17216,1	66,6	17,8
37	121,3	35217,5	21394,8	17041,3	64,6	20,3
38	124,3	35537,3	21507,9	16739,1	65,2	22,2
39	127,3	35852,3	21507,9	14715,0	66,7	31,6
40	130,3	36162,6	10484,2	8781,6	244,9	16,2

* Método simplificado com retângulo envolvente

A partir das Tabelas 6.26 e 6.27 foi possível compilar os valores obtendo a força global para a edificação conforme a Tabela 6.28. Percebeu-se que os maiores erros estão nos pavimentos superiores e inferiores devido ao não tratamento da geometria real nestes pavimentos. Desta forma, na elaboração da Tabela 6.28 estes pavimentos foram descartados.

Tabela 6.28– Tabela comparativa- Força total para o vento incidente a 0° e 90° .

Incidência do Vento	Força (N)			Erro (%)	
	NBR6123/1988	Túnel de Vento	Simulação computacional	NBR 6123/1988	Simulação computacional
0°	1899666,2	1406602,7	1480213,8	35,1	5,2
90°	1070234,5	676258,2	649160,7	58,3	4,2
Desprezando o primeiro e último pavimento.					
0°	1991445,0	1543148,8	1544965,3	29,1	0,1
90°	1121940,9	698402,3	675640,1	60,6	3,4

6.3.3.9 Tempo de simulação

Verifica-se na Figura 6.84 o tempo de simulação para as duas geometrias, chegando a aproximadamente 72h nas malhas mais refinadas. Entretanto há a possibilidade de reduzir este valor, realizando simulações com 5 iterações conforme já verificado na Figura 6.53. Verifica-se na Figura 6.84 que as malhas iniciais requisitaram um tempo maior que a malha 02, isto devido a se ter adotado um menor Número de Courant para estas malhas iniciais, pois devido ao baixo tempo computacional, era possível adotar este critério. A partir da malha 02, foi mantido o Courant mais próximo a 10.

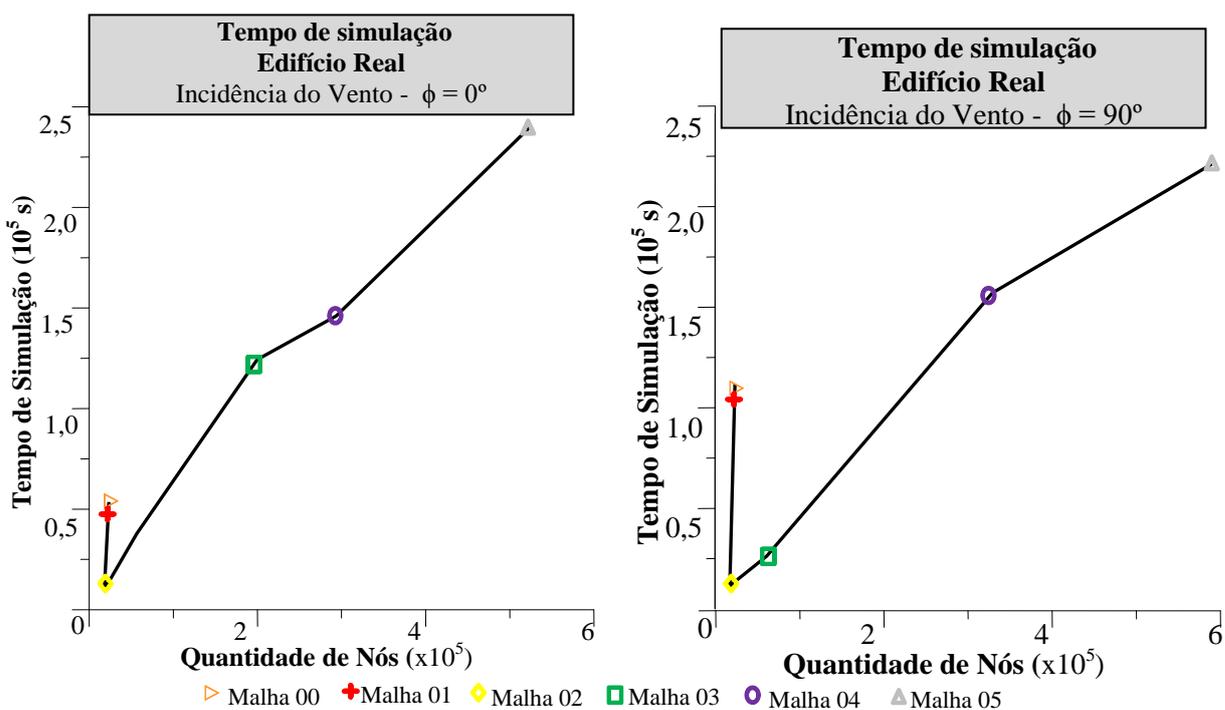


Figura 6.84 – Tempo de simulação (Edifício Real) Vento a 0° e 90°

6.3.4 Resumo das simulações - Escoamento tridimensional

A partir das simulações foi elaborada uma tabela resumo para facilitar a consulta do trabalho. Permitindo a consulta direta e objetiva. Desta forma a Tabela 6.29 indica o resumo para o escoamento tridimensional.

Tabela 6.29– Resumo das simulações- Escoamento Tridimensional

Modelo	V-RMS	Convergência	Coeficiente de Arrasto (C_A)			
			Simulação		Çengel e Cimbala	NBR6123
			Médio	Máximo		
Estado Transiente						
04-Cubo	5×10^{-5}	SIM	1,02	1,02	1,05	
05a-Edifício idealizado 30x10x10	8×10^{-7}	SIM	1,39	1,60		1,32
05b-Edifício idealizado 40x5x10	2×10^{-6}	SIM	1,20	1,22		1,13
05c-Edifício idealizado 40x10x5	4×10^{-6}	SIM	1,28	1,30		1,48
05d-Edifício idealizado 130x30x20	2×10^{-6}	SIM	1,67	1,84		1,47
06-Edifício Real Vento a 0°	2×10^{-5}	SIM	0,91	0,96		1,42
06-Edifício Real Vento a 90°	1×10^{-5}	SIM	0,69	0,69		1,20

6.3.5 Streamlines das simulações - Escoamento tridimensional

Na interface "Results" foram coletadas as "streamlines" da simulação, apenas em caráter qualitativo, para a malha intermediária (malha 03). Como o escoamento foi em regime transiente, só foi coletado para a última evolução no tempo. As linhas foram para a variável velocidade. Desta forma pode ser visto o escoamento conforme as Figura 6.85 aFigura 6.89. Nestas figuras é possível verificar as linhas do escoamento tridimensional e também em uma seção na cota média da edificação (D/2).

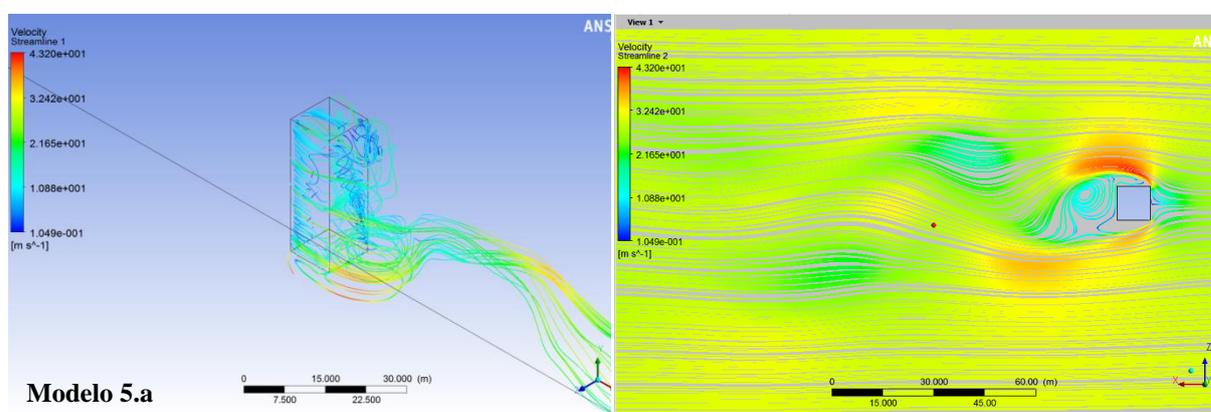


Figura 6.85 – Streamlines- Escoamento em torno dos Edifícios Idealizados (5.a).

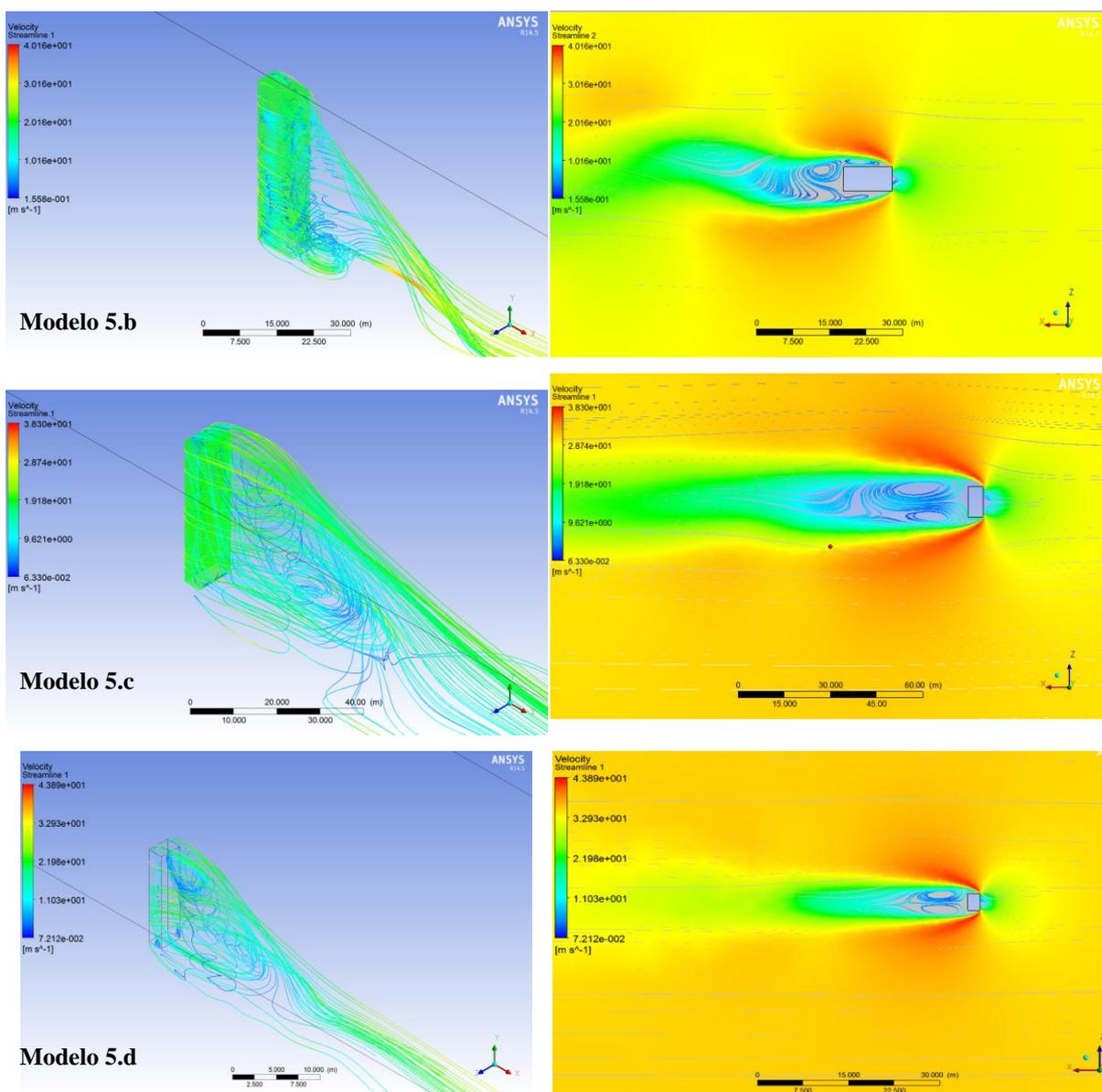


Figura 6.86 – Streamlines- Escoamento em torno dos Edifícios Idealizados 5b a 5d.

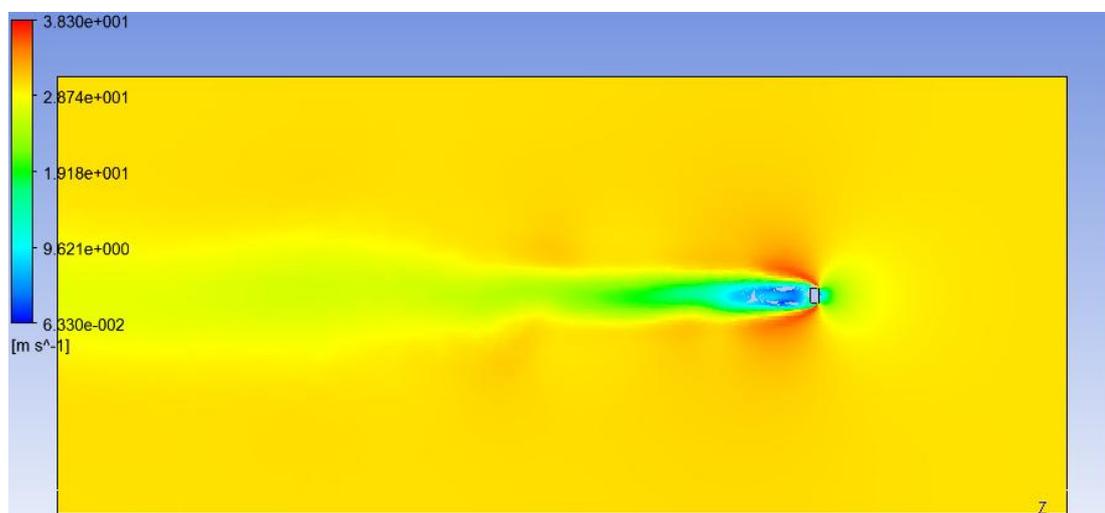


Figura 6.87 – Streamlines - Escoamento em torno do Edifício idealizado (5.c)- Domínio Total - Esteira.

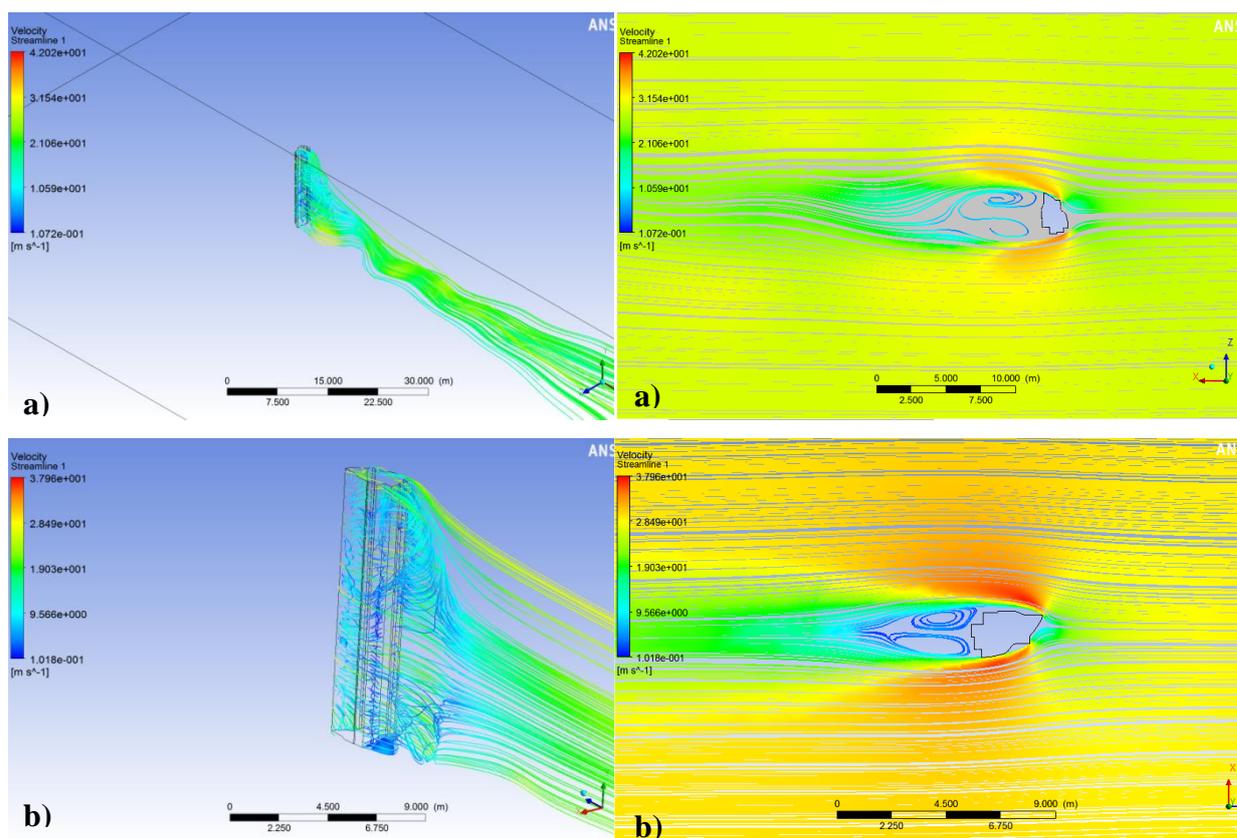


Figura 6.88 – Streamlines - Escoamento em torno do Edifício Real. a) 0° e b) 90°.

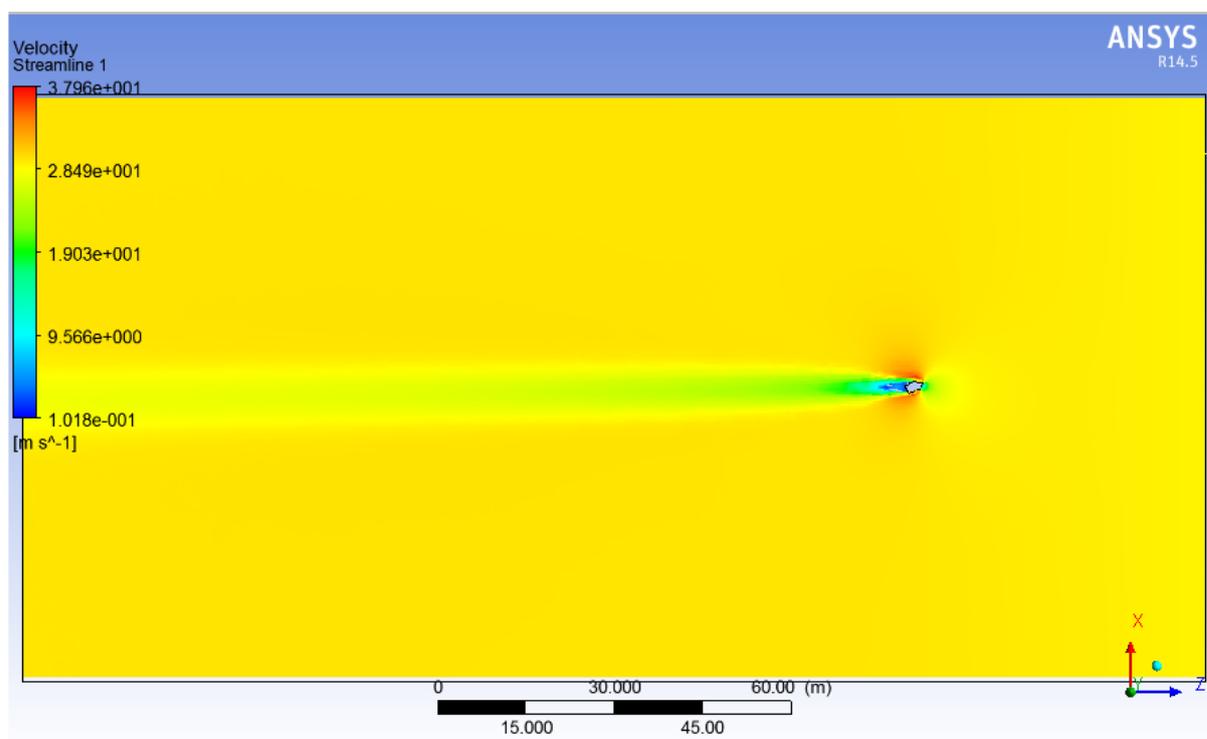


Figura 6.89 – Streamlines- Escoamento em torno do Edifício Real- Domínio Total - Esteira.

6.4 COMENTÁRIOS SOBRE O ESCOAMENTO EM REGIME TURBULENTO

Verificou-se através de "Streamlines", que em regime turbulento não se deve adotar a simplificação de simetria do escoamento, tática bastante usual para reduzir os custos computacionais, a partir da Figura 6.90, retirada do escoamento na seção quadrada em 4 intervalos de tempo distintos, que o fenômeno que ocorre na parte superior do domínio computacional, não é o mesmo que ocorre na parte inferior. Devido a isto também não foi utilizada nesta dissertação, malhas adaptativas, pois para cada passo de tempo, regiões distintas necessitariam de refinamentos locais, então seria necessário usar estimativas de erros *a posteriori* nas simulações.

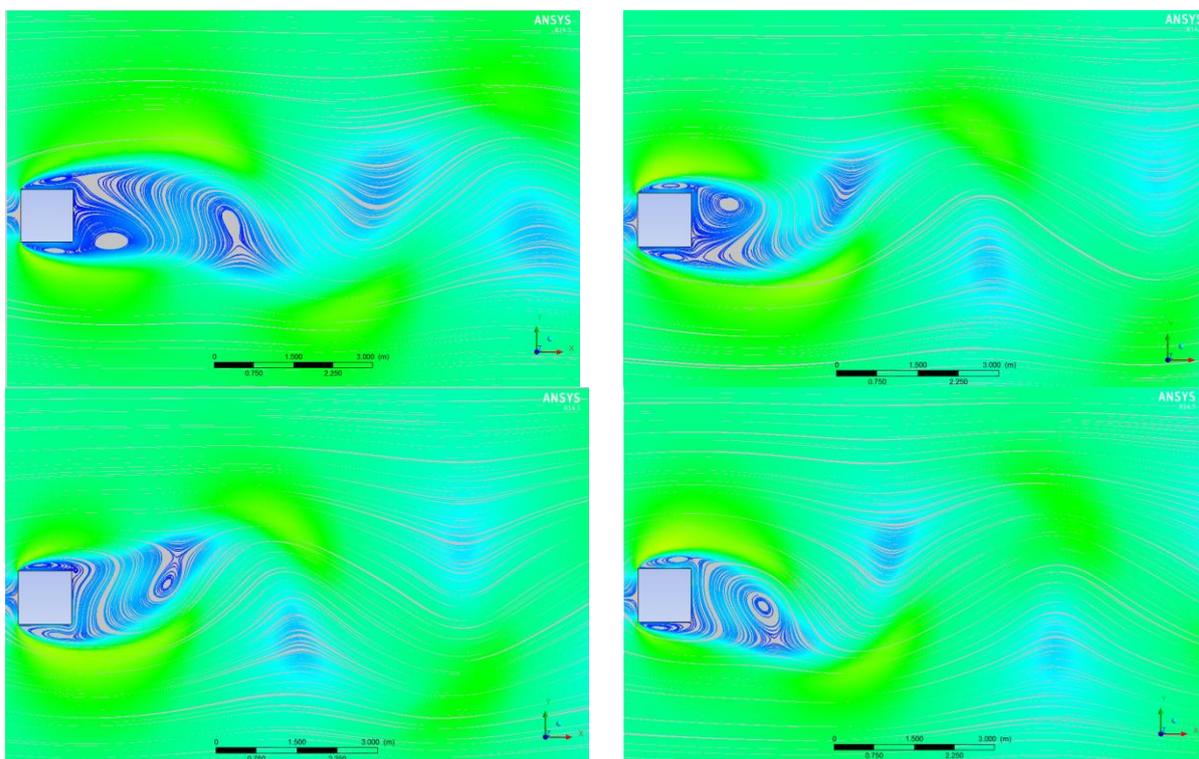


Figura 6.90 – Streamlines Análise da Esteira - Seção quadrada

7. CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo serão relatadas as principais conclusões e contribuições obtidas a partir deste trabalho. Também serão indicadas recomendações para futuros trabalhos. Foram realizadas simulações numéricas de escoamentos bi e tridimensionais em regimes turbulentos para uma extensa faixa de número de Reynolds ($Re=10^3-10^6$) onde foi possível mensurar os coeficientes de arrasto (C_A) para diversas geometrias.

7.2 CONCLUSÕES GERAIS

- O estudo demonstrou que mesmo servindo como estimativa da ordem de grandeza, e a baixo tempo de processamento, o coeficiente de arrasto em escoamentos bi e tridimensionais não deve ser obtido a partir do estado estacionário (permanente), pois esta variável oscila com o tempo para um dado escoamento de fluido em regime turbulento e pode convergir para um valor incorreto (vide modelo 2 e 3)
- A simulação por CFD mostrou ser bastante promissora e indicada para estudos aerodinâmicos de edificações e obras de artes especiais. Ela é de grande importância uma vez que nas normas vigentes não há dados específicos para cada geometria de estrutura, dificultando a quantificação do arrasto, necessitando de aproximações grosseiras para assemelhar a estrutura às geometrias convencionais da norma existente.

7.3 CONCLUSÕES PARA O ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL

- De acordo com as simulações do escoamento bidimensional, foi verificado que a seção quadrada apresentou um C_A de 2,17, resultando em um erro de 1,4% do valor teórico. Em seguida foi possível quantificar o coeficiente de arrasto para o aqueduto com seção retangular simplificada e submetido a vento real, que convergiu para um valor de $C_A = 1,93$, apresentando um erro de 1,03% em relação ao valor teórico estimado. Destaca-se que a malha intermediária (03) apresentou um erro da ordem de 8,5%, entretanto com tempo de processamento cerca de 5 vezes menor que a malha mais refinada. Assim, com aproximadamente 5 horas de simulação é possível determinar o coeficiente de arrasto para uma estrutura de geometria rombuda (com poucas variações nas dimensões), em um computador doméstico com processador Core(TM) i7-4770 com 8 núcleos de processamentos e 8GB de memória.

7.4 CONCLUSÕES PARA O ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL

- De acordo com as simulações do escoamento tridimensional, verificou-se que o cubo apresentou um coeficiente de arrasto de 1,02, resultando um erro de 2,9% do valor teórico. Percebeu-se um aumento do erro devido ao aumento na dimensão, gerando desta vez o escoamento do fluido em todas as dimensões.
- Em seguida foi possível quantificar o coeficiente de arrasto para cada Edifício idealizado construído, encontrando C_A com um erro de 6 a 13%. A partir da Tabela 6.29 analisa-se que as simulações dos modelos 5.a, 5.b e 5.d resultaram em coeficientes de arrasto acima dos prescritos em norma, 5,3%, 6,2% e 13,6 respectivamente. Desta forma aponta a NBR 6123/1988 contra a segurança em algumas geometrias. Verifica-se que o erro aumentou devido à quantidade de variáveis que aumentaram em tal simulação, tornando o objeto uma edificação assente no solo e com as características tridimensionais conforme o cubo. Salienta-se ainda que estes valores de referência foram tomados a partir de ábacos da NBR 6123/1988, necessitando de maiores estudos sobre as características do piso do domínio.
- Na edificação real, foi verificado um maior erro nos pavimentos inferiores e superiores, e conseqüentemente um menor erro nos pavimentos intermediários. Desta forma foi elaborada a Tabela 6.28 para realizar uma análise global. Desprezando-se o último e primeiro pavimento. No vento incidente a 0° foi encontrado um erro médio um erro máximo de 17% e mínimo de 0,39%. Para o vento incidindo a 90° o erro máximo de 35% e mínimo de 0,5%. Destaca-se que este valor foi tomado para um modelo aproximado, ignorando o piso, as áreas de convivências nos pavimentos inferiores, caixa d'água e heliponto nos pavimentos superiores conforme o anexo B. Isto justifica os erros em tais pavimentos.
- Como o intuito da simulação do edifício real foi obter a força nodal, não podíamos adotar apenas a força global, então também foi analisada a força por pavimento, conforme as tabelas 6.26 e 6.27, verificando o erro médio de 6,4% e 8% para o vento a 0° e 90° respectivamente. Destaca-se que a geometria foi aproximada para facilitar, desta forma inferindo erros. Destaca-se ainda que o ensaio experimental, túnel de vento, também contém erros inerentes, e neste trabalho foi tomado como valor exato.
- Salienta-se que um especialista em cálculo estrutural ao se deparar com tal edificação real, sem o ensaio de túnel de vento ou simulação computacional, necessitaria aproximá-la de um modelo preconizado em norma, gerando um acréscimo de esforços em 29,1% para o vento a 0° e 60,6% para o vento a 90° , desprezando os pavimentos superiores e inferiores.

- Objetivando reduzir os custos computacionais, seria possível realizar simulações apenas com a malha 04, resultando em erros de 0,99% para o vento incidente a 0° e 2,24% para o vento incidente a 90°, reduzindo o tempo para 60%, cerca de 41 horas.

7.5 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho objetou elaborar uma metodologia progressiva para simulações de escoamento em torno de estruturas da construção civil. Tais procedimentos foram os mais simplórios possíveis uma vez que o público alvo para tais simulações são engenheiros civis e/ou ligados a dimensionamentos de estruturas da construção civil, desta forma maiores especificidades de conceitos fluido dinâmicos não devem ser aprofundados.

Nas etapas a serem seguidas deve-se buscar continuamente a convergência do número de iterações, de modelo de turbulência e principalmente da malha.

Ao criar um modelo, deve-se objetivar a aplicação prática, sempre aliada a exatidão, simulando uma geometria mais próxima da real com o mínimo custo computacional.

7.6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se as seguintes considerações:

1. A inserção de características que aproximem os modelos aos casos reais conforme:
Aqueduto real: abertura na face superior, influência do fluido transportado (água), variação na geometria (apoios), variação na velocidade do vento, entre outras.
Edifício Real: Representação real da geometria (incluindo detalhes das fachadas, térreo e cobertura), melhor tratamento da rugosidade do piso, simulação em todos os ângulos de incidência conforme ensaio em túnel de vento;
2. Também é possível a consideração de efeitos resultantes do escoamento, tais como variações nos vórtices e sua influência em edificações vizinhas. Assim como a influência dessas no edifício objeto de estudo;
3. É indicado ainda a otimização do processo, buscando a redução nos custos computacionais e maior precisão nos valores do arrasto.

REFERÊNCIAS

ABOSHOSHA, H.; ALHEFNAWY, L.; FATHELBAB, F; SHAMEL, A. **Wind induced vibrations of tall buildings using CFD**. IN International Symposium on Computational Wind Engineering-CWE2010, 15., 2010, North Carolina. **Anais**. Alexandria, UA, 2010.

ABRAUMCHUK, V. **Estudo da força de arrasto sobre veículos de transporte empregando CFD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Programa de pós graduação da Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ALE, J. V. **Forças aerodinâmicas** - escoamento Viscoso Externo, Cap 11 do Livro Mecânica dos Fluidos. PUC- RS, 2010.

ALENCAR, H.S. **Estudo da distribuição da velocidade em tubo Venturi Utilizando Medidas experimentais e técnicas de CFD**. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH. vol. 14, n. 4, pp. 81–92. 2009.

ALMEIDA, R. F. C. **Simulação computacional da interação fluido-estrutura em bombas de cavidades progressivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de pós graduação em engenharia Mecânica. Natal, 2010

ALMEIDA, R. F. **Simulação computacional da interação Fluido-Estrutura em bombas de cavidade progressivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio grande do Norte/RN. 2010.

ANALISE de Estruturas via Ansys. PUC-RIO

ANGELO, E.; BARRIOS, D.B. **Utilização da dinâmica dos fluidos computacionais na complementação do ensino da disciplina Fenômeno dos transportes**. IN: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 34., 2006, Passo Fundo. **Anais**. São Paulo. UPM, 2006.

ANGELO, G. **Análise da dinâmica do escoamento em circuitos de circulação natural**. Tese (doutorado em Ciências de tecnologia Nuclear)- IPEN- Autarquia associada à universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ANSYS 12.0. Training Manual. Chapter 08. Ansys, Incorporation. 2009.

ANSYS 14.0. Training Manual.. Ansys, Incorporation. 2012.

ANSYS 2007. Training Manual. Ansys, Incorporation.

ARAÚJO, F.N. **Modelagem da turbulência aplicada ao escoamento sobre uma placa plana incli-**

nada. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica)- IME- Instituto militar de engenharia. Rio de Janeiro, 2012.

BAALS, D.D.; CORLLISS, W.R. **Whirling Arms and the first wind Tunnels**. Disponível em < <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/history.html>> acesso em 07 abr. de 2015.

BALIGA, B.R, PATANKAR, S.V. **A control Volume Finite-Element Method for Two-Dimensional problems**. Numerical Heat Transfer, vol.6, pp. 245-261, 1983

BALIGA, B.R, PATANKAR, S.V. **A new finite element formulation for convection-Difusion Problems**. Numerical Heat Transfer, vol. 3, pp. 393-409, 1980

BARBOSA, R. A.G. C. **Efeitos do vento sobre painéis fotovoltaicos aplicados em coberturas de edifícios- Martifer Solar**. Dissertação (Mestrado integrado em engenharia mecânica)- Faculdade de Engenharia do Porto. Porto. 2013.

BERTHOLDS, A. **CFD Simulations of the New University of Sydney Boundaru Layer Wind Tunnel**. UPPSALA Universitet, 2012.

BILAH, k, Y.; SCANIAN, R. H. **Resonance, Tacoma Narrows Bridge failure, and undergraduate physics textbooks**. IN: American Association of Physics Teachers. Vol 59 (2). fev, 1991.

BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J.; HENSEN, J.L.M. **Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview**. IN: Journal of Building Performance simulation, 4. Netherlands, 2011. **Anais**. jun 2011- p. 157-184.

BORGES, A.S., PAULO JUNIOR, W. L.; RADE, D.A. **Análise Fluido Estrutural utilizando o ANSYS**. In: Simpósio do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, 17., 2007, Umberlândia. **Anais**. Umberlândia, UFU, 2007.

BRAGA, W. **A ciência da Mecânica**. 14 ano II. Departamento de Engenharia Mecânica- PUC/RJ, 2014.

BRAUN, A. L., AWRUCH, A. M. **Simulação numérica na engenharia do vento**. In: Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural -ASAE, v.5, n2/3, p.81-102, Passo fundo. 2009.

BRAUN, A.L. **Simulação numérica na engenharia Incluindo efeitos de interação fluido-estrutura**. Tese de doutorado apresentada ao programa de pós graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- Porto Alegre/RS, 2007.

BRAUN, A.L.; AWRUCH, A.M. **Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard**

tall building model using numerical simulation. In: Computers and Structures, 87., 2009, Porto Alegre. **Journal.** Porto Alegre, 2009.

CATALDI, M; **Simulação de camadas limite estratificadas sobre superfície rugosas em túnel de vento.** Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ÇENGEL, Y. A. e Cimbala, J.M. **Mecânica dos fluidos Fundamentos e aplicações.** Mc Graw Hill. AMGH. 2007.

CEZANA, F.C. **Simulação numérica da dispersão de poluentes ao redor de um obstáculo isolado sob diferentes condições de estabilidade.** Dissertação (Mestrado em engenharia Ambiental). Programa de pós graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

CHASON, H. **The Hydraulics of roman aqueducts: What do we know? Why should we learn?.** In World Environmental and Water resources Congress 2008 ahupua'a. 2008.

CHÁVEZ, E. S. **Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do vento.** Dissertação (Mestrado em engenharia de Estruturas)- Programa de Pós-graduação em Engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CONTI, T. N. **Aplicação do método da expansão em funções hierárquicas na solução das equações de Navier-stokes em duas dimensões para fluidos compressíveis em alta velocidade.** Tese (Doutorado em Engenharia)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COST. FRANKE, Jörg (Ed) . **Best Practice Guideline for the CFD simulation of flow in the urban environment.** Cost Action 732. 2007

COSTA, A. W. V. **Análise da influência da rugosidade superficial na simulação da camada limite atmosférica em uma topografia complexa empregada a dinâmica dos fluidos computacional.** Monografia (Engenheiro Civil)- Departamento de engenharia mecânica – Universidade Federal do Rio grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

CÓSTOLAS, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: Procedimento para quantificação.** Dissertação apresentada a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP/SP. 2006.

DAGNEW, A.K.; BITSUAMALK, G.T.; MERRICK,R. **Computational Evaluation of wind pressure on tall building.** In: Americas Conference on Wind Engineering, 11., 2009, Puerto Rico. **Anais.** Puerto Rico, CEE, 2009

DARIVA, J.F. **Dispositivos aerodinâmicos em pontes**: Influência na estabilidade e nas características aerodinâmicas. Trabalho de diplomação. Departamento de engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ RS. 2009.

FERREIRA, N. A. C. **Efeito do vento em edifícios**- Aplicação a um caso concreto. Dissertação (Mestrado em Estruturas)- Faculdade de Engenharia da Universidade do porto, Porto, 2008.

GABBI, R. **Modelagem matemática do escoamento turbulento em canal axissimétrico com "Bluff-Body"**. Dissertação de mestrado. Pós graduação em Matemática. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI)/RS. 2013.

GARCIA, M.S.C. **Análise de modelo reduzido de estrutura em casca de forma livre de planta hexagonal apoiada nos vértices sob ação do vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, arquitetura e urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

GOLÇALVES, N.D.F. **Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas**. Tese (mestrado em engenharia matemática)- Departamento de matemática- Faculdade de ciências da Universidade do Porto, Porto, 2007.

GUERRA, A.; PRAVIA, Z. M. C. **Obtenção de coeficientes aerodinâmicos através de mecânica computacional de fluidos para determinação de ações em edificações devido ao vento**. In: Mostra de iniciação científica , 12., 2012, Passo Fundo. **Anais**. Passo Fundo: UPF, 2012.

HIRAI, M. N. **Planejamento Nacional da transposição do Rio São Francisco**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo- USP/SP. 2010.

HOUDA, S., ZEMMOURI, N.; HASSEINE, A.; ATHMANI, R.; BELARBI, R. **A cfd model for simulating urban flow in complex morphological street network**. In: The Online Journal of science and technology – TOJSAT, 2., 2012.

KUNDU, P.K; COHEN, I.M. **Fluid Mechanics**. Second Edition. Academic Press. 2002.

LIMAS, L.F. **Determinação das características aerodinâmicas de seções transversais de pontes em túnel de vento**. Dissertação de Mestrado. UFRGS/RS. 2003.

LOUREDO-SOUZA, A.M; BLESSMANN, J. ROCHA, M.M. et al. **Estudo da ação do vento sobre treliçados seccional Brasil**: Coeficientes de arrasto para um módulo de Módulo de torre. Relatório do Laboratório de Aerodinâmica das Construções- LAC. UFRGS, 2003.

LUZ, F.F. **Análise comparativa do escoamento de fluido em experimentos RTM utilizando apli-**

cativos comerciais. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Programa de pós graduação em Engenharia de Minas metalurgia e materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MAIA, F. M. E. **Análise paramétrica e otimização estrutural utilizando software comercial ANSYS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa,2011.

MALISKA, C.R. Transferência de Calor e mecânica dos fluidos computacional. 2ed. LTC. Rio de Janeiro 2014.

MANFRIM, S. T. **Estudo numérico para a determinação das pressões devidas à ação do vento em edifícios industriais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, Ilhas Solteira, 2006.

MÉHAUTÉ, B.L. **An introduction to hydrodynamics and water waves.** Springer Verlag/NY. 1976.

MENDES, R. **Análise do acoplamento pressão-velocidade nas equações de Navier-Stokes utilizando o método dos acoplamentos finitos baseado em elementos e solução acoplada.** Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

MENTER, F.R. **Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993(2013)

MENTER, F.R; KUNTZ, M. LANGTRY, R. **"Ten years of industrial experience with the SST turbulence Model"**. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass transfer. 2003

MENDIS, P.; NGO, T.; HARITOS, N.; HIRA, A. **Wind Loading on tall Buildings.** In: JSE Special Issue: Loading on Structures.2007, Sydney. **Anais.** Sydney, 2007.

MORAIS, E.L. **Verificação de soluções numéricas de escoamento laminares obtidas com o método dos volumes finitos e malhas não-estruturadas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

NADER, G. **Túnel de Vento:** Vital para prédios esbeltos por Altair Santos.. Massa Cinzenta. Abril 2014. Disponível em: < <http://www.cimentoitambe.com.br/tunel-de-vento-indispensavel-para-predios-esbeltos/>> Acesso em 08 abr 2015.

NAJAFI, M; AREFMANESH, A; ENJILELA, V. **Meshless local Petrov-Galerkin method-higher Reynolds number fluid flow applications.** Engineering Analysis with Boundary Elements 36. 2012.

NASCIMENTO, C.A.M. **Modelagem numérica de vibrações em cabos de transmissão de energia elétrica**. Projeto de Graduação(Engenharia Mecânica)- Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, Brasília,2011

NBR6123-1988. Forças devidas ao vento em edificações. ABNT_ Associação Brasileira de Normas técnicas.

PASQUAL, T. C. S. **Um estudo sobre a ação do vento nas estruturas de membrana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

PEREIRA, I. A. B. B. **Escoamento turbulento em torno de um cilindro a baixo número de Reynolds 'Comparação entre modelos de turbulência'**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto- FEUP. 2010.

PEREIRA, W.M. ; ÁVILA, S. M. **Controle de vibrações em torres eólicas submetidas à ação de cargas harmônicas utilizando amortecedor de massa sintonizada na forma de pêndulo**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES,10., 2011, São Paulo. **Anais**. Brasília: UNB, 2011.:

PIRAGHOOM, R.A. KALESAR, H.E. HASHEMI, S.N. **Derivation of now-dimensional across-wind forces spectrum of tall buildings using ANSYS software**. In: CONFERENCE PROCEEDINGS, 7., 2013. **Journal**.. Iran, 2013

POMPEU, R. C. **Simulação numérica e visualização 3D interativa de objetos sob fluxos irrotacionais em tempo Quase-real**. Tese (Doutoramento em Ciências- Mecânica Computacional)- Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

POST, S. **Mecânica dos fluidos aplicada e computacional**. LTC, Rio de Janeiro, 2013.

POTTER, M.C., WIGGERT, D.C. **Mecânica dos Fluidos**. Ed Pioneira Thomson Learning. 2004.

RAMOS, M. O. **Estudo das melhores práticas da aerodinâmica veicular**, visando a melhoria de consumo de combustíveis e redução de emissões de poluentes aplicadas a veículos de passeio. Monografia. Pós graduação em Engenharia Automotiva. IMT. 2012.

RIBEIRO, A.F.P. **Análise aerodinâmica de um edifício por dinâmica dos fluidos computacionais**. 76f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil)- Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009

ROCHA, P.A.C.; SILVEIRA, J.V.P. **Estudo e aplicação de simulação computacional em problemas simples de mecânica dos fluidos e transferência de calor.** Revista Brasileira de Ensino de Física. v.34, n.3, 2012.

RONCHETTI, B. **Simulação numérica da combustão de metano em câmara cilíndrica utilizando o CFX 10.0.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ROQUE, B.A. OLIVEIRA, G.A. **Determinação experimental do coeficiente de arrasto sobre cilindros de base circular.** Trabalho de Graduação.LTCM- UFU/MG. 2008.

ROSA, J. E. P. **Simulação computacional da homogeneização do ácido bórico em um pressurizador de um reator nuclear avançado.** Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear)- Instituto de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, 2013.

SAITO, J. S. MOROOKA, C.K. **Simulação computacional do escoamento em torno de uma seção de um duto marítimo.** VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. ABCM/ PB. 2010.

SARMENTO, C.V.S; SOUZA JUNIOR, M. A.; RIBEIRO, P.M.V. **Estimativa do coeficiente de arrasto com a aplicação da dinâmica dos fluidos computacionais:** Estudo de caso de um aqueduto da transposição do Rio São Francisco. In CILAMCE- XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Fortaleza, 2014

SERAPHIM, R.M. **Avaliação experimental e computacional dos coeficientes de arraste e sustentação de um perfil de aerofólio.** Trabalho de conclusão de curso(Engenharia Mecânica automação e Sistemas)- Universidade São Francisco, São Paulo, 2004.

SESTA, V.M.O.D. **Modelação 3D e estudo aerodinâmico de um veículo de três rodas. Estudo do pára-choques frontal.** In WEMEM-Workshop de Engenharia a Mecânica, 1., 2013, Lisboa. **Anais.** Lisboa. ISEL, 2013.

SEVALIA, J. K.; DESAI, A.K.; VASAWALA, S.A. **Effect of geometric plan configuration of tall building on Wind force coefficient using cfd.** In: Technical Journals online- International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. Vol 1. 2007, Gujarat. **Anais.** Gujarat, SVNIT, 2007.

SILVA FILHO, G. **Estudo do comportamento dinâmico de edifícios mistos (Aço-concreto) submetidos à ação não determinística do vento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, M.N.M. **Estudo do escoamento ao redor de cilindros retangulares utilizado o método de vórtices**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro/RJ. 1995.

SILVEIRA NETO, A. **Fundamentos da Turbulência nos fluidos**. ABCM – Associação Brasileira de Ciências Mecânicas. Br, 2002.

SOUZA JUNIOR, M.A. ANTUNES, A. R. E. **Estudo do escoamento fluido sobre um cilindro circular utilizando do software Ansys-CFX**. In: Congresso de Iniciação Científica-UFPE, 2010.

SYMSCAPE. **Steady-State or Unsteady CFD Simulation? 2002**. Disponível em: <<http://www.symscape.com/steady-state-or-unsteady-cfd-simulation>> Acesso em: 19 mar 2014.

TEIXEIRA, P.R.F. **Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o método de elementos finitos**. Tese de doutorado, UFRGS/ RS. 2001.

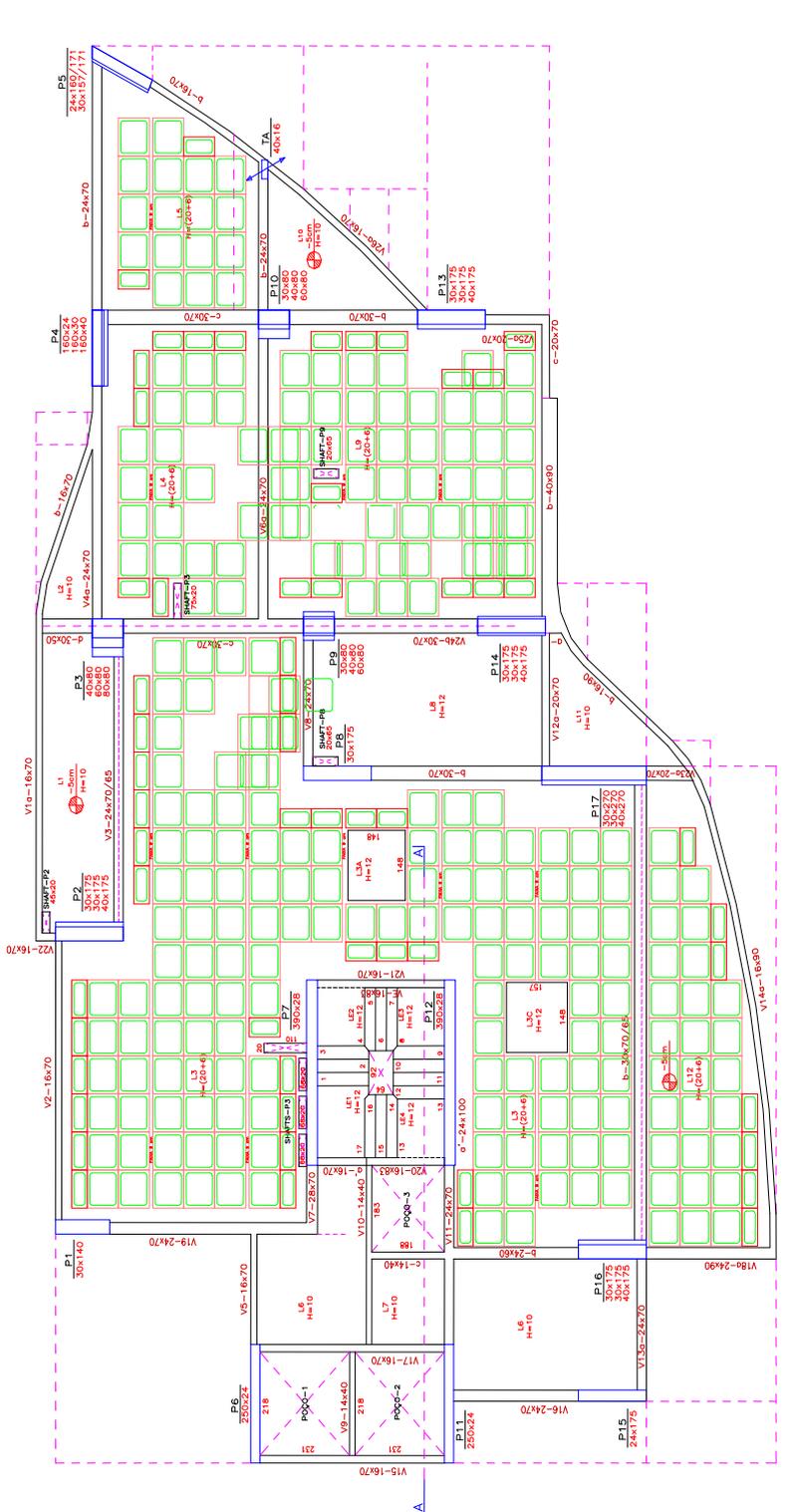
TOASSI, T. L.M. **Análise de esforços de vento em estruturas de barra utilizando o método dos volumes finitos**. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Civil- UFPR/PR, Pato Branco, 2013.

VASCONCELOS, A. P. **Estudo Numérico de Perfis Aerodinâmicos tipo Wingmast para Aplicação em Rotores Hidrocinéticos**. Monografia (Bacharel em engenharia civil) - Curso de Engenharia de Energia - Universidade de Brasília- UNB. Brasília, 2014.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Mc Graw Hill, Porto Alegre, 2011.

ZHOU, Y.; KIJEWski, T.; KAREEM, A. **Aerodynamic loads on tall buildings**: Interactive database. Journal of Structural Engineering. P.394-404. mar. 2003.

ANEXO A – PLANTA BAIXA E ELEVÇÃO DO EDIFÍCIO REAL

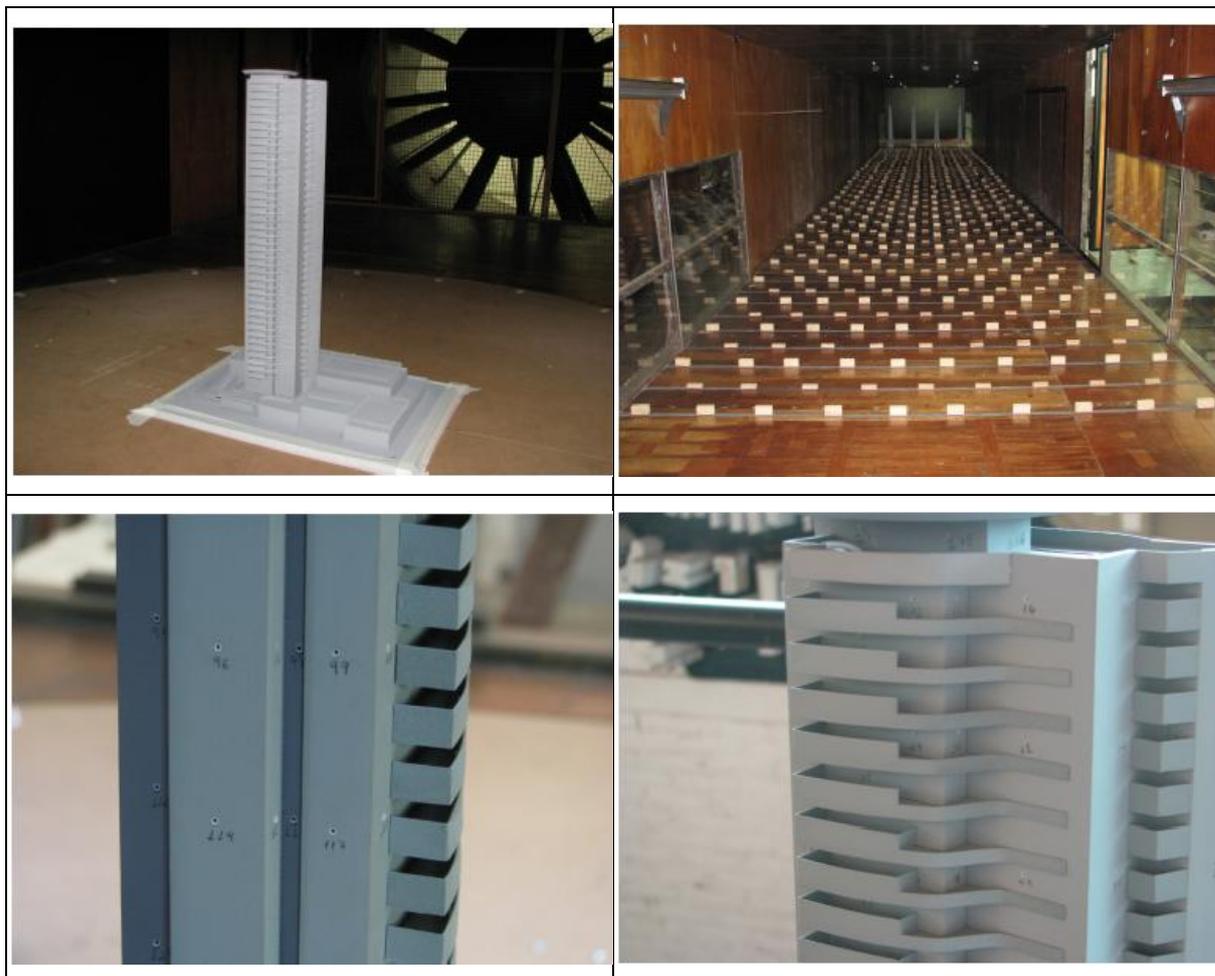


	R.SUPERIOR	
	COBERTA	
300	40° PAVIMENTO-TIPO	130.30 m
300	39° PAVIMENTO-TIPO	127.30 m
300	38° PAVIMENTO-TIPO	124.30 m
300	37° PAVIMENTO-TIPO	121.30 m
300	36° PAVIMENTO-TIPO	118.30 m
300	35° PAVIMENTO-TIPO	115.30 m
300	34° PAVIMENTO-TIPO	112.30 m
300	33° PAVIMENTO-TIPO	109.30 m
300	32° PAVIMENTO-TIPO	106.30 m
300	31° PAVIMENTO-TIPO	103.30 m
300	30° PAVIMENTO-TIPO	100.30 m
300	29° PAVIMENTO-TIPO	97.30 m
300	28° PAVIMENTO-TIPO	94.30 m
300	27° PAVIMENTO-TIPO	91.30 m
300	26° PAVIMENTO-TIPO	88.30 m
300	25° PAVIMENTO-TIPO	85.30 m
300	24° PAVIMENTO-TIPO	82.30 m
300	23° PAVIMENTO-TIPO	79.30 m
300	22° PAVIMENTO-TIPO	76.30 m
300	21° PAVIMENTO-TIPO	73.30 m
300	20° PAVIMENTO-TIPO	70.30 m
300	19° PAVIMENTO-TIPO	67.30 m
300	18° PAVIMENTO-TIPO	64.30 m
300	17° PAVIMENTO-TIPO	61.30 m
300	16° PAVIMENTO-TIPO	58.30 m
300	15° PAVIMENTO-TIPO	55.30 m
300	14° PAVIMENTO-TIPO	52.30 m
300	13° PAVIMENTO-TIPO	49.30 m
300	12° PAVIMENTO-TIPO	46.30 m
300	11° PAVIMENTO-TIPO	43.30 m
300	10° PAVIMENTO-TIPO	40.30 m
300	9° PAVIMENTO-TIPO	37.30 m
300	8° PAVIMENTO-TIPO	34.30 m
300	7° PAVIMENTO-TIPO	31.30 m
300	6° PAVIMENTO-TIPO	28.30 m
300	5° PAVIMENTO-TIPO	25.30 m
300	4° PAVIMENTO-TIPO	22.30 m
300	3° PAVIMENTO-TIPO	19.30 m
300	2° PAVIMENTO-TIPO	16.30 m
300	1° PAVIMENTO-TIPO	13.30 m
300	MEZANINO	7.30 m
300	VAZADO-2	4.30 m
300	VAZADO-1	1.30m
300	TÉRREO	-1.70m

REDUÇÃO PILARES

REDUÇÃO PILARES

REDUÇÃO PILARES

ANEXO B – IMAGENS DO ENSAIO DE TÚNEL DE VENTO- EDIFÍCIO REAL

Na primeira imagem o detalhe da edificação e ambientes de convivência nos pavimentos inferiores, destaca-se ainda a cobertura, com caixa de água e heliponto. Na segunda imagem é possível ver os geradores de vórtices e rugosidade do solo. Os pontos de medição de pressão são vistos na terceira imagem. Já na última é possível ver os detalhes de cada pavimento do modelo.