Douglas Pereira Agnelo

**Cálculo dos efeitos dinâmicos em edificações usando a ferramenta de *CFD*
*OpenFOAM***

São Paulo
2021 (Edição Original)
2021 (Versão Corrigida)

Douglas Pereira Agnelo

**Cálculo dos efeitos dinâmicos em edificações usando a ferramenta de *CFD*
*OpenFOAM***

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:
Prof. Dr. Fernando Akira Kurokawa

São Paulo
2021 (Edição Original)
2021 (Versão Corrigida)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de fevereiro de 2021

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Fernando Akira Kurokawa

Catálogo-na-publicação

Agnelo, Douglas Pereira

Cálculo dos efeitos dinâmicos em edificações usando a ferramenta de CFD OpenFOAM / D. P. Agnelo -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

155 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) 2.Forças Horizontais nas Estruturas 3.NBR 6123:1988 4.Método dos elementos finitos (MEF) 5.Interação Fluido-Estrutura I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

À minha esposa Maria Teresa Agnelo e família, pela paciência nos momentos dos quais estive ausente para a elaboração deste trabalho.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Fernando Akira Kurokawa, pela orientação e confiança depositada na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Valério da Silva Almeida, pela colaboração, auxílio, esclarecimentos, tratamento dos dados e compilação das modelagens em *CFD* para acoplação nos programas de análise estrutural de própria autoria.

Ao Prof. Dr. Kim Yong Chul da Tokyo Polytechnic University pelo pronto atendimento e celeridade quanto aos esclarecimentos dos ensaios de túnel de vento realizados em parceria pelo Ministério de Ciência e Tecnologia no Japão.

Ao Prof. Dr. Alfonso Papalardo Junior pelo carinho e apoio para realização desta pesquisa.

Ao colega doutorando Msc. Tiago Souza do Instituto Tecnológico de Aeronáutica pela amizade, troca de conhecimento e pelas conversas sobre modelos constitutivos aplicados às engenharias geotecnia e estrutural.

“Tudo se compensa na natureza.”
— Alberto Santos-Dumont

Resumo

O estudo da ação do vento e sua interação com as estruturas, apresentam-se de forma preponderante e devem ser levados em conta ainda na fase de projetos. Estas devem ser projetadas para suportar as forças impostas pelo vento. O desenvolvimento sustentável exige uma necessidade constante de desmaterialização da construção civil, ou seja, construir mais usando o mínimo de recursos materiais e humanos. O equilíbrio entre a economia e os critérios de segurança implica o constante desenvolvimento em pesquisas e atualização das regulamentações normativas, as quais devem estar em consonância com os desafios da construção sustentável. Com o avanço da tecnologia computacional e das técnicas numéricas, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (*CFD - Computational Fluid Dynamics*) vêm desempenhando papel fundamental para solução de problemas de interação vento-estrutura. Visando a otimização dos recursos para execução de estruturas e eficiência no dimensionamento dos projetos, este trabalho apresenta um estudo comparativo do cálculo das forças aerodinâmicas devido à ação do vento em edificações obtidas através de *CFD* com os modelos de cálculos utilizados na Norma Brasileira NBR 6123:1988 e *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings*. Os procedimentos normatizados e as simulações numéricas são comparadas com os dados experimentais de modelos em escala reduzida obtidas por túnel de vento e os resultados mostraram ser satisfatórios. Os resultados das simulações em *CFD* foram acoplados em programa de análise estrutural para avaliação dos esforços e deslocamentos das edificações através do Método Elementos Finitos (MEF). Os resultados obtidos pelos acoplamento *CFD*-MEF são comparados com as metodologias de dimensionamento tradicionais em que a Dinâmica dos Fluidos Computacional é apresentada como alternativa para estimar as forças aerodinâmicas nas edificações. As simulações numéricas da interação vento-estrutura foram realizadas por meio do código aberto *OpenFOAM*.

Abstract

With the advancement of socioeconomic policies aiming at the efficiency constructive and sustainable development in recent decades, recently there is a constant need of the dematerialisation of civil construction, i.e., build more using the minimum material and human resources with maximum reuse. In this regard, normative regulations of civil engineering must be constantly updated and in line with the challenges of sustainable construction and current technological development. The study of the wind action and its interaction with the structures, are preponderant and must be taken into account even in the project phase. These must be designed to withstand the forces imposed by the wind. With the advancement of computer technology and numerical techniques, Computational Fluid Dynamics (CFD) have played a fundamental role for solution of wind-structure interaction problems. Aiming at the optimization of resources for the execution of structures and efficiency in the design of the projects, this work presents a comparative study of the calculation of the aerodynamic forces due to the wind action in buildings obtained through CFD with the calculation models used in the Brazilian Standard NBR 6123:1988 and Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings. These three calculation approaches are compared with the experimental data from wind tunnel reduced scale models and the results have been found to be satisfactory. The results of the CFD simulations were coupled in a structural analysis program to evaluate the forces and displacements of the buildings through the Finite Element Method (FEM). The results obtained by the CFD-FEM coupling are compared with the traditional design methodologies in which Computational Fluid Dynamics is presented as an alternative to estimate the aerodynamic forces in buildings. The numerical simulations of the wind-structure interaction were performed using the open source OpenFOAM.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Momentos nas colunas da face exposta à pressão do vento . . .	31
FIGURA 2.2 – Campo de vetor velocidade em um plano longitudinal no eixo da cumeeira. Unidades: $[m/s]$	32
FIGURA 2.3 – Perfil médio da ação dos ventos para diferentes terrenos	33
FIGURA 2.4 – Simulação do campo de pressões e velocidades por <i>CFD</i>	34
FIGURA 2.5 – Coeficientes de pressão externo obtidos por <i>CFD</i>	35
FIGURA 2.6 – Pressão do vento na 3ª interação $[N/m^2]$	37
FIGURA 2.7 – Pressão Total, $L * \frac{b}{h} = 0.10$ e 75°	38
FIGURA 2.8 – Escoamento em torno dos edifícios idealizados pelo pesquisador	38
FIGURA 2.9 – Campo vetorial de velocidade para construção octogonal a 0° de ângulo de incidência do vento	39
FIGURA 2.10 – Resultados: a) linhas de corrente; b) campo das velocidades do vento; c) campo de pressões	41
FIGURA 2.11 – Distribuição da malha nas superfícies das edificações e na zona de perímetro para os modelos $R = 4L$	42
FIGURA 2.12 – Resultados do campo de velocidades para determinada densidade dos edifícios	43
FIGURA 2.13 – Valores de c_{pe} para modelos numéricos (axonometria nas vistas esquerda, frontal e traseira) 135°	43
FIGURA 2.14 – Modelo <i>CAD</i> do estudo de caso. O caso 1 é simulado sem obstruções contextuais. O caso 2 é simulado com obstruções. Vermelho destaca a zona que foi modelada no <i>EnergyPlus</i>	44

FIGURA 2.15 – Coeficientes de pressão na fachada da face de vento (esquerda) e face esquerda (direita) calculada com <i>CpCalc+</i> (GROSSO, 1992) e <i>CFD</i> . Os gráficos da esquerda referem-se à simulação sem obstruções (edifício isolado), os gráficos à direita da simulação com obstruções (10 edifícios)	45
FIGURA 2.16 – Padrão do escoamento para ângulo de 30° de incidência do vento	46
FIGURA 3.1 – Coeficientes de pressão e de forma externos	56
FIGURA 3.2 – Coeficientes de pressão e de forma externos na cobertura	57
FIGURA 3.3 – Velocidade básica do vento U_0	59
FIGURA 3.4 – Coeficientes de pressão externa C_{pe} para edifícios com seções retangulares e alturas superiores a 45m	62
FIGURA 3.5 – Coeficientes de pressão externa C_{pe} para edifícios com seções retangulares e coberturas, cujas alturas são menores ou iguais a 45m (cont.)	63
FIGURA 3.6 – Coeficientes de pressão externa C_{pe} para edifícios com seções retangulares e coberturas, cujas alturas são menores ou iguais a 45m)	64
FIGURA 3.7 – Espectro e espectro reduzido	66
FIGURA 3.8 – Fluxograma do acoplamento fraco <i>CFD-MEF</i>	69
FIGURA 3.9 – Dimensões do modelo. Unidades: [cm]	70
FIGURA 3.10 – Túnel de vento da <i>Tokyo Polytechnic University - TPU</i>	71
FIGURA 3.11 – Planta do túnel de vento da TPU	71
FIGURA 3.12 – Perfil de velocidades simulado utilizado nos testes experimentais	72
FIGURA 3.13 – Tipos de rugosidade do terreno segundo a <i>Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings AIJ</i> (2004)	73
FIGURA 3.14 – Sensores de pressão acoplados no modelo para ensaio de túnel de vento	74
FIGURA 3.15 – Função de transferência do sistema de tubos	75
FIGURA 3.16 – Coeficientes de pressão média sobre fachada frontal por ângulo de incidência	77
FIGURA 4.1 – Sintaxe em <i>C++</i> do arquivo <i>icoFoam.C</i>	79
FIGURA 4.2 – Linhas implementadas na código original do <i>solver pisoFoam</i> . .	81

FIGURA 4.3 – Parâmetros adotados para solução numérica da p , U , ε e k	83
FIGURA 4.4 – Esquemas de interpolação definidos no arquivo <i>fvSchemes</i>	85
FIGURA 5.1 – Dimensões da edificação. Unidades: $[m]$	87
FIGURA 5.2 – Dimensões do domínio em planta e vista. Unidades: $[m]$	89
FIGURA 5.3 – Domínio em 3D	89
FIGURA 5.4 – Condições de contorno. Unidades: $[m]$	91
FIGURA 5.5 – Malha A (74850 elementos): discretização do edifício	92
FIGURA 5.6 – Malha B (153708 elementos): discretização do edifício	93
FIGURA 5.7 – Malha C (224448 elementos): discretização do edifício	93
FIGURA 5.8 – Malha D (304320 elementos): discretização do edifício	94
FIGURA 5.9 – Malha A (74850 elementos): domínio em 3D	94
FIGURA 5.10 –Malha B (153708 elementos): domínio em 3D	95
FIGURA 5.11 –Malha C (224448 elementos): domínio em 3D	95
FIGURA 5.12 –Malha D (304320 elementos): domínio em 3D	96
FIGURA 5.13 –Razão de aspecto	96
FIGURA 5.14 –Distorção	97
FIGURA 5.15 –Ortogonalidade	97
FIGURA 5.16 –Malha A (74850 elementos): plano XY	98
FIGURA 5.17 –Malha A (74850 elementos): plano XZ	98
FIGURA 5.18 –Malha A (74850 elementos): plano YZ	98
FIGURA 5.19 –Malha B (153708 elementos): plano XY	99
FIGURA 5.20 –Malha B (153708 elementos): plano XZ	99
FIGURA 5.21 –Malha B (153708 elementos): plano YZ	99
FIGURA 5.22 –Malha C (153708 elementos): plano XY	100
FIGURA 5.23 –Malha C (224448 elementos): plano XZ	100
FIGURA 5.24 –Malha C (224448 elementos): plano YZ	100
FIGURA 5.25 –Malha D (304320 elementos): plano XY	101
FIGURA 5.26 –Malha D (304320 elementos): plano XZ	101
FIGURA 5.27 –Malha D (304320 elementos): plano YZ	101

FIGURA 5.28 –Campo de velocidades do teste experimental aplicado na simulação. Unidades: $[m/s]$	103
FIGURA 5.29 –Curvas com resultados da média temporal do c_{pe}	104
FIGURA 5.30 –Resultados das médias temporais do c_{pe} pelo ensaio experimental	106
FIGURA 5.31 –Manchas: ensaio experimental e configuração visualizador dos resultados em <i>CFD</i>	107
FIGURA 5.32 –Resultados qualitativos do c_{pe} para as malhas A, B, C e D em relação ao ensaio experimental.	108
FIGURA 5.33 –Resultados qualitativos da malha A com linhas de corrente e pressões. Unidades: $[Pa]$	109
FIGURA 5.34 –Posicionamento da fronteira de saída (FORTUNA, 2000)	110
FIGURA 5.35 –Distâncias entre fronteira de entrada e fachada frontal. Unidades: $[m]$	111
FIGURA 5.36 –Caso A: Locação da fronteira de entrada a 45 metros. Unidades: $[m]$	112
FIGURA 5.37 –Caso B: Locação da fronteira de entrada a 95 metros. Unidades: $[m]$	112
FIGURA 5.38 –Caso C: Locação da fronteira de entrada a 145 metros. Unidades: $[m]$	113
FIGURA 5.39 –Caso D: Locação da fronteira de entrada a 195 metros. Unidades: $[m]$	113
FIGURA 5.40 –Curvas com os resultados do c_{pe} da análise da locação da fronteira de entrada	115
FIGURA 5.41 –Resultados qualitativos do c_{pe} para as malhas A, B, C e D em relação ao ensaio experimental.	118
FIGURA 5.42 –Resultados qualitativos do Caso A com linhas de corrente e pressões. Unidades: $[Pa]$	119
FIGURA 5.43 –Casos de estudo com diferentes ângulos de incidência	121
FIGURA 5.44 –Curvas com os resultados do c_{pe} do caso A	123
FIGURA 5.45 –Curvas com os resultados do c_{pe} do caso B	123
FIGURA 5.46 –Curvas com os resultados do c_{pe} do caso C	124
FIGURA 5.47 –Curvas com os resultados do c_{pe} do caso D	124

FIGURA 5.48 –Caso A: vento na direção 0°	126
FIGURA 5.49 –Resultados qualitativos do caso A	127
FIGURA 5.50 –Caso B: vento na direção 30°	127
FIGURA 5.51 –Resultados qualitativos do caso B	128
FIGURA 5.52 –Caso C: vento na direção 45°	128
FIGURA 5.53 –Resultados qualitativos do caso C	129
FIGURA 5.54 –Caso D: vento na direção 60°	129
FIGURA 5.55 –Resultados qualitativos do caso D	130
FIGURA 5.56 –Campo de velocidades na entrada do domínio. Unidades: $[m/s]$	132
FIGURA 5.57 –Detalhamento da malha em planta	133
FIGURA 5.58 –Detalhamento da malha em elevação lateral	133
FIGURA 5.59 –Detalhamento da malha em elevação frontal	133
FIGURA 5.60 –Coeficiente de arrasto para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência	136
FIGURA 5.61 –Parâmetros para cálculo do coeficiente de arrasto	137
FIGURA 5.62 –Gráfico com os comparativos entre os coeficientes de arrasto C_a obtidos por diferentes métodos	138
FIGURA 5.63 –Comparativos das forças globais	139
FIGURA 5.64 –Comparativos dos momentos globais	140
FIGURA 5.65 –Resultados do c_{pe} com traçadores	141
FIGURA 5.66 –Resultados do c_{pe} na fachada frontal	141
FIGURA 5.67 –Resultados do c_{pe} na fachada lateral direita	141
FIGURA 5.68 –Resultados do c_{pe} na fachada posterior	142
FIGURA 5.69 –Resultados do c_{pe} na fachada lateral esquerda	142
FIGURA 5.70 –Resultados do c_{pe} na cobertura	142
FIGURA 5.71 –Campo de velocidades em corte no plano z ($t = 120s$). Unidades: $[m/s]$	143
FIGURA 5.72 –Campo de velocidades em corte no plano y na posição 150 me- tros ($t = 120s$). Unidades: $[m/s]$	143
FIGURA 5.73 –Campo de velocidades em corte no plano x na posição 150 me- tros ($t = 120s$). Unidades: $[m/s]$	144

FIGURA 5.74 –Geometria unifilar do modelo estrutural em MEF (vista isométrica)	145
FIGURA 5.75 –Formas do pavimento tipo do modelo estrutural em MEF (em planta)	145
FIGURA 5.76 –Renderização do modelo estrutural em MEF (vista isométrica) . .	146
FIGURA 5.77 –Pressões em cada volume de controle (<i>CFD</i> transferidas para cada instante de tempo no modelo estrutural (MEF)	147
FIGURA 5.78 –Gráfico do deslocamento no topo do pilar P11 obtidos com diferentes métodos	148

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Linha do tempo das principais publicações de <i>CFD</i> para edificações	47
TABELA 3.1 – Coeficientes do modelo $k-\varepsilon$ Padrão	50
TABELA 3.2 – Valores de K_p	67
TABELA 3.3 – Valores de C_{as} [10^3]	67
TABELA 5.1 – Propriedades físicas do ar	88
TABELA 5.2 – Parâmetros de qualidade das malhas A, B, C e D	102
TABELA 5.3 – Resultados da média temporal do c_{pe}	105
TABELA 5.4 – Erro absoluto da média temporal do c_{pe} entre <i>CFD</i> e experimento	105
TABELA 5.5 – Erro relativo da média temporal do c_{pe}	105
TABELA 5.6 – Processamento das malhas A, B, C e D	110
TABELA 5.7 – Avaliação da locação ótima da fronteira de entrada	111
TABELA 5.8 – Parâmetros de qualidade das malhas dos casos A, B, C e D . . .	114
TABELA 5.9 – Resultados da média temporal do c_{pe}	116
TABELA 5.10 – Erro absoluto da média temporal do c_{pe} entre <i>CFD</i> e experimento	116
TABELA 5.11 – Erro relativo da média temporal do c_{pe}	116
TABELA 5.12 – Custo computacional dos casos A, B, C e D	119
TABELA 5.13 – Casos com diferentes incidências do vento na edificação	120
TABELA 5.14 – Parâmetros de qualidade da malha utilizada no casos A, B, C e D	122
TABELA 5.15 – Resultados da média temporal do c_{pe}	125
TABELA 5.16 – Erro absoluto da média temporal do c_{pe} entre <i>CFD</i> e experimento	125
TABELA 5.17 – Erro relativo da média temporal do c_{pe}	125

TABELA 5.18 –Custo computacional dos casos A, B, C e D	130
TABELA 5.19 –Parâmetros de qualidade da malha	134
TABELA 5.20 –Tabela com os comparativos entre os coeficientes de arrasto C_a obtidos por diferentes métodos	138
TABELA 5.21 –Tabela com os comparativos entre os coeficientes de arrasto C_a obtidos por diferentes métodos	140
TABELA 5.22 –Custo computacional	144
TABELA 5.23 –Tabela do deslocamento no topo do pilar P11 obtidos com dife- rentes métodos	148

Lista de Abreviaturas e Siglas

AA	<i>Age of Air</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFN	<i>Airflow Network</i>
AIJ	<i>Architectural Institute of Japan</i>
ALE	<i>Arbitrary Lagrangian Eulerian</i>
BLWT	<i>Boundary Layer Wind Tunnel</i>
CAARC	<i>Commonwealth Advisory Aeronautical Council</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
CUB	Custo Unitário Básico
EDP	Equação Diferencial Parcial
FVM	<i>Finite Volume Method</i>
ILES	<i>Implicit Large-Eddy Simulation</i>
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MAA	<i>Mean Age of Air</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NV	<i>Natural Ventilation</i>
OpenFOAM	<i>Open source Field Operation And Manipulation</i>
PIS	Projeto de Interesse Social
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RAS	<i>Reynolds-Averaged Simulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RNG κ - ϵ	<i>Renormalization Group κ-ϵ</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
TPU	<i>Tokyo Polytechnic University</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
URANS	<i>Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
USP	Universidade de São Paulo
WSS	<i>Wind Speed Ratio</i>

Lista de Símbolos

Letras romanas maiúsculas

A	Área
$\mathbf{A}$	Matriz de coeficientes
A_C	Área do componente/revestimento
A_e	Área frontal efetiva (área da projeção ortogonal da edificação)
A_R	Área do telhado/cobertura
$\hat{C}_C$	Coeficiente de força do vento de pico
C_a	Coeficiente de arrasto
C_{as}	Coeficiente de arrasto superficial
C_D	Coeficiente da força do vento (coeficiente de arrasto)
C_e	Coeficiente de forma externa
C_i	Coeficiente de forma interna
C_k	Amplitude
C_{pe}	Coeficiente de pressão externa
C_{pe1}	Coeficiente de pressão externa na face de barlavento
C_{pe2}	Coeficiente de pressão externa na face de sotavento
$\hat{C}_{pe}$	Coeficiente de pressão externa do vento de pico
C_{pi}^*	Coeficiente para efeito de pressões internas flutuantes
C_R	Coeficiente da força do vento para coberturas
Co	Número de Courant
E_{gI}	Fator topográfico para intensidade turbulenta
E_H	Fator do perfil da velocidade do vento na altura de referência H ;
$\hat{F}(t)$	Carregamento total
F_a	Força de arrasto
F_f	Carregamento harmônico da parcela flutuante do vento
F_g	Resultante de todas as forças exercidas pelo vento sobre uma edificação
$\vec{F}_p$	Vetor da força global
F_m	Parcela estática do vento

F_z	Carga permanente na altura z
G_D	Coeficiente do efeito rajada do vento
G_R	Coeficiente do efeito rajada do vento para coberturas
I_{rZ}	é a Intensidade de turbulência na altura Z por categoria de terreno plano
I	Intensidade turbulenta
I_Z	Intensidade turbulenta na altura Z (AIJ)
K_D	Fator da direção do vento
K_{rW}	Fator de conversão do período de retorno
M_g	Resultante de todos os momentos exercidos pelo vento sobre uma edificação
$\vec{M}_p$	Vetor do momento global
P	Pressão
$\mathbf{R}_{dev}$	Tensor de tensão desviadora
S	Área de uma superfície arbitrária, espectro de potência das pressões
S_ϕ	Termo volumétrico
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
U	Velocidade
U_0	Velocidade básica do vento (AIJ)
U_H	Velocidade de projeto do vento (AIJ)
V	Volume de controle arbitrário
V_0	Velocidade básica (NBR 6123)
V_k	Velocidade característica do vento
V_∞	Velocidade não perturbada no escoamento livre
W	Potência média
W_C	Pressão oriunda do vento no componente/revestimento
W_D	Pressão oriunda do vento na altura estrutura principal
W_R	Pressão oriunda do vento na cobertura
Z	Altura acima do solo
Z_b, Z_G	Parâmetros que determinam o fator de exposição (AIJ)

Letras romanas minúsculas

b	Vetor fonte
c_e	Fator de exposição
c_k	Coeficientes normalizados do vento sintético
c_{pe}	Coeficiente de pressão externa, coeficiente de pressão externa em

	telhados/coberturas (<i>AIJ</i>)
c_{pi}	Coeficiente de pressão interna
f_i	Componentes da força
g_p	Fator de pico
k	Energia cinética turbulenta
p	Pressão, <i>kinematic pressure</i>
p_f	Pico da pressão flutuante
p_∞	Pressão não perturbada no escoamento livre
q	Pressão dinâmica do vento
q_b	Pressão da velocidade básica, pressão dinâmica do vento
q_H	Pressão da velocidade de projeto
q_f	Vetor carga da parcela flutuante
s	Distância
$s_{f,i}$	Área projetada do vetor i
t	Tempo, instante
t_ϕ	Especificado pelo modelo de transporte molecular
u_i	Componentes de velocidade
u_∞	Velocidade não perturbada no escoamento livre
u_0	Perfil de velocidade de entrada
$\mathbf{v}$	Vetor velocidade
$\mathbf{v}_m$	Vetor da malha em movimento
v_0	Velocidade básica do vento
w_e	Pressão externa do vento
x, y, z	Coordenadas do espaço euclidiano tridimensional
$\mathbf{x}$	Vetor com as incógnitas do sistema
z	Altura
z_e	Altura de referência para pressão externa
z_g	Altura gradiente (altura da camada limite atmosférica)

Letras gregas maiúsculas

Δp_e	Pressão externa efetiva
--------------	-------------------------

Letras gregas minúsculas

α	Ângulo de incidência do vento, parâmetro para determinar o fator de exposição (<i>AIJ</i>)
γ	Deformação cisalhante, distorção
ε	Taxa de dissipação

θ	Ângulo de fase da função harmônica
ω_i	Frequência do modo i
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ν_t	Viscosidade turbulenta
ϕ	Propriedade volumétrica
ρ	Massa específica, densidade do fluido
ρ_∞	Densidade do fluido no escoamento livre
σ_k	Coeficiente de difusão turbulenta
σ_p	Desvio padrão das pressões flutuantes (Método do vento sintético)
τ	Tensão de cisalhamento

Símbolos especiais

∇	Divergente
----------	------------

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO	27
1.2	OBJETIVOS	29
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2	REVISÃO DA LITERATURA	31
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	48
3.1	EQUAÇÕES GOVERNANTES DA DINÂMICA DOS FLUIDOS	48
3.2	MODELAGEM DA TURBULÊNCIA	48
3.3	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	51
3.4	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE	52
3.4.1	Premissas iniciais	52
3.4.2	Geração de malha	53
3.5	MÉTODOS DE CÁLCULO DAS PRESSÕES DINÂMICAS EM EDIFICAÇÕES	53
3.5.1	Cálculo segundo NBR 6123:1988 (ABNT, 2013)	53
3.5.2	Cálculo segundo <i>Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings</i> (AIJ, 2004)	58
3.5.3	Vento sintético	65
3.5.4	Acoplamento CFD-MEF	68
3.5.5	Modelo experimental por túnel de vento	69
4	METODOLOGIA NUMÉRICA	78
4.1	FERRAMENTA COMPUTACIONAL ADOTADA	78

4.2	FORMULAÇÃO NUMÉRICA	79
4.2.1	Método dos volumes finitos	79
4.2.2	Cálculo da solução numérica	80
4.2.3	Esquemas de interpolação	83
5	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	86
5.1	PROCESSAMENTOS DAS SIMULAÇÕES POR <i>CFD</i>	86
5.1.1	Geometria e permeabilidade da edificação	86
5.1.2	Propriedades físicas do fluido	88
5.1.3	Dimensões do domínio	88
5.1.4	Condições iniciais e de contorno aplicado ao problema	90
5.2	CONVERGÊNCIA DE MALHA	91
5.2.1	Parâmetros de qualidade da malha	96
5.2.2	Resultados quantitativos	103
5.2.3	Resultados qualitativos	105
5.2.4	Custo computacional	109
5.3	LOCAÇÃO DA EDIFICAÇÃO NO DOMÍNIO	110
5.3.1	Resultados quantitativos	114
5.3.2	Resultados qualitativos	117
5.3.3	Custo computacional	119
5.4	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO EM <i>CFD</i> PARA O VENTO EM OUTRAS DIREÇÕES	120
5.4.1	Resultados quantitativos	122
5.4.2	Resultados qualitativos	126
5.4.3	Custo computacional	130
5.5	COMPARATIVOS ENTRE <i>CFD</i> E A NORMATIZAÇÃO BRASILEIRA E JAPONESA	131
5.5.1	Condições de contorno	131
5.5.2	Geometria e permeabilidade da edificação	132
5.5.3	Dimensões do domínio	132
5.5.4	Resultados quantitativos	134

5.5.5	Resultados qualitativos	140
5.5.6	Custo computacional	144
5.6	ACOPLAMENTO <i>CFD</i> -MEF	144
6	CONCLUSÕES	149
	Referências	151

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é um motivador de inovação tecnológica na construção civil. Ao se projetar e executar uma obra de engenharia civil é fundamental aproveitar ao máximo as condições geográficas e bioclimáticas locais a fim de garantir o mínimo de impacto ambiental.

Desenvolvimento é definido como sustentável quando satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazer suas próprias necessidades (LENZI, 2006). Neste aspecto, a eficiência construtiva e o desenvolvimento sustentável na engenharia civil estão diretamente relacionados com a utilização racional, otimizada e eficiente de materiais e mão de obra.

Atualmente o consumo de recursos naturais, com o desenvolvimento econômico e o aumento populacional, vem crescendo podendo atingir oitenta toneladas por habitante ao ano em países desenvolvidos (MATTHEWS et al., 2000) sendo que 70% destes recursos são destinados para a construção civil (MATOS; WAGNER, 1998).

Para obtenção da eficiência construtiva e do desenvolvimento sustentável, há uma necessidade de desmaterialização das obras de engenharia. No Brasil, a liberação de recursos governamentais para o segmento habitacional exige cada vez mais o cumprimento e comprovação de políticas sustentáveis pelas construtoras. Portanto, construir mais usando o mínimo de recursos se torna cada vez mais obrigatório. Neste aspecto, a engenharia civil deve buscar alternativas sustentáveis desde da concepção de projeto até a fase final de utilização da obra.

A concepção do projeto e o dimensionamento estrutural impacta de forma preponderante neste processo, já que as soluções dos elementos estruturais pelos modelos de cálculo adotados refletem diretamente no consumo de recursos materiais e humanos. A utilização de um modelo de cálculo mais conservador e menos econômico se replica em todo o processo aumentando de forma potencial o consumo de materiais e mão de obra.

No tocante à concepção e dimensionamento estrutural, o estudo da ação do vento e sua interação com as estruturas, apresentam-se de forma muito significativa em razão das tensões nos elementos estruturais geradas pela pressão dinâmica da ação

do vento nas edificações.

Os engenheiros calculistas, ao elaborarem um projeto estrutural (este considerado um produto que implica a execução de serviços), devem cumprir artigo 39 da Lei 8078/90, a qual impõe que *“É vedado ao fornecedor de produtos ou serviços (...) colocar, no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro)”* (BRASIL, 1990).

Portanto a utilização das normas técnicas expedidas pela ABNT, de forma compulsória, tem obrigatoriedade legal. Sendo assim, os parâmetros para estimar os esforços nas edificações devido à ação dos ventos devem ser obtidos a partir das considerações previstas na Norma Brasileira NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações (ABNT, 2013).

Vale ressaltar que a NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) foi publicada em junho de 1988 a partir do texto original da Norma Brasileira NB-599 publicada em dezembro de 1987. Posteriormente a NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) obteve duas correções em relação ao seu texto original, a primeira em dezembro de 1990 e a segunda em maio de 2013.

Em suma, a NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) vigente, utilizada para desenvolvimento dos projetos estruturais, mantém praticamente o mesmo texto original publicado há 30 anos, exceto por duas curtas erratas publicadas em 1990 e 2013.

A NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) não se aplica às edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos. Segundo a mesma, resultados experimentais obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes na norma.

Nas últimas décadas, os túneis de vento foram uma das mais importantes ferramentas para determinação de parâmetros provenientes da interação vento-estrutura como, pressões dinâmicas, tensões, deformações, esforços, deslocamentos e vibrações (JENSEN; FRANCK, 1963; REINHOLD, 1982; SARKAR et al., 1992; SIMIU; SCANLAN, 1996). Porém, na investigação experimental envolvendo túneis de vento, apesar das análises em modelos em escala reduzida ou em escala real apresentarem resultados confiáveis, sua realização é de alto custo e demanda muito tempo (HÖLSCHER; NIEMANN, 1998; SIMPSON; WHALLEY, 2009; FOX et al., 2000; FORTUNA, 2000).

Quando a determinação das forças e efeitos por meio de túnel se torna inviável, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) promove

alternativas para resolver e analisar problemas envolvendo escoamentos de fluidos ao redor de uma edificação (STATHOPOULOS, 1997; HOOFF; BLOCKEN, 2010; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Os recursos de *CFD* vêm desempenhando papel fundamental para solução de problemas de interação vento-estrutura para a obtenção das pressões dinâmicas.

A realização de simulações em *CFD* na fase de projetos, com diferentes parâmetros de entrada para calibração e direcionamento do modelo experimental, pode otimizar a quantidade e custo de ensaios e reduzir o ciclo de projeto (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). A grande maioria dos *softwares* de *CFD* disponíveis são os que chamamos de “acesso fechado”, ou seja, são ferramentas comerciais que não permitem que faça nenhum tipo de alteração em seu código fonte. Porém, a utilização dessas ferramentas comerciais apresenta em geral dois desafios. A primeira está relacionada com a configuração das modelagens como inserção de dados de entrada, parâmetros, modelos de turbulência e esquemas de interpolação. Outro desafio está na capacidade de processamento acessível aos projetistas e o tempo de processamento necessário, em que muitos utilizam computadores pessoais para processar as simulações.

Com a evolução computacional nas últimas décadas, a utilização de *CFD* tornou indispensável no processo de concepção de estruturas que envolvem aerodinâmica e hidrodinâmica em diversos países tais como Estados Unidos, Japão, Rússia, Alemanha, China entre outros.

1.1 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO

Os danos causados por vento são responsáveis por 85% das perdas econômicas devido a riscos naturais no mundo. As perdas devido aos tornados, bem como de tufões, aumentaram. É particularmente importante para o Japão e a Ásia mitigar os danos causados pelo vento, pois possuem grandes cidades com edifícios altos e áreas residenciais de alta densidade onde a maioria dos edifícios são de madeira (TPU-COE, 2008).

Tendo em vista o disposto no artigo 53, da Lei 4.591/64, a NBR 12721 (ABNT, 2006) fornece as diretrizes para obtenção dos preços dos insumos da construção civil (Custo Unitário Básico - CUB), divulgados mensalmente pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil, nos termos do art. 54 da mesma Lei.

O *21st Century Center of Excellence Program*, financiado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia no Japão, em parceria com a *Tokyo Polytechnic University - TPU*, desenvolveu uma base de dados aerodinâmica realizada com ensaios de túnel de vento com diferentes configurações de edifícios, ângulos de incidência do vento, in-

fluência de edifícios adjacentes, etc. O objetivo desta base de dados é fornecer parâmetros de cálculo para dimensionamento de edifícios pelos engenheiros estruturais. A base de dados foi utilizada pelo presente trabalho para avaliação dos resultados da simulação computacional.

Diferentemente do Japão, o Brasil não apresenta uma base de dados, e sim uma metodologia geral prescrita pela NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) para casos típicos, a qual pode-se demonstrar conservadora frente aos avanços nas pesquisas aerodinâmicas nas últimas décadas.

Segundo o professor Dr. Acir Mércio Loredou-Souza, do LAC (Laboratório de Aerodinâmica das Construções) da UFRGS (LOTURCO, 2010) os custos dos ensaios experimentais possuem diversos níveis de complexidade e o custo é determinado conforme a quantidade dos estudos.

Em São Paulo, o preço aproximado do serviço de ensaio de túnel vento é de R\$ 50 mil (BONAFÉ, 2017), podendo variar de acordo com o tipo de edificação, quantidade de torres, altura e vizinhança. Comparando com o custo do metro quadrado construído em edificações padrão PIS, o ensaio representa o custo de uma unidade da edificação, já que o preço do ensaio equivale a 58 m^2 da área construída referenciada pela CUB padrão PIS de janeiro de 2017 (SINDUSCON-SP,).

A motivação deste trabalho está na necessidade da otimização do dimensionamento estrutural a partir redução dos custos de ensaios experimentais, os quais podem ser balizados com simulações em *CFD*. A realização de simulações em *CFD* na fase de projetos, com diferentes parâmetros de entrada para calibração e direcionamento do modelo experimental, pode otimizar a quantidade de ensaios e reduzir o custo e o ciclo de projeto.

Apesar do custo inicial dos ensaios experimentais na fase de projetos, seus resultados fornecem um detalhamento dos esforços que possibilita a otimização no dimensionamento do projeto e consequentemente uma vantagem econômica em relação ao custo global da fundação, da estrutura principal e dos elementos secundários. A otimização é progressiva em todas as disciplinas e principalmente em obras com repetições da tipologia. Desta forma, a redução do custo global da obra apresenta-se vantajosa frente ao custo inicial dos ensaios experimentais direcionados com a *CFD*.

Cada ensaio experimental é composto habitualmente por diversas simulações da mesma edificação em escala reduzida com diferentes cenários, tais como ângulos de ataque do vento, rugosidade do terreno, efeito da vizinhança, variações topográficas, etc. O que aumenta consideravelmente o custo operacional para realização do ensaio em cada cenário.

Com a utilização de apenas um ensaio experimental para calibração e validação

da simulação computacional, todos os demais cenários podem ser simulados a partir da *CFD* atendendo à exigência da NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) quanto à substituição dos coeficientes da norma por resultados originados de testes experimentais. No entanto, a utilização de ferramentas para simulação em *CFD* apresenta também dois grandes desafios tanto com relação a modelagem do problema quanto ao alto custo computacional.

Uma contribuição relevante deste trabalho, além da otimização do dimensionamento estrutural, está no uso da ferramenta *OpenFOAM* (*Open-source Field Operation And Manipulation*) que, diferentemente da maior parte das ferramentas comerciais utilizadas na literatura, ela é de acesso aberto. Com isso, a ferramenta concede ao projetista uma certa liberdade para executar, acessar e modificar o código fonte, redistribuindo cópias desse código com ou sem modificações sem nenhum custo e sem necessidade de licenças e, assim otimizando ainda mais o custo do projeto.

Além disso, buscando otimizar o custo computacional, foi implementado um *solver* personalizado, a partir do *solver* original *pisoFoam*, presente na biblioteca do *OpenFOAM* para resolver escoamentos incompressíveis, transientes, laminares ou turbulentos para fluidos Newtonianos. O objetivo dessa implementação foi alterar o passo de tempo *on-the-fly* a partir de condicionantes de estabilidade e convergência, ou seja, reduzir o número de iterações com o ajuste automático do passo de tempo durante o processamento com a análise do número de Courant. O presente trabalho buscou implementar o *solver* da ferramenta computacional adotada (*OpenFOAM*) para otimização do custo computacional.

1.2 OBJETIVOS

Visando a otimização dos recursos para execução de estruturas e eficiência no dimensionamento dos projetos, o objetivo principal desse trabalho é analisar a viabilidade no uso de uma ferramenta de *CFD*, o *OpenFOAM*, para o cálculo das pressões dinâmicas devido à ação do vento em edificações, assim como, apresentar um estudo comparativo com os modelos de cálculos utilizados na Norma Brasileira NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) e *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings*.

Além disso, como uma segunda parte, serão realizadas os cálculos dos esforços e deslocamento por meio do acoplamento fraco entre *CFD* e MEF.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos.

O capítulo 1 apresenta a Introdução, que é composta pelos seguintes itens: texto de conceituação e caracterização do tema, seus objetivos e motivação;

O capítulo 2 retrata uma síntese das principais e mais recentes pesquisas em *CFD* aplicada especificamente às edificações.

O capítulo 3 apresenta a metodologia, as equações governantes para simulação em *CFD*, suas aplicações, as considerações sobre a validação. É descrito os métodos de cálculo previstos pelas normas técnicas brasileira e japonesa. Neste capítulo é demonstrado o cálculo pela metodologia do vento sintético, o acoplamento *CFD*-MEF, e por último os modelos experimentais em escala reduzida, baseado na Norma Japonesa *Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004), os quais foram utilizados para as validações dos parâmetros das simulações realizadas através da Dinâmica dos Fluidos Computacional *CFD*.

O capítulo 4 expõe a ferramenta computacional adotada. É demonstrado os procedimentos de análise e os métodos numéricos para simulação computacional dos problemas aerodinâmicos em edificações. O método numérico, a solução do sistema algébrico e as sub-rotinas no processamento.

A capítulo 5 apresenta os resultados das simulações computacionais por *CFD*, os parâmetros geométricos da edificação e do domínio, as condições de contorno adotadas, as propriedades físicas do fluido, as considerações sobre a rotina de processamento quanto à iterações das equações de momento, pressão e transporte, e o *timestep* adotado para o problema.

A capítulo 6 relata as conclusões comparativas entre o simulação computacional em *CFD* e os resultados experimentais e indica algumas recomendações para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

As áreas da engenharia como aeroespacial, mecânica, naval, aeronáutica, química, hídrica, petrolífera possuem um volume de publicações em *CFD* muito superior ao volume na área de engenharia civil. As pesquisas para engenharia aeroespacial ocorrem há mais de 50 anos, enquanto que na área de engenharia civil ocorrem há menos de duas décadas. Desta forma, são recentes as pesquisas e experimentos com a utilização da simulação em *CFD* como ferramenta para avaliar os efeitos dinâmicos exclusivamente em edificações.

A seguir apresenta-se uma síntese das principais contribuições de *CFD* aplicada para análise do efeito do vento em edificações.

FIGURA 2.1 – Momentos nas colunas da face exposta à pressão do vento

Fonte: Chávez (2006)

Na dissertação desenvolvida por Chávez (2006) são analisados os deslocamentos, as acelerações e os esforços em um edifício alto para o carregamento aleatório do vento, através de análises dinâmicas no domínio do tempo. A simulação do efeito turbulento do vento foi feita considerando as características estatísticas relacionadas à natureza do vento e os parâmetros que dependem da rugosidade superficial do terreno. A avaliação do comportamento estrutural pela autora é realizada através do programa computacional ANSYS (Fig. 2.1), baseado no método dos elementos finitos. Os carregamentos representativos do vento são obtidos por superposição de funções harmônicas consistentes com um espectro de vento adotado e aplica-se a técnica de Monte Carlo para avaliação estatística das respostas. Os resultados obtidos são comparados com os resultados usando as recomendações da norma brasileira NBR 6123:1988 (ABNT, 2013). A autora apresenta os resultados de deslocamento do edifício para três abordagens distintas: método estático, método do vento sintético e análise dinâmica simplificada. Foi concluída apenas uma discrepância de aproximadamente 4% para a análise dinâmica e 3,6% para a estática.

Manfrim (2006) analisou numericamente os valores das distribuições de pressões devidas à ação do vento nas paredes e nos telhados de edifícios industriais. Ele realizou as análises através da simulação em *CFD* utilizando-se o programa ANSYS 9.0, considerando-se a interação fluido-estrutura (Fig. 2.2). A geometria do edifício foi

FIGURA 2.2 – Campo de vetor velocidade em um plano longitudinal no eixo da cumeeira. Unidades: $[m/s]$

Fonte: Manfrim (2006)

modelada tridimensionalmente, não possuindo nenhuma abertura na qual foi considerando a inclinação do telhado sempre igual a 15° . Os resultados numéricos obtidos através do ANSYS foram comparados com os valores apresentados na norma NBR-6123:1988, a fim de verificar a viabilidade da utilização da simulação computacional para obtenção das distribuições de pressão em outras estruturas, determinando, assim, o seu comportamento estrutural. A conclusão apontou que os resultados dos coeficientes de pressão resultantes obtidos pelas simulações numéricas foram bem próximos da Norma Brasileira.

Mendis et al. (2007) analisaram que a metodologia de conversão dos efeitos dinâmicos em forças estáticas, que é universalmente aplicado ao projeto de estruturas típicas de baixa a média altura, pode ser inaceitavelmente conservador para projetos de edifícios muito altos (Fig. 2.3). Os pesquisadores consideram que esse tratamento simples pode facilmente levar a erros e subestimações. E mais importante ainda, esse tratamento simplificado para derivar cargas laterais não aborda questões importantes de projeto, incluindo resposta dinâmica (efeitos de ressonância, aceleração, amortecimento, rigidez estrutural), interferência de outras estruturas, direcionalidade do vento que são fatores importantes no projeto do vento de edifícios altos.

FIGURA 2.3 – Perfil médio da ação dos ventos para diferentes terrenos

Fonte: Mendis et al. (2007)

Braun e Awruch (2009) estudaram a simulação da ação do vento através do modelo padrão alto de construção do conselho *CAARC* (*Commonwealth Advisory Aeronautical Council*), conselho o qual foi estabelecido após a Segunda Guerra Mundial com o objetivo de coordenar o desenvolvimento da tecnologia de defesa na área de engenharia aeronáutica da Austrália. Análises aerodinâmicas e aeroelásticas são reproduzidas numericamente para demonstrar a aplicabilidade das técnicas de *CFD* no campo da engenharia eólica (Fig. 2.4). Os pesquisadores consideram que este

trabalho abordou um tópico importante para as primeiras tentativas de simular o comportamento aeroelástico de um edifício alto que emprega técnicas complexas de *CFD*. Os resultados numéricos obtidos são comparados com medições numéricas e de túnel de vento e algumas observações finais importantes sobre a presente simulação também são apresentadas com resultados satisfatórios (BRAUN; AWRUCH, 2009).

FIGURA 2.4 – Simulação do campo de pressões e velocidades por *CFD*

Fonte: Braun e Awruch (2009)

Dagnew et al. (2009) apresentaram uma avaliação numérica das pressões do vento em edifícios altos através de *CFD*, utilizando o modelo *CAARC* (*Commonwealth Aeronautical Advisory Research Council*). Os pesquisadores justificaram que as soluções de dimensionamento da engenharia eólica consistem em testes em túnel de vento de modelos escalonados, testes em escala limitada, medições em campo e testes mecânicos de carga/pressão, e mencionam que a evolução da engenharia eólica computacional baseada em princípios de *CFD* está tornando a avaliação numérica de cargas de vento uma proposta potencialmente atraente. Também reforçaram que esse avanço é particularmente verdadeiro à luz das tendências positivas de desenvolvimento na tecnologia de *hardware* e *software*, bem como na modelagem numérica. O modelo *CAARC* tem sido usado extensivamente para estudar a carga de vento em edifícios altos em estudos de túnel de vento e é geralmente adotado para calibração de técnicas experimentais. Os coeficientes de pressão foram obtidos numericamente

na superfície do edifício *CAARC* sob diferentes configurações de edifícios adjacentes (Fig. 2.5), em comparação com dados de túnel de vento coletados no laboratório RWDI USA LLC para o estudo apresentado. A simulação numérica utilizou principalmente as equações de *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e *LES* (*Large Eddy Simulation*) para alguns casos selecionados. Os autores concluíram que a aplicação de técnicas de *CFD* para prever a carga de vento, no modelo *CAARC* e com diferentes condições ambientais, revela a adequação das ferramentas de *CFD* para avaliações preliminares e explicação detalhada de características aerodinâmicas complexas de edifícios. Consistente com os relatos na literatura, a comparação de dados numéricos com as medições em túnel de vento de contorno realizadas sugeriram que uma análise dependente do tempo, como a análise do *LES*, é fundamental.

FIGURA 2.5 – Coeficientes de pressão externo obtidos por *CFD*

Fonte: Dagnew et al. (2009)

Pasqual (2011) estudou a ação do vento em estruturas de membrana com acoplamento parcial em algumas aplicações tridimensionais, fazendo-se uso do *software* ANSYS versão 11. O pesquisador realizou o acoplamento parcial por realizar a análise do vento e da estrutura em domínios separados. Na primeira análise foram obtidas as pressões de vento sobre uma malha de elementos infinitamente rígidos e in-

deslocáveis com a forma geométrica da membrana. As pressões foram então aplicadas sobre a estrutura, obtendo-se deslocamentos e tensões estáticas. Atualizando-se o domínio do vento para a nova geometria, o pesquisador realizou novos processamentos sucessivamente até que a variação de tensões ou das pressões na estrutura fosse desprezível (Fig. 2.6). Inicialmente ele avaliou as pressões dinâmicas sobre uma membrana com uma malha de elementos rígidos e indeslocáveis. Após o processamento inicial as pressões foram aplicadas na estrutura em outro domínio para avaliar os deslocamentos. Os resultados dos deslocamentos foram atualizados no domínio inicial para obter novas pressões e sucessivamente aplicadas no segundo domínio para obter novos deslocamentos. O procedimento foi realizado de forma iterativa até as diferenças se tornarem insignificantes. O autor conclui que a modelagem numérica em elementos finitos de estruturas de membrana sob ação de ventos mostrou viável tecnicamente para as condições e simplificações estabelecidas, havendo semelhança entre a modelagem do domínio do fluido com o túnel de vento. O pesquisador observou que a maior desvantagem mostrou-se no demorado tempo para modelagem, atualizações de malha e ajustes em parâmetros de convergência. Entretanto, com os avanços computacionais, novos métodos e novos *softwares*, tal prejuízo tende a ser revertido. Por fim, ele cita em sua conclusão que, nas aplicações apresentadas em seu trabalho, o comportamento estrutural da membrana apresentou grandes deformações para equilibrar-se com o carregamento solicitante mostrando-se favorável à segurança quando é realizado acoplamento parcial.

Guerra e Pravia (2014) publicaram no Congresso Latino-Americano da Construção Metálica (Construmetal) uma simulação do túnel de vento por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional para obtenção dos valores aerodinâmicos de sobrepressão e sucção causados devido às ações do vento em edificações industriais em aço ou concreto, e por sua vez confrontá-los com dados de túnel de vento real para sua validação. Para a simulação numérica computacional os pesquisadores utilizaram a ferramenta computacional ANSYS 12.1, considerando a interação fluido-estrutura (Fig. 2.7). A geometria da edificação de estudo foi determinada tridimensionalmente, totalmente vedada e inserida no fluido ar. Os resultados obtidos pelos pesquisadores, em grande maioria, através dos modelos analisados por dinâmica dos fluidos computacional ou análise numérica computacional, conforme concluídos pelos próprios pesquisadores, não apresentaram valores tão precisos quanto os encontrados em túnel de vento.

Sarmiento (2015) realizou simulações numéricas bidimensionais e tridimensionais através do ANSYS-CFX para casos de edifícios fictícios, do aqueduto da transposição do rio São Francisco e também para um caso de edifício real. O pesquisador comparou os resultados obtidos através da Dinâmica dos Fluidos Computacional com os

FIGURA 2.6 – Pressão do vento na 3ª interação [N/m^2]

Fonte: Pasqual (2011)

valores teóricos previstos na NBR 6123:1988 (ABNT, 2013), e para o caso de edifício real, o pesquisador também comparou com resultados experimentais. O autor conclui que o coeficiente de arrasto em escoamentos bi e tridimensionais não deve ser obtido a partir de simulações com modelos estacionários (permanente), mesmo servindo como estimativa da ordem de grandeza, pois o coeficiente de arrasto é instável oscila com o tempo para um dado escoamento de fluido em regime turbulento e uma simulação computacional estacionária pode convergir para um valor incorreto. O pesquisador complementa que obteve bons resultados para regime transiente e ainda que o uso da simulação computacional por *CFD* é de grande importância, pois segundo o pesquisador, as normas vigentes conduzem o dimensionamento para aproximações grosseiras na tentativa de assemelhar a estrutura às geometrias convencionais.

Verma et al. (2015) em suas pesquisas comentam que cargas laterais devido à carga de vento e cargas sísmica, governam o projeto de edifícios altos. A Norma Indiana IS 875 - parte 3 (BUREAU OF INDIAN STANDARDS, 1987) fornece os coeficientes de pressão externa (c_{pe}) somente em ângulos de incidência de 0° e 90° e apenas para poucos casos padrão. Portanto, estudos experimentais se tornam importantes

FIGURA 2.7 – Pressão Total, $L * \frac{b}{h} = 0.10$ e 75°

Fonte: Guerra e Pravia (2014)

FIGURA 2.8 – Escoamento em torno dos edifícios idealizados pelo pesquisador

Fonte: Sarmento (2015)

e um experimento em túnel de vento foi realizado pelos pesquisadores para medir modelos de edifícios altos em diferentes ângulos de incidência de vento. Os pesquisadores mencionam que a *CFD* oferece uma alternativa muito poderosa para prever os fenômenos relacionados com o vento em edifícios ou diferentes tipos de estruturas. Para simulação computacional, os pesquisadores utilizaram o pacote comercial FLUENT-14 (ANSYS 14.0). A análise *CFD* foi realizada considerando os mesmos parâmetros utilizados no estudo experimental. Os edifícios escolhidos no estudo realizado pelos pesquisadores são octogonais em planta. A pressão média ponderada da área do vento nas faces dos modelos de edifícios foi medida para estudar o efeito de vários ângulos de incidência do vento, (0° , 15° e 30°) na distribuição da pressão

do vento (Fig. 2.9). Os autores concluem que a simulação por *CFD* é uma alternativa adequada para prever os fenômenos relacionados com o vento em edifícios e outros tipos diferentes de estruturas. A visualização da separação da camada limite pode ser observada com precisão com a ajuda da simulação de *CFD*. Os pesquisadores justificam que a pressão, o escoamento, o vetor de velocidade e o número de variáveis de parâmetros relacionados, através da superfície do modelo podem ser determinados com a ajuda da análise de *CFD*. Os pesquisadores ressaltam que a precisão dos resultados depende da mesclagem do modelo de geometria e da definição dos valores da propriedade física exatamente como as condições do ambiente realísticas. Por fim, os pesquisadores concluem que o estudo da separação da camada limite e da formação dos vórtices pode ser avaliado facilmente com a ajuda de simulações *CFD* e ainda, que as medidas tratativas para combater os efeitos devidos ao desprendimento de vórtices podem ser aplicadas em conformidade.

FIGURA 2.9 – Campo vetorial de velocidade para construção octogonal a 0° de ângulo de incidência do vento

Fonte: Verma et al. (2015)

Olenkov e Puzyrev (2017) realizaram um estudo que trata de uma simulação numérica dos efeitos do vento na construção da Igreja da Intercessão da Santa Virgem no distrito de Bulzi da região de Chelyabinsk. Os pesquisadores apresentaram um algoritmo para os campos de pressão, os campos de velocidade e os campos de energia cinética de uma corrente de vento, bem como linhas de corrente (Fig. 2.10). Os pesquisadores relatam que a simulação por *CFD* evoluiu há três décadas e tornou-se um ramo separado da ciência cujo tema é uma simulação numérica de diferentes escoamento de fluidos, bem como a solução de problemas emergentes com ajuda de ferramentas computacionais. Os autores justificam que este campo científico, que é de grande valor prático, está se desenvolvendo intensamente. O aumento nas simulações por *CFD* é causado pelo aprimoramento das tecnologias, desenvolvimento de computadores fáceis de usar e polivalentes que estão disponíveis para um am-

plo grupo de pesquisadores. Olenkov e Puzyrev (2017) apresentam as seguintes vantagens do uso da simulação computacional:

- Redução no tempo gasto em projeto e desenvolvimento de um modelo em comparação com um experimento real (variação das condições de contorno);
- O experimento numérico permite a simulação de condições que não são reproduzíveis com testes ambientais (uso de gás ideal como meio ambiente);
- O uso de métodos computacionais de dinâmica fornece ao pesquisador uma informação completa e ampla que é necessária para descrever completamente os diferentes processos do experimento;
- A eficiência econômica dos cálculos computacionais é mais atraente que um experimento;
- Possibilidade de modificar um modelo computacional que garanta tempo eficiente (mudança dos tamanhos dos experimentos computacionais de acordo com o modelo de turbulência escolhido).

Liu et al. (2018) utilizaram informações de vento de uma estação meteorológica para conduzir um estudo em *CFD* da distribuição de vento em uma configuração urbana. Neste estudo os pesquisadores simularam o domínio computacional com estruturas de edifícios detalhadas com a densidade urbanística, além de simular outras regiões com rugosidade (Fig. 2.11). A velocidade média do vento que os pesquisadores obtiveram foi 5.5% maior do que a calculada com o uso de estruturas de construção detalhadas entre a estação meteorológica e a configuração urbana, o que é aceitável para a maioria das aplicações segundo os próprios pesquisadores. O trabalho dos autores explorou então a influência dos edifícios circundantes no escoamento do vento em torno do edifício alvo com diferentes modelos geométricos. Os modelos diferiam em termos dos detalhes geométricos ao redor do edifício. Os resultados mostraram que os edifícios circundantes tiveram um impacto considerável no escoamento de vento ao redor do edifício alvo devido ao efeito de abrigo e canalização. Para os pesquisadores, quando os detalhes das estruturas do edifício vizinho não foram levados em conta, o escoamento de vento ao redor do prédio era impreciso e inaceitável. Eles justificaram que as distribuições previstas de velocidade e pressão do vento melhoraram com um aumento no nível de detalhe das estruturas do edifício vizinhas. Para alcançar resultados aceitáveis, uma simulação de *CFD* deve usar estruturas de construção detalhadas em torno do edifício alvo dentro de um raio de pelo menos três a maior dimensão do edifício alvo. Neste trabalho, Liu et al. (2018) concluíram que os resultados do estudo podem servir como um guia prático para prever o escoamento de ar em torno de uma configuração urbana ou de um edifício.

FIGURA 2.10 – Resultados: a) linhas de corrente; b) campo das velocidades do vento; c) campo de pressões

Fonte: Olenkov e Puzyrev (2017)

Hu et al. (2018) apresentaram casos de simulação de edifícios residenciais com diferentes densidades. Primeiro, os pesquisadores caracterizaram o ambiente eólico de distritos residenciais com diferentes densidades de edificações estabelecidas via simulação numérica computacional realizada. Em seguida, a razão de velocidade do vento (*Wind Speed Ratio - WSS*) e a distribuição da idade do ar (*Age of Air - AA*) foram calculadas nos níveis dos pedestres. Finalmente, foi proposta pelos pesquisadores a relação quantitativa entre o ambiente de vento exterior residencial e a densidade de edifícios. Os pesquisadores demonstram uma correlação linear negativa entre a densidade do edifício e a razão da velocidade média do vento (*Mean*

FIGURA 2.11 – Distribuição da malha nas superfícies das edificações e na zona de perímetro para os modelos $R = 4L$

Fonte: Liu et al. (2018)

Wind Speed Ratio - MWSR) dos distritos residenciais e uma relação linear positiva entre a densidade do edifício e a média de idade do ar (*Mean Age of Air - MAA*) (Fig. 2.12). Quando a densidade de edifícios residenciais aumentou de 0.18 para 0.32, o *MWSR* no distrito diminuiu em 0.18, enquanto o *MAA* aumentou em 58.63 s. Hu et al. (2018) concluem que à medida que a densidade de edifícios residenciais aumenta, o *WSR* dentro do distrito residencial diminui e a idade do ar (*AA*) aumenta, o que afeta o conforto externo dos moradores. A pesquisa forneceu referências para melhorar o ambiente eólico de distritos residenciais de alta densidade e para otimizar o projeto de *layout* residencial.

Medvecká et al. (2018) apresentaram os resultados do coeficiente de pressão externa (c_{pe}) no objeto com seção transversal atípica (Fig. 2.13) obtidos por medições experimentais em um túnel de vento de camada limite (*Boundary Layer Wind Tunnel - BLWT*) da Universidade de Tecnologia da Eslováquia em Bratislava através da simulação computacional de *CFD*. Para os pesquisadores, o carregamento por vento só pode ser adquirido através da execução de testes detalhados e análises numéricas. Na conclusão da pesquisa, os pesquisadores apresentaram uma comparação do coeficiente de pressão externa (c_{pe}) obtido por medidas experimentais e simulação computacional por *CFD*. Segundo eles, bons resultados foram observados nas áreas

FIGURA 2.12 – Resultados do campo de velocidades para determinada densidade dos edifícios

Fonte: Hu et al. (2018)

de sobrepressão embora variações mais expressivas foram observadas nas áreas de sucção.

FIGURA 2.13 – Valores de c_{pe} para modelos numéricos (axonometria nas vistas esquerda, frontal e traseira) 135°

Fonte: Medvecká et al. (2018)

Deraman et al. (2018) realizaram estudos em *CFD* ao longo do telhado de uma casa com telhado de duas águas com inclinação de 26.6° para obter o coeficiente de pressão externa ao redor da casa. Os pesquisadores citam que a validação da análise de *CFD* com dados experimentais requer muitos parâmetros de entrada. Os pesquisadores realizaram as simulações em *CFD* pelo *software* FLUENT 14.0, com o modelo de turbulência *RNG $k-\varepsilon$* . O resultado do *CFD* foi analisado pelos pesquisadores usando teste quantitativo (análise estatística) e comparado com os resultados do

CFD de pesquisas anteriores. A análise estatística da simulação pelos pesquisadores mostraram que os resultados do *CFD* do estudo atual produziram boa concordância e exibiram o erro mais próximo em relação às pesquisas anteriores, segundo os próprios pesquisadores.

Segundo Dogan e Kastner (2018), os pacotes de modelagem de energia, como o *EnergyPlus* e o TRNSYS, vêm com *solvers* para o escoamento do vento capazes de avaliar a ventilação natural em modelos de energia de construção com múltiplas zonas. Essas abordagens dependem de matrizes de coeficientes de pressão de diferentes direções do vento baseadas em edifícios simples em forma de caixa sem obstruções contextuais. Para regiões específicas, no entanto, é necessária mais atenção para evitar a simplificação geométrica (Fig. 2.14). O trabalho foi comparado pelos pesquisadores a outros métodos comumente usados para obter coeficientes de pressão para simulação *Natural Ventilation (NV)*. Os autores mostraram que é possível automatizar e otimizar o cálculo do coeficiente de pressão externa (c_{pe}) baseado em *CFD* e o acoplamento com *AFN (Airflow Network)*. A justaposição de valores de c_{pe} calculados com diferentes métodos demonstrou que a modelagem *NV* ainda está sujeita a grandes incertezas (Fig. 2.15). Os pesquisadores justificam que especialmente em ambientes mais densos, onde as geometrias de construção contextuais alteram os padrões do efeito do vento, que as atuais ferramentas computacionais amigáveis ao usuário superestimam significativamente as taxas de fluxo de ar indu-

FIGURA 2.14 – Modelo CAD do estudo de caso. O caso 1 é simulado sem obstruções contextuais. O caso 2 é simulado com obstruções. Vermelho destaca a zona que foi modelada no *EnergyPlus*

Fonte: Dogan e Kastner (2018)

zidas pelo vento e o potencial de *NV*. Eles ressaltam que deve-se notar que uma geometria bastante simples foi usada para o estudo de caso. Portanto, é provável que o desempenho dos métodos propostos por Swami e Chandra (1998) e pelo método *CpCalc+* (modelo desenvolvido por COMIS (GROSSO, 1992)) sejam menos eficientes para geometrias para as quais as simetrias não podem ser admitidas. Assim, os modelos não são recomendados para geometrias que diferem das cubóides, projetos que estão localizados em topografia montanhosa e prédios com obstruções contextuais significativas, como áreas urbanas. Segundo os pesquisadores, para tais casos, a ferramenta introduzida fornece uma alternativa viável que pode ser usada para análise de *NV* no caso de geometrias de edifícios complexos e áreas urbanas densas. Dogan e Kastner (2018) notam que tanto a configuração do estudo apresentado como o acoplamento com a simulação anual de *AFN* levaram menos de 10 minutos. Além disso, as simulações de *CFD* convergiram em menos de uma hora no hardware utilizado. Como tal, é a esperança dos pesquisadores que a ferramenta apresentada facilite o uso da análise *NV* baseada em *CFD* para estratégias de *design* passivo e sustentável.

FIGURA 2.15 – Coeficientes de pressão na fachada da face de vento (esquerda) e face esquerda (direita) calculada com *CpCalc+* (GROSSO, 1992) e *CFD*. Os gráficos da esquerda referem-se à simulação sem obstruções (edifício isolado), os gráficos à direita da simulação com obstruções (10 edifícios)

Fonte: Dogan e Kastner (2018)

Mallick et al. (2018) apresentam estudos experimentais e numéricos do efeito do vento em edifícios com geometria em planta no formato C (Fig. 2.16), de uso comum,

com proporções variadas e sua otimização causada pela alteração do ângulo de incidência. Os resultados obtidos por análise numérica pelos pesquisadores foram validados com resultados experimentais. A simulação computacional foi realizada utilizando o *software* ANSYS Fluent através do modelo $k-\varepsilon$ de turbulência em várias faces do modelo para ângulos de ataque de 0° a 180° com um intervalo de 30° . Os resultados encontrados por Mallick et al. (2018) através da técnica de *CFD* foram comparados com os resultados experimentais que sugerem a viabilidade de usar a técnica apresentada de previsão de pressões de vento nas edificações de forma eficiente e precisa. Os autores concluíram que a pressão induzida na construção da edificação é significativamente afetada pela geometria do modelo, configuração, relações dimensionais e ângulo de incidência. Os pesquisadores justificam que a variação de pressão no edifício é diretamente influenciada pelo padrão de escoamento do vento. Foi observado que a geração de vórtices e diferentes tipos de mecanismos, tais como a separação do escoamento, *upwash* e *downwash*, ocorrem devido ao comportamento dinâmico do escoamento do vento. Os pesquisadores concluem que todos os erros estão dentro do limite permitido.

FIGURA 2.16 – Padrão do escoamento para ângulo de 30° de incidência do vento

Fonte: Mallick et al. (2018)

A partir de todos os trabalhos supracitados neste capítulo, foi demonstrado que as pesquisas em *CFD*, destinadas especificamente à obtenção dos parâmetros de cálculo utilizados no dimensionamento estrutural das edificações, tem se intensificado nos últimos cinco anos.

A evolução no número de trabalhos publicados na área da Dinâmica dos Fluidos Computacional, aliada ao desenvolvimento constante das ferramentas tecnológicas, permitiu que as simulações computacionais apresentassem resultados consistentes e satisfatórios quando comparados com ensaios experimentais. A Tab. 2.1 apresenta uma síntese evolutiva das pesquisas em *CFD* para edificações.

TABELA 2.1 – Linha do tempo das principais publicações de *CFD* para edificações

Autor/data	Tipo de estrutura	Principais objetivos
Chávez (2006)	Edifício alto generalizado	Deslocamentos, esforços e aceleração
Manfrim (2006)	Edifícios industriais	Distribuição das pressões nas paredes
Mendis et al. (2007)	Edifícios altos	Ressonância, aceleração, amortecimento e rigidez estrutural
Braun e Awruch (2009)	Edifício alto	Comportamento aeroelástico
Dagnew et al. (2009)	Edifício alto	Coeficientes de pressão externa
Pasqual (2011)	Estruturas de membrana	Pressões, deslocamentos e tensões estáticas
Guerra e Pravia (2014)	Edificações industriais	Pressões dinâmicas e velocidades
Sarmiento (2015)	Edifícios altos e aque-duto	Forças nodais por pavimento
Verma et al. (2015)	Edifício octagonal	Coeficientes de pressão externa e velocidades
Olenkov e Puzyrev (2017)	Estruturas especiais (igreja)	Pressão, velocidade, energia cinética linhas de corrente
Liu et al. (2018)	Estruturas adjacentes (vizinhança)	Velocidades, pressões e linhas de corrente
Hu et al. (2018)	Estruturas residenciais (densidades)	Idade do ar, velocidades
Medvecká et al. (2018)	Objeto com seção atípica	Coeficientes de pressão externa
Deraman et al. (2018)	Telhado de casas residenciais	Coeficientes de pressão externa
Dogan e Kastner (2018)	Edificações com obstruções de vizinhança	Coeficientes de pressão externa
Mallick et al. (2018)	Edifício com seção formato C	Vórtices, pressões e velocidades

Fonte: o autor

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo objetiva apresentar os principais conceitos da Dinâmica dos Fluidos Computacional, os tipos básicos das Equações Diferenciais Parciais (EDPs), os principais conceitos para discretizar as EDPs e as técnicas computacionais mais recentes para soluções numéricas empregadas pelas ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho.

Também são apresentados neste capítulo os modelos de cálculo preconizados pelas normas técnicas vigentes no Brasil e no Japão, e os testes em túnel de vento dos modelos em escala reduzida utilizados para validar os resultados da simulação numérica por *CFD* presentes no capítulo 5.

3.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES DA DINÂMICA DOS FLUIDOS

As equações governantes que modelam escoamentos incompressíveis, transientes e isotérmicos são as equações de conservação de massa e de momento, dadas respectivamente, por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i, \quad (3.2)$$

em que u_i ($i = 1, 2, 3$) são as componentes de velocidade, t é o tempo, ρ é a massa específica, p é a pressão, ν é a viscosidade cinemática e f_i ($i = 1, 2, 3$) representa as forças externas.

3.2 MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

A maioria dos escoamentos são turbulentos caracterizados pela flutuação dos campos de velocidade, na qual pode ser definido com uma condição de fluxo caótica, flutuante e aleatória (ASYIKIN, 2012). Estas flutuações aleatórias em um escoamento também transportam importantes quantidades, tais como força e energia. Escoa-

mentos turbulentos são altamente instáveis, tridimensionais e são um processo dependente do tempo. Nesse regime de escoamento a viscosidade passa a ter uma característica randômica, e por essa razão são necessárias maneiras que possam prever esse comportamento para que os termos das equações que envolvem a viscosidade sejam completos. Com isso, há a necessidade de escolha de um modelo de turbulência.

Os modelos de turbulência são ferramentas de simulação utilizados em *CFD* para altos valores do número de Reynolds (superior a 2400). Não existe um modelo de turbulência único que possa lidar perfeitamente com todas as condições do escoamento e configurações geométricas possíveis. Um cálculo das médias é muitas vezes usado para simplificar a solução das equações governantes de turbulência, mas modelos são necessários para representar as escalas do escoamento que não são resolvidos (CHEN, 1997).

Atualmente há uma grande variedade de modelos de turbulência e abordagens de modelagem disponíveis; por exemplo, *Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS*, *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes - URANS*, *Large-Eddy Simulation - LES*, *Implicit Large-Eddy Simulation - ILES* e híbridos *RANS/LES (HRLES)*. Deste modo, durante a análise do problema, deve ser garantido que as aproximações feitas em um determinado modelo de turbulência sejam consistentes com o problema físico que está sendo modelado.

A modelagem de turbulência é uma tecnologia de estimulação para a dinâmica de fluidos computacionais. Não existe um único modelo universal de turbulência que possa lidar de forma adequada com todas as possíveis condições de fluxo e configurações geométricas. Isso é complexo pela multiplicidade de modelos de turbulência e abordagens de modelagem atualmente disponíveis. Deve ser analisado se as aproximações feitas em um determinado modelo de turbulência sejam consistentes com o problema físico que está sendo modelado. O *OpenFOAM* é constituído de uma grande biblioteca base em constante contribuição por pesquisadores e cientistas. Hoje o *OpenFOAM* dispõe de 31 modelos de turbulência *RAS (Reynolds-averaged Navier Stokes)* e 20 modelos de turbulência *LES (large-eddy simulation)*. Estes modelos abrangem um conjunto relativamente grande de problemas de escoamento que incluem variáveis dependentes do tempo, interação de fluido-estrutura e transferência de calor.

São abordados, no presente trabalho, a metodologia proposta para modelagem computacional e a análise comparativa dos resultados experimentais em escala reduzida.

Os valores das pressões dinâmicas dos ensaios em escala reduzida são avaliados

com os resultados obtidos através da *CFD* para o balizamento da metodologia e estimativa dos parâmetros utilizados por métodos numéricos para simulação pela *CFD*.

Considerando as pesquisas já realizadas, o modelo de turbulência adotado para realizar as simulações em *CFD* foi o modelo k - ε Padrão (LAUNDER; SPALDING, 1974), o qual é um modelo de turbulência de duas equações que desenvolve uma equação para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa de dissipação de energia (ε). As equações deste modelo são desenvolvidas a partir de princípios físicos fundamentais e análise dimensional. Os coeficientes do modelo foram calibrados usando escoamentos canônicos e dados experimentais.

Suas principais propriedades são:

- Modelo de duas equações: energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação da turbulência (ε),
- Amplamente utilizado com desempenho conhecido,
- Previsão da energia cinética turbulenta em pontos de estagnação, e
- Requer tratamento próximo à parede.

A equação da energia cinética turbulenta é dada por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (k\mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P - \varepsilon. \quad (3.3)$$

A taxa de dissipação é dada por:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (3.4)$$

A viscosidade turbulenta é obtida usando:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (3.5)$$

Os coeficientes do modelo k - ε Padrão são mostrados na Tab. 3.1.

TABELA 3.1 – Coeficientes do modelo k - ε Padrão

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

Fonte: Launder e Spalding (1974)

Segundo Launder e Spalding (1974), energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ε) são dadas por:

$$k = \frac{3}{2} (\mathbf{I}|u_{ref}|)^2, \quad (3.6)$$

e

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{L}, \quad (3.7)$$

em que $\mathbf{I}$ é a intensidade turbulenta, u_{ref} é a velocidade de referência, C_μ é uma constante empírica igual a 0.09 e L é a escala do comprimento de referência.

3.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Neste trabalho, para as condições iniciais todas as variáveis são prescritas no início dos cálculos (condição de Dirichlet). Nas paredes superior, inferior, frontal e posterior do domínio foram impostas a condição de não deslizamento.

As condições de contorno são requeridas para completar o problema que se deseja resolver. Logo, é necessário estabelecer alguma informação física das variáveis dependentes na fronteira da região limitando o escoamento. Neste trabalho, os seguintes tipos de condições de contorno foram adotados:

- (a) Condição na entrada de fluido (*inlet*): condições de contorno prescritas, ou seja, a componente normal da velocidade do escoamento é prescrita e a componente tangencial é nula. Valores pré-estabelecidos para k e ε também são impostos nas entradas.
- (b) Condição na saída de fluido (*outlet*): assume-se que o escoamento está completamente desenvolvido com pressão estática igual zero Pa.
- (c) Condição sobre uma superfície rígida: condição de contorno sem deslizamento (*no slip*). Esta condição significa que o fluido deve ser fixado à superfície, ou seja, $u = 0$.
- (d) Para a temperatura, as condições contorno são:
 - Fontes de calor com temperaturas constantes;
 - Paredes adiabáticas com temperaturas constantes e impostas.

- (e) Próximo às paredes, para as variáveis k e ε , foi aplicada a função de parede *wall function* (DURBIN, 1993; SONDAK; PLETCHER, 1995). A distância da parede das células adjacentes à parede deve ser determinada considerando-se a taxa sobre o qual a lei logarítmica é válida. Essa distância é dada por:

$$y^+ = \frac{y \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}{\nu}, \quad (3.8)$$

em que y é a distância da parede, ρ é a densidade, ν é a viscosidade cinemática e τ_0 a tensão de cisalhamento na parede.

A lei logarítmica é válida para $30 < y^+ < 60$, com um valor desejável de $y^+ \approx 30$. Quando $y^+ < 11.2$, a ferramenta aplica a lei linear (laminar).

3.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

Uma análise em *CFD* bem-sucedida exige as seguintes informações:

- Uma grade de pontos para armazenar as variáveis calculadas pela *CFD*;
- Condições de contorno necessárias para definir os valores nos limites do domínio de escoamento que permitirão que os valores de todas as variáveis sejam calculados;
- As propriedades do fluido, tais como viscosidade e condutividade térmica.

O procedimento completo de análise de *CFD* pode ser dividido nos seguintes estágios:

3.4.1 Premissas iniciais

É muito importante entender o máximo possível sobre o problema que está sendo simulado para defini-lo com precisão. Esta etapa envolve a coleta de todos os dados necessários para a simulação, incluindo detalhes geométricos, propriedades do fluido, especificações de escoamento e condições iniciais e de limite.

Uma análise de dinâmica de fluidos incompressível:

- é aquela em que o campo de velocidade é livre de divergência e a pressão não contém um componente termodinâmico;

- é aquela em que a energia contida nas ondas acústicas é pequena em relação à energia transportada pela advecção (ou seja, quando o número Mach está no intervalo $0 \leq M \leq 0.3$);
- pode ser laminar ou turbulento, estável ou dependente do tempo;
- pode ser usado para estudar escoamentos internos ou externos;
- pode incluir forças de transporte de energia e flutuabilidade;
- pode ser usado com uma malha de deformação para formulação Lagrangiana-Euleriana Arbitrária *ALE*; e
- pode ser realizado com transferência de calor conjugada ou interação fluido-estrutura.

3.4.2 Geração de malha

Neste estágio, o espaço contínuo do domínio de escoamento é dividido em células discretas suficientemente pequenas, cuja distribuição determina as posições nas quais as variáveis de escoamento devem ser calculadas e armazenadas. Gradientes variáveis são geralmente calculados com maior precisão em uma malha fina do que em uma malha grossa. Uma malha fina é, portanto, particularmente importante em regiões onde são esperadas grandes variações nas variáveis do escoamento. Uma malha fina, no entanto, requer mais poder computacional e tempo. O tamanho da malha é otimizado pela realização de um teste de independência de malha pelo qual, começando com uma malha grossa, o tamanho da malha é refinado até que os resultados da simulação não sejam mais afetados por qualquer refinamento adicional.

3.5 MÉTODOS DE CÁLCULO DAS PRESSÕES DINÂMICAS EM EDIFICAÇÕES

3.5.1 Cálculo segundo NBR 6123:1988 (ABNT, 2013)

A Norma Brasileira 6123 destinada para o cálculo das forças horizontais devido à ação do vento foi reimpressa a partir da Norma Brasileira NB-599. A reimpressão do texto ocorreu em 1988 com alteração da abreviatura de NB para NBR e do número 599 para 6123.

O texto da NB-599 reimpresso em 1988 sofreu duas erratas pontuais, a primeira em dezembro de 1990 e a segunda em maio de 2013 com correções pontuais nos

coeficientes de uma das tabelas de cálculo.

A partir de então não houve correções, sendo assim, a norma vigente para dimensionamento de todas as edificações no Brasil possui seu texto praticamente igual há 30 anos, o qual não houve atualizações das isopletras de velocidade básica, das considerações dos modelos de cálculo, nos parâmetros de dimensionamento, etc., embora as publicações, pesquisas e experimentos na área aerodinâmica nos últimos trinta anos foram muito significativos e expressivos.

Deve ser ressaltado que a NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) não é aplicável para edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum. A norma cita que nestes casos devem ser realizados estudos especiais para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos. Entre os estudos especiais, a NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) permite que resultados experimentais obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, possam ser usados em substituição aos coeficientes estabelecidos pela norma.

As forças oriundas do vento que atuam sobre as edificações devem ser calculadas separadamente para cada um dos casos abaixo:

- elementos de vedação e suas fixações (telhas, vidros, esquadrias, painéis de vedação, etc.);
- partes da estrutura (telhados, paredes, etc);
- a estrutura como um todo.

3.5.1.1 Pressões oriundas do vento

As forças estáticas oriundas do vento são determinadas pela expressão:

$$q_k = 0.613V_k^2, \quad (3.9)$$

em que V_k é a velocidade característica do vento e q é a pressão dinâmica do vento, sendo q em N/m^2 e V_k em m/s .

A norma prescreve que a velocidade característica é obtida pela influência de três fatores:

- Topografia;
- Rugosidade do terreno, dimensão e altura da edificação;
- Estatística quanto ao grau de segurança e vida útil da edificação.

3.5.1.2 Velocidade do vento

A velocidade característica do vento (velocidade média), é calculada por:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3, \quad (3.10)$$

em que V_0 é a velocidade básica obtida pelo gráfico das isopletas S_1 , é o fator topográfico, S_2 é o fator que considera a rugosidade do terreno, dimensões e altura da edificação e S_3 é o fator baseado em conceitos probabilísticos.

3.5.1.3 Coeficiente de pressão externa

O coeficiente de pressão externa é descrito pela NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) como:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q}, \quad (3.11)$$

em que c_{pe} é a coeficiente de pressão externa, Δp_e é a pressão externa efetiva e q é a pressão dinâmica do vento.

A NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) cita que o coeficiente de pressão externa c_{pe} é obtido a partir da pressão externa efetiva em um ponto da superfície da edificação e o coeficiente de forma externo (C_e) é obtido a partir força externa agindo sobre uma superfície da edificação. Como a norma considera que a pressão interna é uniformemente distribuída, o coeficiente de pressão interna é igual ao coeficiente de forma interno, ou seja, $c_{pi} = C_i$.

Já o coeficiente de pressão externa c_{pe} não é admitido constante, sendo assim as superfícies em que ocorrem variações consideráveis de pressão externa foram subdivididas com os respectivos coeficientes de forma externo (C_e), conforme Fig. 3.1.

Os coeficientes de forma externo (C_e), descritos pela NBR 6123:1988 (ABNT, 2013), os quais representam a força do vento atuando sobre um elemento plano da edificação de área A , é dado por:

$$C_e = \frac{F_e}{qA}, \quad (3.12)$$

em que C_e é a coeficiente de forma externo, F_e é a força externa agindo sobre a superfície de área A , q é a pressão dinâmica do vento e A é a área do elemento analisado.

FIGURA 3.1 – Coeficientes de pressão e de forma externos

Altura relativa		Valores de C _e para								c _{pe} médio
		α = 0°				α = 90°				
		A ₁ e B ₁	A ₂ e B ₂	C	D	A	B	C ₁ e D ₁	C ₂ e D ₂
0,2 b ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,8	- 0,5	+ 0,7	- 0,4	+ 0,7	- 0,4	- 0,8	- 0,4	- 0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,8	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,0
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,9	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,9	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,6	- 0,9	- 0,5	- 1,1
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 1,0	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 1,0	- 0,5	+ 0,8	- 0,3	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2

s: a) Para a/b entre $3/2$ e 2 , interpolar linearmente.

b) Para vento a 0° , nas partes A_3 e B_3 , o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:

- para $a/b = 1$: mesmo valor das partes A_2 e B_2 ;
- para $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$;
- para $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente.

c) Para cada uma das duas incidências do vento (0° ou 90°), o coeficiente de pressão médio externo c_{pe} médio, é aplicado à parte de barlavento das paredes paralelas ao vento, em uma distância igual a $0,2b$ ou h , considerando-se o menor destes dois valores.

d) Para determinar o coeficiente de arrasto, C_s , deve ser usado o gráfico da Figura 4 (vento de baixa turbulência) ou da Figura 5 (vento de alta turbulência - ver 6.5.3).

FIGURA 3.2 – Coeficientes de pressão e de forma externos na cobertura

Altura relativa	θ	Valores de C_e para				c_{pe} médio			
		$\alpha = 90^\circ (A)$		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1
	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				
	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7				
	60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7

Notas: a) O coeficiente de forma C_e na face inferior do beiral é igual ao da parede correspondente.

b) Nas zonas em torno de partes de edificações salientes ao telhado (chaminés, reservatórios, torres, etc.), deve ser considerado um coeficiente de forma $C_e = 1,2$, até uma distância igual à metade da diagonal da saliência vista em planta.

c) Na cobertura de lanternins, c_{pe} médio = - 2,0.

d) Para vento a 0° , nas partes I e J o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:

$a/b = 1$: mesmo valor das partes F e H; $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$.

Interpolar linearmente para valores intermediários de a/b .

Fonte: NBR 6123:1988 (ABNT, 2013)

3.5.2 Cálculo segundo *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004)

A Norma Japonesa intitulada como *Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) teve sua revisão publicada em 2004, a qual mantém praticamente os mesmos procedimentos para obtenção das cargas atuantes nas edificações em relação à versão anterior publicada em 1993.

O principal escopo desta revisão foi incorporar os desenvolvimentos mais recentes em modelos de carga e procedimentos de avaliação durante 10 anos após a versão anterior. Critérios baseados em desempenho também foram incorporados nesta atualização.

As ações apresentadas na Norma Japonesa são avaliadas como cargas estáticas equivalentes. Foi introduzido o conceito de “valor básico da carga”, o qual indica um valor característico para cada intensidade da carga com base em estimativa probabilística. A estimativa média com variabilidade quantitativa tem como objetivo esclarecer a objetividade da avaliação da carga.

As cargas do vento para o projeto de edifícios pela *Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) são especificadas individualmente para os três casos a seguir:

- cargas de vento horizontal para pórticos estruturais (carga global na estrutura principal);
- cargas de vento para telhados/coberturas; e
- cargas de vento para componentes/revestimento (carga local nas estruturas secundárias).

As cargas globais devem ser determinadas individualmente em todas as direções do vento e de possível torção.

3.5.2.1 Pressões oriundas do vento

A pressão gerada pela velocidade de projeto do vento é calculada a partir da Eq. 3.13:

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2, \quad (3.13)$$

em que q_H é a pressão da velocidade de projeto, ρ é a densidade do ar e U_H é a velocidade de projeto do vento que depende da direção do vento.

3.5.2.2 Velocidade do vento

A velocidade de projeto do vento é calculada a partir da Eq. 3.13:

$$U_H = U_0 K_D E_H K_{rW}, \tag{3.14}$$

em que U_H é a velocidade de projeto do vento, U_0 é a velocidade básica do vento, K_D é o fator da direção do vento, E_H é o fator do perfil da velocidade do vento na altura de referência H , K_{rW} é o fator de conversão do período de retorno.

FIGURA 3.3 – Velocidade básica do vento U_0

Fonte: *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004)

3.5.2.3 Pressões dinâmicas por tipo de estrutura

A carga do vento em pórticos estruturais (estrutura principal) são calculadas a partir da Eq. 3.15:

$$W_D = q_H C_D G_D A, \quad (3.15)$$

em que W_D é a pressão oriunda do vento na altura Z em N , q_H é a pressão da velocidade de projeto em N/m^2 , C_D é o coeficiente da força do vento (coeficiente de arrasto), G_D é o coeficiente do efeito rajada do vento e A é área de projeção do vento na altura Z em m^2 .

As cargas de vento para telhados/coberturas são calculadas a partir da Eq. 3.16:

$$W_R = q_H C_R G_R A_R, \quad (3.16)$$

em que W_R é a pressão oriunda do vento em telhados/coberturas em N , q_H é a pressão da velocidade de projeto em N/m^2 , C_R é o coeficiente da força do vento para telhados/coberturas, G_R é o coeficiente do efeito rajada do vento para telhados/coberturas e A_R é área do(a) telhado/cobertura em m^2 .

As cargas de vento para componentes/revestimento (carga local nas estruturas secundárias) são calculadas a partir da Eq. 3.17:

$$W_C = q_H \hat{C}_C A_C, \quad (3.17)$$

em que W_C é a pressão oriunda do vento no componente/revestimento em N , q_H é a pressão da velocidade de projeto em N/m^2 , $\hat{C}_C$ é o coeficiente de força do vento de pico e A_C é área do componente/revestimento em m^2 .

3.5.2.4 Intensidade turbulenta

A intensidade da turbulência é definida de acordo com as condições da obra conforme Eq. 3.18:

$$I_Z = I_{rZ} E_{gI}, \quad (3.18)$$

em que I_Z é a intensidade turbulenta, I_{rZ} é a intensidade de turbulência na altura Z por categoria de terreno plano e E_{gI} é o fator topográfico para intensidade turbulenta.

A intensidade de turbulência na altura Z por categoria de terreno plano é dado

conforme Eq. 3.19:

$$I_{rZ} = \begin{cases} 0.1 \left(\frac{Z}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & Z_b < Z \leq Z_G \\ 0.1 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & Z \leq Z_b, \end{cases} \quad (3.19)$$

em que I_{rZ} é a intensidade turbulenta na altura Z por categoria de terreno, Z é a altura acima do solo e Z_b, Z_G, α são parâmetros que determinam o fator de exposição (tabelados).

A escala de turbulência é definida independentemente da categoria de terreno conforme Eq. 3.20

$$L_Z = \begin{cases} 100 \left(\frac{Z}{30} \right)^{0.5} & 30m < Z \leq Z_G \\ 100 & Z \leq 30m, \end{cases} \quad (3.20)$$

em que Z é a altura acima do solo e Z_G é o parâmetro que determina o fator de exposição (tabelado).

3.5.2.5 Coeficiente de pressão externa

Os coeficientes de pressão externa segundo a *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) são separados em dois grupos principais: para edifícios inferiores a 45 metros de altura e edifícios com alturas superiores a 45 metros.

Os coeficientes de pressão externa para edifícios com seções retangulares e alturas superiores a 45 metros, nas fachadas a barlavento e sotavento, e na cobertura, para edifícios cujas relações de aspecto H/B são menores ou iguais a 8, são dados na Fig. 3.4:

FIGURA 3.4 – Coeficientes de pressão externa C_{pe} para edifícios com seções retangulares e alturas superiores a 45m

Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings (AIJ, 2004)

Os coeficientes de pressão externa C_{pe} para edifícios com seções retangulares e coberturas planas e telhados com uma água, cujas alturas são menores ou iguais a 45m são apresentados na Fig. 3.6:

FIGURA 3.5 – Coeficientes de pressão externa C_{pe} para edifícios com seções retangulares e coberturas, cujas alturas são menores ou iguais a 45m (cont.)

i) Wall

zone W_U (windward wall)

$B/H \leq 1$	$B/H > 1$
$0.8k_z$	0.6

zone S (side wall)

S _a	S _b	S _c
-0.7	-0.4	-0.2

k_z is factor for vertical profile provided in Table A6.8.

When $0.8H < Z_b$, $k_z = 0.8^{2\alpha}$.

zone L (leeward wall)

wind dir.	roof angle θ (°)	L _a		L _b	
		$D/H \leq 1$	$D/H > 1$	$B/H < 6$	$B/H \geq 6$
W ₁	$\theta \leq 45$	-0.6	-0.4	same value as zone L _a	-0.8
W ₂	$\theta < 20$		-0.5		
W ₃	$20 \leq \theta < 30$				
	$30 \leq \theta \leq 45$	-0.6			-1.0

ii) Roof

zone R_U (windward roof)

	roof angle θ (°)	$D/H \leq 1$		$D/H > 1$	
		$B/H \leq 2$	$B/H \geq 6$	$B/H \leq 2$	$B/H \geq 6$
Positive	$\theta < 10$	not necessary to evaluate			
	$10 \leq \theta < 15$	0			
	$15 \leq \theta \leq 45$	$0.014(\theta - 15)$			
Negative	$\theta < 10$	same value as zone R (roof)			
	$10 \leq \theta < 30$	$-0.84\tan(70-2\theta)$	$-0.81\tan(72-1.6\theta)$	$0.04(\theta - 30)$	$-0.5\tan(80-2\theta)$
	$30 \leq \theta < 35$			0	
	$35 \leq \theta < 40$	0			
	$40 \leq \theta \leq 45$				0

* Linear interpolation is permitted for $2 < B/H < 6$.

zone R_L (leeward roof)

roof angle θ (°)	R _{L,a}		R _{L,b}	
	$D/H \leq 1$	$D/H > 1$	$B/H < 6$	$B/H \geq 6$
$\theta < 10$	same values as zone R (roof)			
$10 \leq \theta < 15$	-0.6	-0.5	same value as zone R _{L,a}	-1.1
$15 \leq \theta \leq 45$		-0.6		-1.4

zone R (roof)

	R _a		R _b	R _c
	$D/H \leq 1$	$D/H > 1$		
$B/H \leq 2$	-1.0	-0.8	-0.4	-0.2
$B/H \geq 6$	-1.2	-1.0	-0.6	-0.4

* L near interpolation is permitted for $2 < B/H < 6$.

FIGURA 3.6 – Coeficientes de pressão externa C_{pe} para edifícios com seções retangulares e coberturas, cujas alturas são menores ou iguais a 45m)

Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings (AIJ, 2004)

3.5.2.6 Coeficientes de força do vento

Os coeficientes de força do vento e os coeficientes de pressão do vento são apresentados em duas categorias correspondentes ao projeto das estruturas (coeficientes globais para a estrutura principal) e componentes/revestimentos (coeficientes locais para as estruturas secundárias).

Os coeficientes podem ser estimados a partir de experimentos em túnel de vento ou do procedimento a seguir, usando os coeficientes de pressão externa e interna e coeficientes de força do vento.

Os coeficientes de força em pórticos estruturais (estrutura principal) são calculados a partir da Eq. 5.9:

$$C_D = C_{pe1} - C_{pe2}, \quad (3.21)$$

em que C_D é o coeficiente de força do vento, C_{pe1} é o coeficiente de pressão externa na face de barlavento e C_{pe2} é o coeficiente de pressão externa na face de sotavento.

Os coeficientes de força em telhados/coberturas são calculadas a partir da Eq. 3.22:

$$C_R = C_{pe} - C_{pi}, \quad (3.22)$$

em que C_R é o coeficiente de força do vento para telhados/coberturas, C_{pe} é o coeficiente de pressão externa no telhados/coberturas e C_{pi} é o coeficiente de pressão interna.

Os coeficientes de força do vento de pico são calculados a partir da Eq. 3.23

$$\hat{C}_C = \hat{C}_{pe} - C_{pi}^*, \quad (3.23)$$

em que $\hat{C}_C$ é o coeficiente de força do vento de pico, $\hat{C}_{pe}$ é o coeficiente de pressão externa do vento de pico e C_{pi}^* é o coeficiente para efeito de pressões internas flutuantes.

3.5.3 Vento sintético

A modelagem das pressões flutuantes do vento proposta Franco (1993) consiste em calcular os esforços solicitantes ao longo do tempo através de um conjunto de

funções harmônicas.

Os harmônicos foram determinados com a decomposição do espectro de potência em 11 partes, sendo uma parte compatível com a ressonância da estrutura a partir da utilização do método de elementos finitos com o programa SAP-90. Cada amplitude é dada por:

$$C_k = \sqrt{2 \int_k S(n) dn}. \quad (3.24)$$

FIGURA 3.7 – Espectro e espectro reduzido

Fonte: Franco e Medeiros (2011)

Com o avanço tecnológico, foi possível realizar análises dinâmicas mais complexas para estruturas submetidas às solicitações harmônicas, o que possibilitou que Franco e Medeiros (2011) desenvolvessem novos critérios de cálculo do coeficiente normalizado c_k .

A variância σ_p^2 do espectro $S(n)$ de potência das pressões sobre a área é dada por:

$$\sigma_p^2 = \int_0^\infty S(n) dn. \quad (3.25)$$

O produto do desvio padrão pelo fator de pico é o pico da pressão flutuante (p_f):

$$p_f = g_p \sigma_p. \quad (3.26)$$

A parcela da pressão flutuante é calculada como:

$$p(t) = \sum_1^m c_k p_f \cos(\omega_{k,t} - \theta_k). \quad (3.27)$$

Como a potência média é igual a variância, temos:

$$\sum_1^m c_k^2 = \frac{2}{g_p^2}. \quad (3.28)$$

Sendo o valor de pico calculado por:

$$g_p = \frac{1}{2K_p \sqrt{6C_{as}}}. \quad (3.29)$$

Os valores de K_p e de C_{as} são apresentados nas Tabs. 3.2 e 3.3:

TABELA 3.2 – Valores de K_p

Categoria	K_p
I	1.201
II	0.733
III	0.528
IV	0.359
V	0.176

Fonte: Franco e Medeiros (2011)

TABELA 3.3 – Valores de C_{as} [10^3]

Categoria	C_{as}
I	2.8
II	6.5
III	13
IV	30
V	83

Fonte: Franco e Medeiros (2011)

A média do fator de pico para as cinco categorias de terreno da NBR 6123:1988

(ABNT, 2013) é aproximadamente igual a 3.5, portanto o c_k pode ser calculado por:

$$c_k = \frac{C_k}{\sqrt{6.125 \sum_1^m C_k^2}}. \quad (3.30)$$

A partir das excitações oriundas do vento, é obtido um carregamento quase estático e uma pressão flutuante para os 11 harmônicos, sendo o carregamento harmônico da parcela flutuante do vento conforme Eq. 3.32:

$$F_f(t) = q_f \sin(\omega_i t), \quad (3.31)$$

em que F_f é o carregamento harmônico da parcela flutuante, q_f é o vetor carga da parcela flutuante, ω_i é a frequência do modo i e t é o instante.

Por fim, as forças totais atuantes é a soma das cargas permanentes, da parcela estática do vento e da parcela flutuante do vento em determinado instante t :

$$\hat{F}(t) = F_{z,i} + F_{m,i} + F_{f,i}, \quad (3.32)$$

em que $\hat{F}(t)$ é a carga total, $F_{z,i}$ é a carga permanente, $F_{m,i}$ é parcela estática do vento e $F_{f,i}$ é a parcela flutuante do vento.

3.5.4 Acoplamento CFD-MEF

A deformabilidade da edificação em problemas de interação fluido-estrutura pode ser abordada de duas formas, com o processamento das condições de compatibilidade e de equilíbrio simultaneamente (acoplamento forte ou bilateral) ou com o processamento da solução dos sistemas algébricos de forma sequencial em domínios diferentes (acoplamento fraco ou unilateral).

O fluxograma das rotinas de processamento do acoplamento particionado é apresentado na Fig. 3.8 (OLIVEIRA FILHO, 2020).

FIGURA 3.8 – Fluxograma do acoplamento fraco *CFD*-MEF

OLIVEIRA FILHO (2020)

3.5.5 Modelo experimental por túnel de vento

Um banco de dados aerodinâmico foi desenvolvido pela *Tokyo Polytechnic University* como parte dos Efeitos do Vento sobre Edifícios e Ambiente Urbano, o Programa do Centro de Excelência do Século XXI, financiado pelo Ministério da Educação, Cultura, Esportes, Ciência e Tecnologia do Japão. O objetivo desta base de dados é fornecer para os engenheiros estruturais, parâmetros dos ensaios de túneis de vento em diversas geometrias diferentes de edificações altas e baixas, além de fornecer resultados sobre os efeitos de prédios na vizinhança. Os contornos dos valores estatísticos dos coeficientes de pressão do vento locais, gráficos de valores estatísticos dos coeficientes de pressão média do vento da área nas superfícies das fachadas e dados de séries temporais dos coeficientes de pressão do vento foram ensaiados para 394 casos. Estes dados foram usados para validar com os resultados das simulações em *CFD*.

FIGURA 3.9 – Dimensões do modelo. Unidades: $[cm]$

Fonte: TPU-COE (2008)

FIGURA 3.10 – Túnel de vento da *Tokyo Polytechnic University* - TPU

Fonte: TPU-COE (2008)

FIGURA 3.11 – Planta do túnel de vento da TPU

Fonte: TPU-COE (2008)

3.5.5.1 Categoria adotada quanto à rugosidade do terreno

Uma vez que muitas edificações baixas estão localizados em áreas suburbanas no Japão e em outros países, o terreno suburbano, correspondente à categoria de

terreno III do AIJ (2004), foi escolhido como o campo de vento ensaiado. Esta categoria tem um expoente médio do perfil de velocidade do vento de 0.20 e uma altura de gradiente de 450 metros. O ensaio experimental foi realizado com torres geradoras de turbulência, elementos de rugosidade e um tapete no piso a montante da seção de testes do túnel de vento. O perfil da velocidade do vento e o perfil da intensidade de turbulência do campo de vento simulado são mostrados na Fig. 3.12. A densidade de turbulência a uma altura de 10 cm foi de cerca de 0.25. A velocidade do vento de teste a esta altura era de cerca de 7.3m/s , correspondendo a 22m/s para uma altura de 10 metros em escala real.

FIGURA 3.12 – Perfil de velocidades simulado utilizado nos testes experimentais

Fonte: TPU-COE (2008)

A categoria de terreno III é caracterizada por obstruções estreitamente espaçadas de até 10 metros de altura, ou por edifícios altura média esparsamente espaçados de 4 a 9 andares. Áreas residenciais suburbanas, manufaturas locais e campos arbo-

rizados são típicos dessa categoria. A área onde a relação da área construída está entre 10% e 20%, ou a área da construção é maior que 10%, enquanto a proporção de edifícios altos (área planejada de edifícios maiores que 4 andares dividida pela área total de edifícios) é menor de 30%. O exemplo na Fig. 3.13 é uma área com uma relação de área de construção de 30% e uma taxa de construção elevada de 5 a 20%.

FIGURA 3.13 – Tipos de rugosidade do terreno segundo a *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* AIJ (2004)

(a) Terrain category I

(b) Terrain category II

(c) Terrain category III

(d) Terrain category IV

(e) Terrain category V

Fonte: Fotos fornecidas por Kindai Aero Inc. (AIJ, 2004)

3.5.5.2 Sistema de medição de pressão de vento

As tomadas de medição da pressão do vento foram dispostas uniformemente sobre as superfícies dos modelos testados. Foram instalados sensores de pressão a cada 20mm o que corresponde a 2m em escala real. Como a medição da pressão do vento não mediu um grande número de derivações de forma síncrona, alguns pontos internos nas superfícies das paredes onde as pressões foram suavemente medidas foram mostrados na Fig. 3.14. Foram instalados tubos de resina sintética com 80cm de comprimento e 1.2mm de diâmetro interno conectados um ao outro com uma varredura de pressão, o que permitiu a medição das pressões do vento em sincronia através de cada sensor.

FIGURA 3.14 – Sensores de pressão acoplados no modelo para ensaio de túnel de vento

Fonte: TPU-COE (2008)

3.5.5.3 Processamento de dados do ensaio

Inicialmente, os sinais de voltagem elétrica foram traduzidos em séries temporais de pressão de vento com os dados de calibração dos sensores. Depois disso, o efeito do sistema de tubos na pressão do vento medido foi eliminado dividindo a função de transferência do espectro de potência da pressão bruta do vento. A função

de transferência do sistema de tubos é apresentada na Fig. 3.15. Este sistema de conversão é chamado de “técnica de varredura de frequência”.

FIGURA 3.15 – Função de transferência do sistema de tubos

Fonte: TPU-COE (2008)

A série temporal dos coeficientes de pressão do vento é calculada como:

$$C_{pe,ori}(i, t) = \frac{p(i, t)}{p_H}, \quad (3.33)$$

em que $C_{pe,ori}(i, t)$ é o coeficiente de pressão medido no sensor i no tempo t , $p(i, t)$ é a pressão do vento medida no sensor i no tempo t e p_H é a pressão não perturbada do vento medida na altura da edificação.

As séries temporais dos coeficientes de pressão do vento se desenvolveram em média como:

$$C_{pe}(i, t) = \overline{C_{p,ori}(i, t - \Delta t/2 \sim t + \Delta t/2)}, \quad (3.34)$$

em que Δt é a duração do coeficiente de pressão.

A base de dados disponibilizada mostra três tipos de dados: valores estatísticos

de coeficientes de pressão de vento locais, valores estatísticos de coeficientes de pressão de vento média de área e séries temporais de coeficientes de pressão de vento pontuais. Os dados da série temporal estavam em média a cada $0.006s$, correspondendo a $0.2s$ em escala total. Os valores estatísticos dos coeficientes de pressão média do vento da área foram calculados com média móvel a cada $0.006s$ correspondendo a durações de $0.2s$ em escala real. Os valores estatísticos dos coeficientes de pressão de vento locais foram calculados com coeficientes de pressão de vento pontual, com média móvel a cada $0.03s$, de modo que as suas durações foram de 1.0 segundo em escala real.

Os resultados do ensaio de túnel de vento utilizados neste trabalho são de uma edificação de 10×20 metros em planta com altura de 30 metros. O modelo em escala apresenta as dimensões em planta de 0.1×0.2 metros com altura de 0.3 metros. Os sensores de monitoramento de pressão do ensaio de túnel de vento estão apresentados na Figura 3.14.

Os valores estatísticos dos coeficientes de pressão são disponibilizados no sistema de banco de dados. Os valores estatísticos do coeficiente de pressão média da área são expressos com gráficos em função do ângulo de direção do vento. Séries temporais de coeficientes de pressão de vento pontual são armazenadas no formato de dados MATLAB disponibilizados pela TPU-COE (2008).

Os contornos dos valores estatísticos dos coeficientes de pressão de vento locais calculados a partir da Eq. 3.34 com uma duração de $1s$ em escala real foram representados em curvas de isovalores. A base apresenta quatro tipos de valores estatísticos: média, RMS, positivo extremo e negativo extremo. Os valores médios e RMS foram os valores médios de dez amostras:

FIGURA 3.16 – Coeficientes de pressão média sobre fachada frontal por ângulo de incidência

Fonte: TPU-COE (2008)

4 METODOLOGIA NUMÉRICA

Este capítulo apresenta a ferramenta computacional adotada e os métodos numéricos utilizados para discretização das equações diferenciais.

4.1 FERRAMENTA COMPUTACIONAL ADOTADA

Neste trabalho optou-se pela ferramenta computacional *Open-source Field Operation And Manipulation (OpenFOAM)* versão 6, a qual possui pré e pós-processamento para solução de problemas de mecânica dos meios contínuo e em especial *CFD*.

O *OpenFOAM* é livre e possui seu código fonte aberto em *C++*, o que permite ao usuário modificar, implementar ou criar objetos personalizados tais como condições de contorno, modelos de turbulência, *solvers*, etc.

Uma das vantagens oferecidas por esta ferramenta computacional é forma clara e objetiva que são expressas as equações a serem resolvidas em sua sintaxe. As operações com tensores e equações diferenciais parciais são realizadas com programação orientada a objetos.

A solução das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis apresenta uma série de rotinas algorítmicas devido à condição de velocidade livre de divergência e à resolução espacial/temporal concomitante necessárias para obter soluções em geometrias complexas para aplicações nas análises em *CFD*. A implementação baseada nos contornos foi desenvolvida para as rotinas de criação de malhas em todas as equações de transporte, permitindo uma implementação automática que abranja diferentes topologias de elementos, com elementos tetraédricos, hexaédricos e poliedricos arbitrários, os quais devem ser dimensionados e analisados de acordo com o nível de precisão adotado para a solução.

A codificação do *solver icoFoam* em *C++* expressa na Fig. 4.1 representa a equação de conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p, \quad (4.1)$$

em que $\mathbf{U}$ é a velocidade, t é o tempo, ϕ é uma propriedade volumétrica qualquer e p é a *kinematic pressure*, ou seja, pressão dividida por massa específica $\left(\frac{p}{\rho}\right)$.

FIGURA 4.1 – Sintaxe em C++ do arquivo *icoFoam.C*

```

100 |         fvVectorMatrix UEqn
101 |         (
102 |             fvm::ddt(U)
103 |             + fvm::div(phi, U)
104 |             - fvm::laplacian(nu, U)
105 |         );
109 |         solve(UEqn == -fvc::grad(p));
110 |     }

```

Fonte: *OpenFOAM*

Deve ser observado que a pressão codificada nos *solvers* do *OpenFOAM* para a solução de escoamento incompressível representa o campo de pressão relativa (manométrica) dividida pela massa específica do fluido (GREENSHIELDS, 2018).

4.2 FORMULAÇÃO NUMÉRICA

As equações diferenciais de 3.1 a 3.4, juntamente com as condições de contorno, são resolvidas numericamente no ambiente *OpenFOAM* usando o método dos volumes finitos (MVF), cuja solução resultante satisfaz a conservação de quantidades como massa, e quantidade de movimento em qualquer volume de controle (VC) finito. Esta característica é totalmente satisfeita para qualquer volume de controle, assim como é válida para todo o domínio computacional. Mesmo com uma solução em uma malha grosseira há conservação das variáveis integradas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

4.2.1 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos usa uma metodologia colocada em uma malha poliédrica não estruturada com elementos de volume arbitrários. As quantidades dinâmicas de fluido são alocadas nos centroides do volume de controle. Uma variedade de esquemas de interpolação, discretização e solução de matriz são utilizados para solução do problema.

Na ferramenta computacional adotada, os esquemas de interpolação e solução do sistema algébrico são definidos respectivamente nos arquivos *fvSchemes* e *fvSo-*

lutions.

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dV + \int_V \nabla \cdot (\rho\phi \mathbf{u}) dV = \int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_V S_\phi dV. \quad (4.2)$$

A Eq. 4.2 é discretizada para produzir um sistema de equações algébricas da forma do sistema 4.3:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

ou seja:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \quad (4.4)$$

em que $\mathbf{A}$ é a matriz de coeficientes, $\mathbf{x}$ é o vetor com as incógnitas do sistema e $\mathbf{b}$ é o vetor fonte.

O processo de discretização implica a escolha de esquemas numéricos para construir a matriz $\mathbf{A}$ e o vetor $\mathbf{b}$ descrito em 4.4.

4.2.2 Cálculo da solução numérica

O sistema linear discretizado através da interpolação numérica pode ser resolvido por métodos diretos ou iterativos. Os métodos diretos, os quais fazem a inversão completa da matriz (eliminação gaussiana e fatorizações), possuem alto custo computacional, por este motivo, os métodos iterativos são mais recomendados para simulações em *CFD*. Os métodos iterativos conduzem à solução a partir de um valor inicial com critérios de tolerância e convergência predeterminados. O *OpenFOAM* possui em sua biblioteca diversos *solvers* para resolver o sistema linear discretizado.

O método de cálculo da solução numérica empregado pela ferramenta é o *PISO* (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) (ISSA, 1986). Nesta pesquisa optou-se implementar um *solver* personalizado, a partir do *solver* original *pisoFoam*, presente na biblioteca do *OpenFOAM* para resolver escoamentos incompressíveis, transientes, laminares ou turbulentos para fluidos Newtonianos.

Foram adicionadas novas sintaxes em *C++* na biblioteca *pisoFoam.H*. O objetivo da implementação foi alterar o passo de tempo *on-the-fly* a partir de condicionantes de estabilidade e convergência, ou seja, reduzir o número de iterações com o ajuste

automático do passo de tempo durante o processamento com a análise do número de Courant (COURANT et al., 1967).

FIGURA 4.2 – Linhas implementadas na código original do *solver pisoFoam*

```

GNU nano 3.2 mPisoFoam.C

#include "createMesh.H"
#include "createControl.H"
#include "createFields.H"
#include "initContinuityEqns.H"
#include "createTimeControls.H" // implementado
#include "readTimeControls.H" // implementado

turbulence->validate();

// *****

Info<< "\nStarting time loop\n" << endl;
while (runTime.loop())
{
    Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;

    #include "GaussHb.H"
    #include "setDeltaT.H" // implementado
}

^G Get Help  ^O Write Out  ^W Where Is  ^K Cut Text  ^J Justify  ^C Cur Pos
^X Exit      ^R Read File  ^\ Replace   ^U Uncut Text ^T To Spell  ^_ Go To Line

```

Fonte: o autor

O número de Courant é essencial para resolver as equações diferenciais parciais e seu significado está relacionado com estabilidade e convergência em *CFD*. O número de Courant é dado por:

$$Co = \frac{|U| \cdot \Delta t}{\Delta s}, \quad (4.5)$$

em que Co é o número de Courant, U é a velocidade, t é o tempo e s é a distância entre dois pontos.

A estabilização inicial do processamento geralmente necessita do valor do passo de tempo com baixa ordem de grandeza, em torno de 10^{-6}), o qual é mantido constante pelo tempo total da simulação no *solver* original *pisoFoam*. Porém, à medida que o processamento é realizado, valores maiores de passo de tempo podem ser adotados para reduzir o número total de iterações e consequentemente o tempo total de processamento, e por este motivo o código do *pisoFoam* foi modificado.

A nova sintaxe consistiu em aumentar o passo de tempo em determinado valor na próxima iteração caso o valor predeterminado do número de Courant não fosse

atingido na iteração atual. O aumento do passo de tempo foi atribuído na biblioteca *setDeltaT*. Os valores do incremento do passo de tempo e do número de Courant máximo adotados foram respectivamente de 20% e 0.5 para todas as simulações deste trabalho.

A implementação no *solver* apresentou resultados muito significativos em relação ao custo computacional do processamento realizado com o *solver* da biblioteca nativa. Houve redução de 60% no tempo de total do processamento das simulações computacionais deste trabalho (redução em torno de 70 horas em cada simulação) com a utilização do novo *solver* implementado.

O *pisoFoam* modificado com as novas sintaxes foi renomeado com o título *mPisoFoam*.

A Fig. 4.3 apresenta o algoritmo adotado (*GAMG - geometric algebraic multigrid generalized*), a tolerância, os preconditionadores da biblioteca *fvSolution* em todas as simulações deste trabalho.

Neste trabalho foi utilizado o *solver GAMG - Geometric-algebraic multi-grid* com amortecedor Gauss-Seidel para a solução do sistema algébrico da variável pressão.

Para a solução do sistema algébrico das demais variáveis (U , k , e ε) foi utilizado o *smoothSolver* com amortecedor Gauss-Seidel.

É necessário possuir um computador com memória de acesso aleatória (*Random Access Memory - RAM*) suficiente realizar o processamento.

As configurações razoáveis para uma determinada máquina dependem do tamanho dos problemas que estão sendo executados e de como a máquina está sendo usada, além da memória física disponível. É importante evidenciar a diferença entre a memória física e virtual. Quando a memória virtual é usada, o sistema operacional de uma máquina simplesmente usa o disco para memória adicional.

Embora isso possa ser útil, o acesso à memória física para uso de acesso aleatório (virtual) pode exigir operações de entrada e saída que incluam uma considerável penalidade de desempenho. Portanto, a memória virtual deve ser usada somente quando necessário e com consciência da penalidade de desempenho associada.

FIGURA 4.3 – Parâmetros adotados para solução numérica da p , U , ε e k

```

solvers
{
    p
    {
        solver          GAMG;
        tolerance        1e-6;
        relTol           0.01;
        smoother         GaussSeidel;
        nPreSweeps        0;
        nPostSweeps       2;
        cacheAgglomeration on;
        agglomerator      faceAreaPair;
        nCellsInCoarsestLevel 1000;
        mergeLevels       1;
    }

    pFinal
    {
        $p;
        tolerance        1e-6;
        relTol           0;
    }

    "(U|epsilon|k)"
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother         GaussSeidel;
        tolerance        1e-6;
        relTol           0;
    }
}

PISO
{
    nCorrectors          8;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    pRefCell              0;
    pRefValue             0;
}

```

Fonte: o autor

4.2.3 Esquemas de interpolação

As equações diferenciais válidas no contínuo são substituídas por um conjunto de equações algébricas (JATOBÁ, 2014), conforme expresso na Eq. 4.6:

$$\underbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{Acúmulo}} + \underbrace{\nabla \cdot (\mathbf{U}_\phi)}_{\text{Advectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot \mathbf{t}_\phi}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Fonte}} \xrightarrow[\text{em equações algébricas}]{\text{equações diferenciais rearranjadas}} \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}, \quad (4.6)$$

em que ϕ é uma propriedade volumétrica qualquer, t_ϕ depende do modelo de transporte molecular e S_ϕ é o termo volumétrico.

Os esquemas de interpolação adotados para as simulações neste trabalho são:

- Termo de acúmulo $\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)$: Euler;
- Termo advectivo $(\nabla \cdot (\mathbf{U}_\phi))$: Gauss linear (diferenças centrais); e
- Termo difusivo $(\nabla \cdot \mathbf{t}_\phi)$: Gauss linear (diferenças centrais).

O termo fonte S_ϕ é calculado diretamente no centro do volume de controle, portanto não necessita de interpolação já que não é interpolado para as faces.

Os esquemas de interpolação são usados para transformar os valores do centro da célula em centros de face. A operação é usada em muitos dos cálculos de volume finitos, como por exemplo, para o cálculo de gradiente, divergência e termos Laplacianos.

O arquivo *fvSchemes* define os esquemas numéricos para os termos, como derivadas em equações, que aparecem nos aplicativos em execução do processamento. O conjunto de termos, para os quais os esquemas numéricos devem ser especificados, são subdivididos no dicionário *fvSchemes* nas categorias abaixo:

- *timeScheme*: discretização das derivadas temporais, de 1ª e 2ª ordem, respectivamente $\frac{\partial}{\partial t}$ e $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$;
- *gradSchemes*: discretização do vetor gradiente ∇ ;
- *divSchemes*: discretização do termo divergente $\nabla \cdot$;
- *laplacianSchemes*: discretização do Laplaciano ∇^2 ;
- *interpolationSchemes*: método de interpolação de variáveis na face;
- *snGradSchemes*: discretização dos gradiente normais à superfície, avaliado na face da célula.

A Fig. 4.4 apresenta os esquemas interpolação adotados em todas as simulações em CFD realizadas neste trabalho.

FIGURA 4.4 – Esquemas de interpolação definidos no arquivo *fvSchemes*

```

ddtSchemes
{
    default                none;
    ddt(U)                  Euler;
    ddt(epsilon)            Euler;
    ddt(k)                  Euler;
}

gradSchemes
{
    default                none;
    grad(U)                 Gauss linear;
    grad(p)                 Gauss linear;
    grad(epsilon)           Gauss linear;
    grad(k)                 Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default                none;
    div((nuEff*dev2(T(grad(U)))) ) Gauss linear;
    div(phi,U)             Gauss limitedLinearV 1;
    div(phi,epsilon)       Gauss limitedLinear 1;
    div(phi,k)             Gauss limitedLinear 1;
}

laplacianSchemes
{
    default                none;
    laplacian(nuEff,U)     Gauss linear corrected;
    laplacian((1|A(U)),p)  Gauss linear corrected;
    laplacian(DepsilonEff,epsilon) Gauss linear corrected;
    laplacian(DkEff,k)     Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default                none;
    flux(U)                linear;
    dotInterpolate(S,U_0)  linear;
    interpolate((1|A(U)))  linear;
    flux(HbyA)             linear;
}

snGradSchemes
{
    default                corrected;
}

fluxRequired
{
    default                no;
    p                      ;
}

```

Fonte: o autor

5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Este capítulo apresenta todos os parâmetros utilizados para as simulações computacionais em *CFD*, os processamentos e respectivos resultados quantitativos e qualitativos.

5.1 PROCESSAMENTOS DAS SIMULAÇÕES POR *CFD*

Esta subseção apresenta os parâmetros geométricos, propriedades físicas, condições de contorno, inicialização, método numéricos e a solução do sistema algébrico utilizados em todas as simulações por *CFD* realizadas neste trabalho.

Para avaliar comparativamente o custo computacional, todos os processamentos foram realizados no mesmo computador com sistema operacional Linux (Ubuntu 18.04). O computador utilizado possui quatro processadores Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @ 2.40GHz, com 8 Gb de memória RAM e 1 Tb de memória física.

5.1.1 Geometria e permeabilidade da edificação

A escolha da edificação foi baseada nas tipologias mais comuns entre diversos sistemas estruturais (alvenaria estrutural, concreto armado, metálica, entre outros) sujeita às condições mais recorrentes de contorno e carregamentos horizontais para contemplar o maior número possível de casos práticos na engenharia civil. A configuração da edificação adotada foi submetida aos ensaios experimentais em escala descritos na Seção 4.

O edifício adotado para realização da simulação computacional apresenta 10 andares considerando a distância de piso a piso de três metros. A edificação possui relação entre largura e profundidade de 1:2 e relação de profundidade e comprimento de 2:3 conforme Fig. 5.1.

FIGURA 5.1 – Dimensões da edificação. Unidades: [m]

Fonte: o autor

Para avaliar a situação mais desfavorável quanto aos esforços aplicados na edificação, a edificação simulada é totalmente impermeável ao ar, a pressão no seu interior é invariável no tempo e independente da velocidade da corrente de ar externo.

5.1.2 Propriedades físicas do fluido

As propriedades físicas do fluido foram obtidas a partir dos relatórios técnicos da NASA. A fórmula para o cálculo da pressão dinâmica do vento (q) apresentada na NBR 6123 (ABNT, 2013) considerou condições normais de pressão (1 atm) e temperatura (15° Celsius). As publicações técnicas da NASA, para a temperatura do ar equivalente a 288.15K (15° Celsius) e pressão de 1 atm, aferem a densidade do ar igual a 1.225kg/m³. Deste modo, a fórmula da pressão dinâmica pela NBR 6123 (ABNT, 2013) considerou fluxo isotérmico a 15° Celsius.

$$q = \frac{\rho V_k^2}{2} = \frac{1.225 V_k^2}{2} = 0.613 V_k^2, \quad (5.1)$$

em que q é a pressão dinâmica do vento segundo NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) e V_k é a velocidade característica.

TABELA 5.1 – Propriedades físicas do ar

Propriedade	Valor
Densidade (ρ) (NASA, 1962)	1.225 kg/m ³
Viscosidade dinâmica (μ) (NASA, 1962)	1.7894e ⁻⁵ kg/m.s

Fonte: Relatórios técnicos da NASA

5.1.3 Dimensões do domínio

A escolha das dimensões entre o limite do domínio e as superfícies da edificação são de extrema importância para a simulação ter capacidade de desenvolvimento do escoamento sem influência dos limites geométricos do domínio.

O domínio adotado possui dimensão longitudinal 27.5 vezes superior dimensão de referência da edificação. A dimensão transversal do domínio é quinze vezes superior dimensão de referência da edificação e altura do domínio é três vezes superior à altura da edificação conforme Fig. 5.2.

FIGURA 5.2 – Dimensões do domínio em planta e vista. Unidades: [m]

Fonte: o autor

FIGURA 5.3 – Domínio em 3D

Fonte: o autor

5.1.4 Condições iniciais e de contorno aplicado ao problema

As fronteiras do domínio devem receber propriedades topográficas para caracterizar adequadamente a realidade física do problema a ser estudado. Entende-se como fronteiras o nível do terreno, os planos de entrada e saída do escoamento, os planos laterais e de topo do domínio, e todas as faces das edificações. Desta forma, para as simulações com uma edificação retangular em terreno plano, haverá onze fronteiras que precisam receber propriedades topográficas.

A atribuição da propriedade topográfica em cada plano limite é realizada através de um *patch*, o qual prescreve um conjunto de condições para cada propriedade física envolvida no problema.

O *OpenFOAM* versão 6 possui em sua biblioteca padrão 135 *patches* (GREENSHIELDS, 2018). Os *patches* básicos mais utilizados são:

- *symmetryPlane*: torna-se um plano que espelha ortogonalmente as propriedades físicas do problema;
- *wall*: permite a aplicação de condições rígidas à fronteira; permite o uso das funções parede oriundas dos modelos de turbulência;
- *empty*: contorno vazio usado para simular problemas de uma ou duas dimensões; e
- *patch*: é um tipo propriedade topográfica genérica, o qual permite a atribuição de qualquer condição, geralmente usado nas fronteiras de entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) do domínio.

Neste trabalho, as seguintes condições de contorno foram aplicadas em todas as fronteiras conforme Fig. 5.4:

- Condição na entrada do escoamento (*inlet*): condições de contorno prescritas. Valores pré-estabelecidos para k e ε também são impostos nas entradas;
- Condição na saída do escoamento (*outlet*): condição de contorno do tipo Neumann homogênea; e
- Condição sobre uma superfície rígida (*wall*): condição de contorno sem deslizamento (*no-slip*). Esta condição significa que o fluido deve ser fixado à superfície, ou seja, $u = 0$. Próximo às paredes, para as variáveis k e ε , foi aplicada a função de parede (*wall-function*) (SONDAK; PLETCHER, 1995).

FIGURA 5.4 – Condições de contorno. Unidades: [m]

Fonte: o autor

O campo interno da energia cinética turbulenta (k) e o campo interno da taxa de dissipação (ε) são inicializados de acordo com o modelo de turbulência adotado (LAUNDER; SPALDING, 1974), conforme descrito na subseção 3.2.

5.2 CONVERGÊNCIA DE MALHA

Para validação do refinamento de malha necessário foram dimensionadas quatro malhas estruturadas com elementos hexaédricos. As malhas A, B, C e D possuem respectivamente 74850, 153708, 224448 e 304320 elementos.

As malhas desenvolvidas para convergência e as demais malhas para todas as simulações computacionais presentes neste trabalho foram desenvolvidas por *script*

e compiladas através do código fonte aberto *Gmsh* versão 4.3.0 (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009).

O critério de refinamento das malhas A até D priorizou o aumento do número de volumes de controle nas fronteiras da edificação como pode ser observado nas Figs. 5.5 a 5.8:

FIGURA 5.5 – Malha A (74850 elementos): discretização do edifício

Fonte: o autor

FIGURA 5.6 – Malha B (153708 elementos): discretização do edifício

Fonte: o autor

FIGURA 5.7 – Malha C (224448 elementos): discretização do edifício

Fonte: o autor

FIGURA 5.8 – Malha D (304320 elementos): discretização do edifício

Fonte: o autor

O refinamento dos volumes de controle nas fronteiras da edificação foi proporcionalmente reduzido em direção às fronteiras do domínio de tal forma a manter o aumento gradual do número total de elementos, como pode ser observado nas Figs. 5.9 a 5.12:

FIGURA 5.9 – Malha A (74850 elementos): domínio em 3D

Fonte: o autor

FIGURA 5.10 – Malha B (153708 elementos): domínio em 3D

Fonte: o autor

FIGURA 5.11 – Malha C (224448 elementos): domínio em 3D

Fonte: o autor

FIGURA 5.12 – Malha D (304320 elementos): domínio em 3D

Fonte: o autor

5.2.1 Parâmetros de qualidade da malha

Há três parâmetros de qualidade da malha que devem ser verificados (GREENSHIELDS, 2018):

- Razão de aspecto (*aspect ratio*): é a razão entre a maior e a menor aresta do elemento;

FIGURA 5.13 – Razão de aspecto

Fonte: Guerrero (2019)

Valores altos da razão de aspecto geralmente aparecem em camadas limite muito finas. Não é fatal para a estabilidade do solucionador, mas pode diminuir significativamente a velocidade de convergência.

- Distorção (*skewness*): é a distância entre o vetor que conecta o centro dos volumes vizinhos e o centro da face;

FIGURA 5.14 – Distorção

Fonte: Guerrero (2019)

Altos valores de distorção podem prejudicar a qualidade e precisão dos resultados.

- Ortogonalidade (*orthogonality*): é o ângulo entre o vetor que conecta o centro dos volumes adjacentes e o vetor normal à superfície entre eles.

FIGURA 5.15 – Ortogonalidade

Fonte: Guerrero (2019)

Quanto menor o valor da não-ortogonalidade melhor será a qualidade e precisão dos resultados sendo zero o valor mais eficiente.

Para garantir a máxima qualidade e precisão dos resultados, as faces dos volumes de controle das malhas A, B, C e D são paralelas às fronteiras dos seus respectivos domínios nos planos XY, YZ e YZ (Figs. 5.16 a 5.26). Desta forma, as malhas possuem não-ortogonalidade máximas e médias iguais a zero, o que torna o processamento e estabilidade mais eficientes e os resultados mais precisos (RHOADS, 2014).

FIGURA 5.16 – Malha A (74850 elementos): plano XY

Fonte: o autor

FIGURA 5.17 – Malha A (74850 elementos): plano XZ

Fonte: o autor

FIGURA 5.18 – Malha A (74850 elementos): plano YZ

Fonte: o autor

FIGURA 5.19 – Malha B (153708 elementos): plano XY

Fonte: o autor

FIGURA 5.20 – Malha B (153708 elementos): plano XZ

Fonte: o autor

FIGURA 5.21 – Malha B (153708 elementos): plano YZ

Fonte: o autor

FIGURA 5.22 – Malha C (153708 elementos): plano XY

Fonte: o autor

FIGURA 5.23 – Malha C (224448 elementos): plano XZ

Fonte: o autor

FIGURA 5.24 – Malha C (224448 elementos): plano YZ

Fonte: o autor

FIGURA 5.25 – Malha D (304320 elementos): plano XY

Fonte: o autor

FIGURA 5.26 – Malha D (304320 elementos): plano XZ

Fonte: o autor

FIGURA 5.27 – Malha D (304320 elementos): plano YZ

Fonte: o autor

A análise dos parâmetros de qualidade da malha são fundamentais para garantir um processamento estável para os esquemas de interpolação e para solução do sistema algébrico. A Tab. 5.2 apresenta os parâmetros das malhas utilizadas para realizar a análise da convergência do modelo.

TABELA 5.2 – Parâmetros de qualidade das malhas A, B, C e D

Parâmetro	Malha			
	A	B	C	D
Número de elementos	74850	153708	224448	304320
Razão de aspecto máxima	13.889	13.5482	23.9782	69.156
Área mínima da face [m^2]	4	1.5625	0.509796	0.25
Área máxima da face [m^2]	415.264	276.914	283	929.941
Volume mínimo [m^3]	9.776	2.36406	1.01979	0.15625
Volume máximo [m^3]	3188.73	2178.1	2447.5	10958.9
Volume total [m^3]	1.48E+07	1.48E+07	1.48E+07	1.48E+07
Não-ortogonalidade máxima	0	0	0	0
Não-ortogonalidade média	0	0	0	0
Distorção máxima	6.77E-14	1.14E-13	2.39E-13	3.41E-13

Fonte: o autor

As condições de contorno adotadas estão descritas na subseção 5.1.4. O perfil de velocidades na entrada do domínio da simulação corresponde ao mesmo perfil de velocidades utilizado no ensaio experimental da *Tokyo Polytechnic University*, conforme descrito na subseção 3.5.5.1. Foi utilizado o teste experimental com a direção do vento a zero graus em relação ao eixo ortogonal à fachada frontal da edificação. Nestas condições o número de Reynolds é $4.4 \cdot 10^7$ para a velocidade característica do ensaio.

FIGURA 5.28 – Campo de velocidades do teste experimental aplicado na simulação. Unidades: $[m/s]$

Fonte: o autor

5.2.2 Resultados quantitativos

O refinamento de malha necessário para obtenção de resultados satisfatórios foi determinado através das médias temporais dos c_{pe} resultantes da simulação por *CFD* em relação ao ensaio experimental.

Os resultados das médias temporais dos c_{pe} que apresentaram maior variação entre o centro e as quinas do edifício, ambos na mesma altura, ocorreram a dois terços da altura total da edificação, conforme pode ser observado nos resultados qualitativos do ensaio e das simulações por *CFD* conforme Fig. 5.32. Também pode ser observado nas machas de isovalores que nesta altura ocorrem os resultados máximos da média temporal do c_{pe} , sendo assim, este nível é o mais relevante para avaliação quantitativa do c_{pe} .

As curvas com as médias temporais do c_{pe} aferidas no experimento e calculadas da simulação por *CFD* podem ser visualizadas na Fig. 5.29:

FIGURA 5.29 – Curvas com resultados da média temporal do c_{pe}

Fonte: o autor

Deve ser observado que os resultados experimentais das médias temporais do c_{pe} não são simétricos em relação ao eixo central da edificação na posição horizontal a 10 metros.

As Tabs. 5.3 e 5.4 a seguir apresentam respectivamente as médias temporais do c_{pe} em valores absolutos e em valores relativos com base no ensaio experimental.

TABELA 5.3 – Resultados da média temporal do c_{pe}

Coordenada em x [m]	5	7	9	11	13	15
Malha A (74850 elementos)	0.60	0.66	0.68	0.68	0.66	0.60
Malha B (153708 elementos)	0.67	0.71	0.73	0.73	0.71	0.67
Malha C (224448 elementos)	0.69	0.73	0.75	0.75	0.73	0.69
Malha D (304320 elementos)	0.72	0.76	0.78	0.78	0.76	0.72
Ensaio Experimental (TPU-COE, 2008)	0.74	0.77	0.78	0.77	0.75	0.70

Fonte: o autor

TABELA 5.4 – Erro absoluto da média temporal do c_{pe} entre *CFD* e experimento

Coordenada em x [m]	5	7	9	11	13	15
Malha A (74850 elementos)	0.14	0.11	0.10	0.09	0.09	0.10
Malha B (153708 elementos)	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03
Malha C (224448 elementos)	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
Malha D (304320 elementos)	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02

Fonte: o autor

TABELA 5.5 – Erro relativo da média temporal do c_{pe}

x [m]	5	7	9	11	13	15	Média
Malha A	18.92 %	14.29 %	12.82 %	11.69 %	12.00 %	14.29 %	14.0 %
Malha B	9.46 %	7.79 %	6.41 %	5.19 %	5.33 %	4.29 %	6.4 %
Malha C	6.76 %	5.19 %	3.85 %	2.60 %	2.67 %	1.43 %	3.7 %
Malha D	2.70 %	1.30 %	0.00 %	1.30 %	1.33 %	2.86 %	1.6 %

Fonte: o autor

Pode-se inferir que a malha D de 304320 elementos apresenta resultados consistentes em relação ao ensaio experimental, com erro relativo de 1.6%, portanto o refinamento utilizado nas simulações seguintes neste trabalho tem ordem mínima de $3 \cdot 10^6$ elementos.

5.2.3 Resultados qualitativos

As curvas com os isovalores das médias temporais do c_{pe} na fachada frontal, obtidos pelo ensaio experimental realizado pela *Tokyo Polytechnic University*, são apresentadas na Fig. 5.30.

FIGURA 5.30 – Resultados das médias temporais do c_{pe} pelo ensaio experimental

Mean wind pressure coefficients on a high-rise building.

Model geometrical parameters: $H=0.3m$, $B=0.2m$, $D=0.1m$.

Wind field parameters: $C_L = 1/400$, $\alpha=0.3$, $I_H=0.38$, $\theta=0^\circ$.

Fonte: TPU-COE (2008)

As manchas de isovalores dos resultados do ensaio experimental apresentam determinada cor para cada degrau. No visualizador de resultados da ferramenta computacional utilizada, foi configurado para cada degrau de 0.1, a respectiva cor do ensaio experimental conforme Fig. 5.31. Desta forma, é possível avaliar qualitativamente o desenvolvimento das curvas à medida que as malhas foram refinadas.

FIGURA 5.31 – Manchas: ensaio experimental e configuração visualizador dos resultados em *CFD*

ENSAIO EXPERIMENTAL (túnel de vento)

CFD (Paraview)

Fonte: o autor

Sendo assim, a Fig. 5.32 apresenta as curvas de isovalores das malhas A, B, C e D em comparação com o ensaio de túnel de vento.

FIGURA 5.32 – Resultados qualitativos do c_{pe} para as malhas A, B, C e D em relação ao ensaio experimental.

ENSAIO DE TÚNEL DE VENTO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Fonte: o autor

O cálculo do c_{pe} em regime isotérmico para escoamentos incompressíveis depende apenas da variável p , já que os parâmetros p_∞ , ρ_∞ e u_∞ são obtidos no escoamento livre (Eq. 5.2).

$$c_{pe} = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty u_\infty^2}, \quad (5.2)$$

em que c_{pe} é o coeficiente de pressão externa, p é a pressão, p_∞ é pressão não perturbada no escoamento livre, e ρ_∞ é a densidade do fluido no escoamento livre, u_∞ é a velocidade não perturbada no escoamento livre.

Deste modo, as curvas de isovalores da pressão e as curvas de isovalores do c_{pe} , para o mesmo experimento ou simulação computacional, apresentarão mesmo desenvolvimento conforme pode ser observado na Fig. 5.33.

FIGURA 5.33 – Resultados qualitativos da malha A com linhas de corrente e pressões. Unidades: $[Pa]$

Fonte: o autor

5.2.4 Custo computacional

A Tab. 5.6 apresenta o tempo de processamento das simulações e o tamanho total dos arquivos gerados em cada simulação.

TABELA 5.6 – Processamento das malhas A, B, C e D

Parâmetro de análise	Malha			
	A	B	C	D
Tempo total de execução [horas]	1.08	4.35	7.38	30.21
Tamanho total dos arquivos gravados [Gigabytes]	0.91	1.85	2.68	3.36

Fonte: o autor

5.3 LOCAÇÃO DA EDIFICAÇÃO NO DOMÍNIO

O posicionamento do edifício no interior do domínio deve garantir que os resultados da simulação em *CFD* não sofram influência das fronteiras do domínio.

Segundo Fortuna (2000), o posicionamento correto da fronteira de saída é essencial para a obtenção de uma boa solução numérica. A fronteira de saída deve estar posicionada em uma região na qual as propriedades do escoamento apresentem variações desprezíveis (Fig. 5.34).

FIGURA 5.34 – Posicionamento da fronteira de saída (FORTUNA, 2000)

Fonte: o autor

Desta forma, a distância entre o edifício e a fronteira de entrada do escoamento não deve ser muito pequena, pois não apresentará uma boa solução numérica devido à influência da fronteira de entrada, mas não deve ser muito grande devido ao custo computacional para processamento do problema.

Portanto há uma locação ótima, a qual o afastamento da edificação em relação à entrada do domínio aumenta o custo computacional embora não influencie nos resultados.

Para garantir uma boa solução numérica com menor custo computacional, a distância entre a fronteira de entrada e a fachada frontal foi avaliada em quatro simulações em *CFD* conforme Tab. 5.7 e Figs. 5.35 a 5.39.

TABELA 5.7 – Avaliação da locação ótima da fronteira de entrada

Caso	Distância de entrada [m]
A	45
B	95
C	145
D	195

Fonte: o autor

FIGURA 5.35 – Distâncias entre fronteira de entrada e fachada frontal. Unidades: [m]

Fonte: o autor

FIGURA 5.36 – Caso A: Locação da fronteira de entrada a 45 metros. Unidades: $[m]$

Fonte: o autor

FIGURA 5.37 – Caso B: Locação da fronteira de entrada a 95 metros. Unidades: $[m]$

Fonte: o autor

FIGURA 5.38 – Caso C: Locação da fronteira de entrada a 145 metros. Unidades: [m]

Fonte: o autor

FIGURA 5.39 – Caso D: Locação da fronteira de entrada a 195 metros. Unidades: [m]

Fonte: o autor

Conforme exposto em 5.2.1, os parâmetros de qualidade da malha devem ser analisados para garantir uma solução estável.

A convergência de malha realizada em 5.2 demonstrou que malhas estruturadas com no mínimo 300 mil elementos apresentaram resultados consistentes. Deste modo, todos os casos para análise da locação da fronteira de entrada foram dimensionados com os mesmos critérios.

A Tab. 5.8 apresenta os parâmetros das malhas utilizados para realizar a análise da locação da fronteira de entrada.

TABELA 5.8 – Parâmetros de qualidade das malhas do casos A, B, C e D

Parâmetro	Caso			
	A	B	C	D
Número de elementos	304800	304800	304320	304800
Razão de aspecto máxima	58.334	53.2046	69.156	68.5408
Área mínima da face [m^2]	0.25	0.25	0.25	0.25
Área máxima da face [m^2]	775.909	665.058	929.941	911.671
Volume mínimo [m^3]	0.159187	0.162812	0.15625	0.161562
Volume máximo [m^3]	7554.64	6475.33	10958.9	8876.49
Volume total [m^3]	1.48E+07	1.48E+07	1.48E+07	1.48E+07
Não-ortogonalidade máxima	0	0	0	0
Não-ortogonalidade média	0	0	0	0
Distorção máxima	3.27E-13	2.73E-13	3.41E-13	3.41E-13

Fonte: o autor

5.3.1 Resultados quantitativos

A locação da fronteira de entrada para obtenção de resultados satisfatórios foi determinada através das médias temporais dos c_{pe} resultantes da simulação por *CFD* em relação ao ensaio experimental.

O nível mais relevante com as maiores variações de pressão ocorrem a dois terços da altura total da edificação conforme exposto em 5.2.2, portanto o nível utilizado para análise quantitativa.

As curvas com as médias temporais do c_{pe} aferidas no experimento e calculadas da simulação por *CFD* podem ser visualizadas na Fig. 5.40:

FIGURA 5.40 – Curvas com os resultados do c_{pe} da análise da locação da fronteira de entrada

Fonte: o autor

Como exposto anteriormente em 5.2.2, deve ser observado que os resultados por túnel de vento não são simétricos em relação ao eixo central do edifício.

As médias temporais do c_{pe} em valores absolutos e seus valores relativos em relação ao ensaio experimental são apresentadas respectivamente nas Tabs. 5.9 e 5.10:

TABELA 5.9 – Resultados da média temporal do c_{pe}

Coordenada em x [m]	5	7	9	11	13	15
Caso A (45 m de distância)	0.16	0.26	0.33	0.38	0.42	0.45
Caso B (95 m de distância)	0.64	0.68	0.70	0.69	0.68	0.63
Caso C (145 m de distância)	0.72	0.76	0.78	0.78	0.76	0.72
Caso D (195 m de distância)	0.72	0.76	0.77	0.77	0.76	0.72
Ensaio Experimental (TPU-COE, 2008)	0.74	0.77	0.78	0.77	0.75	0.70

Fonte: o autor

TABELA 5.10 – Erro absoluto da média temporal do c_{pe} entre *CFD* e experimento

Coordenada em x [m]	5	7	9	11	13	15
Caso A (45 m de distância)	0.58	0.51	0.45	0.39	0.33	0.25
Caso B (95 m de distância)	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07
Caso C (145 m de distância)	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02
Caso D (195 m de distância)	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02

Fonte: o autor

TABELA 5.11 – Erro relativo da média temporal do c_{pe}

x [m]	5	7	9	11	13	15	Média
Caso A	78.4 %	66.2 %	57.7 %	50.6 %	44.0 %	35.7 %	55.4 %
Caso B	13.5 %	11.7 %	10.3 %	10.4 %	9.3 %	10.0 %	10.9 %
Caso C	2.7 %	1.3 %	0.0 %	1.3 %	1.3 %	2.9 %	1.6 %
Caso D	2.7 %	1.3 %	1.3 %	0.0 %	1.3 %	2.9 %	1.6 %

Fonte: o autor

Pode-se observar que a locação da fronteira de entrada a 45 metros (caso A) é insuficiente para desenvolvimento da solução numérica sem influência do contorno do domínio, o que implica em alta imprecisão dos resultados (erro relativo de 55.4% em relação ao ensaio experimental). Nesta distância há influência da fronteira de entrada nos campos de pressão e velocidades ao redor da edificação.

A locação da fronteira de entrada a 95 metros (caso B) demonstra uma redução da influência da fronteira de entrada nos campos de pressão e velocidades ao redor da edificação, porém ainda apresenta interferência nos resultados com erro de 10.9%.

Os resultados das simulações em *CFD* dos casos C e D na Fig. 5.40 demonstram que os resultados do caso D praticamente se sobrepuseram aos resultados do caso C, ambos com erro relativo de 1.6%. Estes resultados indicam que qualquer distância entre edificação e fronteira de entrada superiores a 145 metros (aproximadamente sete vezes o comprimento de referência da edificação) não interferem mais nos campos de velocidade e pressão ao redor da edificação.

A locação da fronteira de entrada com pelo menos 145 metros mostrou-se consistente quanto aos resultados e econômica quanto ao custo computacional, já que o caso C apresenta um número menor de elementos entre edificação e a entrada do domínio em relação ao caso D.

Neste perfil de escoamento as fronteiras laterais apresentam locação ótima com distâncias inferiores em relação à locação ótima da fronteira de entrada. Nos quatro casos simulados, as fronteiras laterais estão locadas uma distância igual a sete vezes o comprimento de referência da edificação, sendo assim a locação das fronteiras laterais e da fronteira de entrada com distâncias superiores a 140 metros não influenciam nos resultados.

Portanto a locação ótima da fronteira de entrada é no mínimo a 145 metros da edificação, critério adotado para todas as simulações seguintes.

5.3.2 Resultados qualitativos

O ensaio experimental em túnel de vento, realizado pela *Tokyo Polytechnic University*, foi comparado com os resultados das simulações dos quatro casos de análise da locação da fronteira de entrada.

Para avaliar qualitativamente o desenvolvimento das curvas em cada caso, as cores das manchas de resultados das simulações em *CFD* foram configuradas com a cor utilizada nos resultados do ensaio experimental, respectiva a cada degrau de 0.1, conforme exposto em 5.2.3 e demonstrado na Fig. 5.31.

A Fig. 5.41 apresenta as curvas de isovalores dos casos A, B, C e D em comparação com o ensaio de túnel de vento.

FIGURA 5.41 – Resultados qualitativos do c_{pe} para as malhas A, B, C e D em relação ao ensaio experimental.

ENSAIO DE TÚNEL DE VENTO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Fonte: o autor

Da mesma forma como exposto no item 5.2.3, as curvas de isovalores da pressão e as curvas de isovalores do c_{pe} , para o mesmo experimento ou simulação computacional, apresentarão mesmo desenvolvimento conforme pode ser observado na Fig. 5.42.

FIGURA 5.42 – Resultados qualitativos do Caso A com linhas de corrente e pressões. Unidades: $[Pa]$

Fonte: o autor

5.3.3 Custo computacional

A Tab. 5.12 apresenta o tempo de processamento das simulações e o tamanho total dos arquivos gerados em cada simulação.

TABELA 5.12 – Custo computacional dos casos A, B, C e D

Parâmetro de análise	Caso			
	A	B	C	D
Tempo total de execução [horas]	41.4	49.23	30.21	29.30
Tamanho total dos arquivos gravados [Gigabytes]	3.39	3.40	3.36	3.41

Fonte: o autor

5.4 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO EM *CFD* PARA O VENTO EM OUTRAS DIREÇÕES

Como regra geral, é admitido que o vento básico pode incidir em qualquer direção. Cada direção irá fornecer uma determinada gama de resultados de pressões em diversos pontos da edificação. Seus resultados máximos e mínimos são utilizados para dimensionamento da estrutura de acordo com as combinações de ELU e ELS.

O ângulo de incidência do vento (α), medido entre a direção do vento e o maior lado da edificação, vai mudar a criticidade da estrutura em determinada hipótese considerada. Desta forma é fundamental realizar diversos casos de incidência do vento com determinado intervalo do parâmetro α .

TABELA 5.13 – Casos com diferentes incidências do vento na edificação

Caso	Ângulo de incidência (α)
A	0°
B	30°
C	45°
D	60°

Fonte: o autor

FIGURA 5.43 – Casos de estudo com diferentes ângulos de incidência

Fonte: o autor

Os parâmetros de qualidade da malha, expostos anteriormente em 5.2.1, devem ser analisados já que implicam na estabilidade do processamento da solução numérica.

Conforme exposto em 5.2.1, o parâmetro distorção (*skewness*) prejudica o processamento da solução numérica e aumenta o custo computacional, por este motivo optou-se por utilizar a mesma malha para os quatro casos, com a modificação do parâmetro α nas condições de contorno em cada caso, conforme Eqs. 5.3 e 5.4:

$$u_x = \cos(\alpha)u_0(z), \quad (5.3)$$

$$u_y = \sin(\alpha)u_0(z), \quad (5.4)$$

em que u_x, u_y são os componentes da velocidade, α é o ângulo de incidência do vento e $u_0(z)$ é a velocidade do vento na altura z .

A malha dimensionada para análise da direção do vento é do tipo estruturada com no mínimo 300 mil elementos, conforme número mínimo de elementos e critérios

quanto à forma observados em 5.2 para se atingir a convergência de malha.

As fronteiras do domínio estão afastadas no mínimo a 145 metros da edificação, já que a avaliação da locação ótima realizada em 5.3 demonstrou que distâncias superiores a sete vezes o maior lado da edificação não prejudicam os resultados da solução numérica.

A malha utilizada para realizar as simulações de análise dos diferentes ângulos de incidência do vento possui os seguintes parâmetros:

TABELA 5.14 – Parâmetros de qualidade da malha utilizada no casos A, B, C e D

Parâmetro	Casos
	A, B, C e D
Número de elementos	304320
Razão de aspecto máxima	69.156
Área mínima da face [m^2]	0.25
Área máxima da face [m^2]	929.941
Volume mínimo [m^3]	0.15625
Volume máximo [m^3]	10958.9
Volume total [m^3]	1.48E+07
Não-ortogonalidade máxima	0
Não-ortogonalidade média	0
Distorção máxima	3.41E-13

Fonte: o autor

5.4.1 Resultados quantitativos

A avaliação do efeito dos diferentes ângulos de ataque do vento sobre a edificação foi realizada através das médias temporais dos c_{pe} resultantes da simulação por *CFD* em relação aos ensaios experimentais realizados para cada ângulo em questão. Ressalta-se que o laboratório de ensaios de túnel de vento da *Tokyo Polytechnic University*, descrito na subseção 3.5.5.1, realizou ensaios com ângulos nas direções 0° até 100° para cada intervalo de 5° .

O nível mais relevante com as maiores variações de pressão ocorrem a dois terços da altura total da edificação conforme exposto em 5.2.2, portanto o nível utilizado para análise quantitativa.

As curvas com as médias temporais do c_{pe} aferidas no experimento e calculadas da simulação por *CFD* para cada um dos casos podem ser visualizadas nas Figs. 5.44 a 5.47:

FIGURA 5.44 – Curvas com os resultados do c_{pe} do caso A

Fonte: o autor

FIGURA 5.45 – Curvas com os resultados do c_{pe} do caso B

Fonte: o autor

FIGURA 5.46 – Curvas com os resultados do c_{pe} do caso C

Fonte: o autor

FIGURA 5.47 – Curvas com os resultados do c_{pe} do caso D

Fonte: o autor

TABELA 5.15 – Resultados da média temporal do c_{pe}

Coordenada em x [m]		5	7	9	11	13	15
Caso A	CFD	0.72	0.76	0.78	0.78	0.76	0.72
	Ensaio experimental	0.74	0.77	0.78	0.77	0.75	0.70
Caso B	CFD	0.44	0.53	0.60	0.66	0.71	0.76
	Ensaio experimental	0.44	0.54	0.60	0.65	0.70	0.73
Caso C	CFD	0.23	0.31	0.38	0.44	0.50	0.56
	Ensaio experimental	0.22	0.31	0.38	0.45	0.51	0.56
Caso D	CFD	0.00	0.06	0.11	0.15	0.18	0.22
	Ensaio experimental	-0.01	0.05	0.10	0.16	0.21	0.25

Fonte: o autor

TABELA 5.16 – Erro absoluto da média temporal do c_{pe} entre CFD e experimento

Coordenada em x [m]	5	7	9	11	13	15
Caso A	0.02	0.01	0	0.01	0.01	0.02
Caso B	0	0.01	0	0.01	0.01	0.03
Caso C	0.01	0	0	0.01	0.01	0
Caso D	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03

Fonte: o autor

Deve ser observado que os resultados experimentais na fachada frontal com vento na direção 60° são próximos de zero ou igual a zero (conforme na posição $x = 5m$). Deste modo o erro relativo pode ser alto apesar do erro absoluto ser baixo, como ocorre na posição $x = 7m$ por exemplo, o qual o experimento resultou c_{pe} igual a 0.05 e a simulação por CFD resultou 0.06. Neste caso o erro absoluto é de 0.01, o que indica resultados consistentes, apesar do erro relativo ser de 12.5%.

TABELA 5.17 – Erro relativo da média temporal do c_{pe}

x [m]	5	7	9	11	13	15	Média
Caso A	2.7 %	1.3 %	0.0 %	1.3 %	1.3 %	2.9 %	1.6 %
Caso B	0.0 %	1.9 %	0.0 %	1.5 %	1.4 %	4.1 %	1.5 %
Caso C	4.6 %	0.0 %	0.0 %	2.2 %	2.0 %	0.0 %	1.5 %
Caso D	-	20.0 %	10.0 %	6.3 %	14.3 %	12.0 %	12.5 %

Fonte: o autor

5.4.2 Resultados qualitativos

Os resultados qualitativos das médias temporais do c_{pe} em cada um dos quatro casos foram comparados com os resultados obtidos pelos ensaios experimentais da *Tokyo Polytechnic University* realizados com os respectivos ângulos de incidência simulados por *CFD*.

As cores das manchas dos resultados das simulações em *CFD* foram configuradas com as respectivas cores utilizadas em cada um dos casos utilizados nos resultados dos ensaios experimentais. A cor respectiva a cada degrau de 0.1 foi configurada conforme exposto em 5.2.3 e demonstrado na Fig. 5.31.

Apresentamos nas Figs. 5.48 a 5.55 as manchas de isovalores dos casos A, B, C e D em comparação com os ensaios de túnel de vento.

FIGURA 5.48 – Caso A: vento na direção 0°

Fonte: o autor

FIGURA 5.49 – Resultados qualitativos do caso A

Fonte: o autor

FIGURA 5.50 – Caso B: vento na direção 30°

Fonte: o autor

FIGURA 5.51 – Resultados qualitativos do caso B

Fonte: o autor

FIGURA 5.52 – Caso C: vento na direção 45°

Fonte: o autor

FIGURA 5.53 – Resultados qualitativos do caso C

Fonte: o autor

FIGURA 5.54 – Caso D: vento na direção 60°

Fonte: o autor

FIGURA 5.55 – Resultados qualitativos do caso D

Fonte: o autor

5.4.3 Custo computacional

A Tab. 5.18 apresenta o tempo de processamento das simulações e o tamanho total dos arquivos gerados em cada simulação.

TABELA 5.18 – Custo computacional dos casos A, B, C e D

Parâmetro de análise	Caso			
	A	B	C	D
Tempo total de execução [horas]	30.21	35.93	91.12	87.43
Tamanho total dos arquivos gravados [Gigabytes]	3.36	3.58	3.65	3.66

Fonte: o autor

5.5 COMPARATIVOS ENTRE *CFD* E A NORMATIZAÇÃO BRASILEIRA E JAPONESA

Os resultados das simulações em *CFD* apresentados nas seções anteriores, as quais foram realizadas com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e com condições de contorno específicas para validação do modelagem computacional, demonstraram resultados consistentes em relação ao ensaio experimental de túnel de vento com aplicação do perfil de velocidades fornecido pelos ensaios experimentais (categoria de terreno III da *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) conforme exposto em 3.5.5.1.

5.5.1 Condições de contorno

O perfil do vento de entrada utilizado na simulação computacional considerou o efeito combinado da rugosidade do terreno, parâmetros meteorológicos e variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno conforme fatores aerodinâmicos da NBR 6123 (ABNT, 2013). Estes fatores transformaram o valor da velocidade básica medida em um ponto a 10 metros acima do terreno em campo aberto e plano (medido pelas estações meteorológicas) em um perfil com velocidade característica variável com a altura do terreno válido até o contorno superior da camada atmosférica (z_g).

O perfil de velocidade de entrada da simulação computacional em *CFD* corresponde às edificações de categoria III para a cidade de São Paulo conforme NBR 6123 (ABNT, 2013). A categoria em questão é a mais recorrente no estado e mais habitual para edificações residenciais para diversos sistemas estruturais. Nesta categoria o perfil de velocidades é válido até a altura 350 metros conforme Tabela 1 da NBR em questão. Nestas condições o número de Reynolds é $5.7 \cdot 10^7$ para a velocidade característica considerada, conforme item 6.3.2 da NBR 6123:1988 (ABNT, 2013).

Sendo assim, o perfil de velocidades imposto nas fronteiras de entrada, laterais e topo do domínio é:

$$u(z) = 36.848 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.105}, \quad (5.5)$$

em que u é a velocidade e z é a altura.

FIGURA 5.56 – Campo de velocidades na entrada do domínio. Unidades: $[m/s]$

Fonte: o autor

As demais condições de contorno são as indicadas na subseção 5.1.4.

5.5.2 Geometria e permeabilidade da edificação

Conforme exposto em 5.1.1, a geometria da edificação foi baseada na dimensões recorrentes em sistemas estruturais para contemplar o maior número de casos práticos na engenharia civil. A edificação possui relação entre largura e profundidade de 1:2 e relação de profundidade e comprimento de 2:3 conforme Fig. 5.1. A altura total da edificação é de 30 metros, desta forma possui 10 andares considerando a distância de piso a piso de três metros. A edificação simulada é totalmente impermeável ao ar.

5.5.3 Dimensões do domínio

A convergência de malha aferida na seção 5.2, mostrou-se consistente para malhas estruturadas com 300 mil elementos hexaédricos com refinamento nas paredes do edifício conforme Figs 5.57 a 5.57.

FIGURA 5.57 – Detalhamento da malha em planta

Fonte: o autor

FIGURA 5.58 – Detalhamento da malha em elevação lateral

Fonte: o autor

FIGURA 5.59 – Detalhamento da malha em elevação frontal

Fonte: o autor

As fronteiras do domínio estão afastadas no mínimo a 145 metros da edificação, ou seja, com distâncias superiores a sete vezes o maior lado da edificação, conforme análise da locação da edificação realizada na seção 5.3.

A malha adotada possui os parâmetros de qualidade apresentados Tab. 5.19:

TABELA 5.19 – Parâmetros de qualidade da malha

Parâmetro	Valor
Número de elementos	304320
Razão de aspecto máxima	69.156
Área mínima da face [m^2]	0.25
Área máxima da face [m^2]	929.941
Volume mínimo [m^3]	0.15625
Volume máximo [m^3]	10958.9
Volume total [m^3]	1.48E+07
Não-ortogonalidade máxima	0
Não-ortogonalidade média	0
Distorção máxima	3.41E-13

Fonte: o autor

O modelo de turbulência adotado foi novamente o $k-\varepsilon$ Padrão, o qual exige a utilização de valores iniciais para os campos interno da energia cinética e da turbulenta adotados conforme Launder e Spalding (1974) e descritos na subseção 3.2.

Os esquemas de interpolação adotados para o rearranjo das equações diferenciais em equações algébricas estão descritos em 4.2.3. A solução do sistema algébrico está descrita no item 4.2.2.

O tempo total adotado para simulação em *CFD* foi de 120 segundos com intervalos de gravação a cada 1 segundo. Foi utilizado o *solver* implementado *mPisoFoam*, descrito na seção 4.2.2 para tornar o passo de tempo ajustável até atingir o número de Courant máximo.

O número de Courant máximo foi limitado em 0.5 e o passo de tempo foi inicializado em 10^{-4} . A tolerância da solução do sistema algébrico para as variáveis p , U , k e ε foi de 10^{-6} .

5.5.4 Resultados quantitativos

A força global do vento, usada para dimensionamento da estrutura principal, é calculada a partir da soma vetorial das forças de vento incidindo perpendicularmente a cada uma das fachadas de uma edificação. Para estruturas que possuem eixo de simetria na direção do vento, as forças de pressão nas laterais se anulam, portanto a soma vetorial se resume às forças fachadas a barlavento e a sotavento.

Os métodos previstos pelas normatizações vigentes nacionais e internacionais

apresentados no capítulo. 4 consideram o somatório vetorial das forças para cálculo da força global com a utilização do coeficiente de arrasto.

O coeficiente de arrasto C_a é a relação entre a força global e a força relativa à pressão não perturbada.

$$C_a = \frac{F_a}{qA} = \frac{F_a}{\frac{\rho u^2}{2} A}, \quad (5.6)$$

em que C_a é a coeficiente de arrasto, F_a é a força de arrasto, q é a pressão dinâmica, ρ é a densidade do fluido, u é a velocidade do fluido e A é a área.

A força global atuante na estrutura principal é calculada pela majoração da pressão dinâmica do vento através do coeficiente de arrasto C_a , já que o somatório das forças laterais se anulam.

O coeficiente de arrasto está expresso no item 4.2.3 da NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) para cálculo da força global (força de arrasto):

$$F_a = C_a q A_e, \quad (5.7)$$

em F_a é a força de arrasto, C_a é a coeficiente de arrasto, q é a pressão dinâmica e A_e é a área frontal efetiva.

Os coeficientes aerodinâmicos dados na NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) foram obtidos de testes nos quais o fluxo de ar era moderadamente suave, aproximadamente do tipo de vento que aparece em campo aberto e plano (vento de baixa turbulência), consideração indicada no item 6.5.1 desta norma. Ventos de alta turbulência consideram o efeito da vizinhança, os quais são admitidas reduções dos valores dos coeficientes aerodinâmicos.

O domínio da simulação computacional em relação às considerações da NBR 6123 (ABNT, 2013) é admitido de campo aberto e plano (vento de baixa turbulência). Segundo NBR 6123 (ABNT, 2013), a partir da geometria da edificação temos $C_a = 1.33$ conforme Fig. 5.60:

FIGURA 5.60 – Coeficiente de arrasto para edificações paralelepipedicas em vento de baixa turbulência

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2013)

A *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) é mais explícita como pode ser observado na Eq. 5.9, considerando o somatório das forças a barlavento e a sotavento, desconsiderando as forças laterais já que se anulam:

$$W_D = q_H C_D G_D A, \quad (5.8)$$

e

$$C_D = C_{pe1} - C_{pe2}, \quad (5.9)$$

em que W_D é a pressão oriunda do vento na altura Z em N , q_H é a pressão da

velocidade de projeto em N/m^2 , C_D é o coeficiente de força do vento (coeficiente de arrasto), G_D é o coeficiente do efeito rajada do vento, A é área de projeção do vento na altura Z em m^2 , C_{pe1} é o coeficiente de pressão externa na face de barlavento e C_{pe2} é o coeficiente de pressão externa na face de sotavento.

Considerando as dimensões da edificação simulada, temos os seguintes parâmetros conforme 5.61:

FIGURA 5.61 – Parâmetros para cálculo do coeficiente de arrasto

i) Wall

zone W_U (windward wall)

$B/H \leq 1$	$B/H > 1$
$0.8k_z$	0.6

$B(m)$: building width

$D(m)$: building depth

$H(m)$: reference height

$Z(m)$: height from ground

Factor for vertical profile k_z

$Z \leq Z_b$	$Z_b < Z < 0.8H$	$Z \geq 0.8H$
$(Z_b/H)^{2\alpha}$	$(Z/H)^{2\alpha}$	$0.8^{2\alpha}$

Category	I	II	III	IV	V
Z_b (m)	5	5	10	20	30
Z_G (m)	250	350	450	550	650
α	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

Fonte: *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004)

O coeficiente de arrasto C_D , segundo *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) é:

$$C_{pe1} = 0.8(0.8)^{2 \cdot 0.2} = +0.73, \quad (5.10)$$

$$C_{pe2} = -0.6, \quad (5.11)$$

$$C_D = C_{pe1} - C_{pe2} = +1.33. \quad (5.12)$$

Os métodos apresentados na NBR 6123 (ABNT, 2013) e na *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) resultaram no mesmo valor do C_a , portanto são apresentados na mesma curva na Fig. 5.62. Os coeficientes de arrasto da simulação em *CFD* em cada passo de tempo foram obtidos a partir do processamento do objeto de classe nativo do *OpenFOAM* com título *forceCoeffs1* (GREENSHIELDS, 2018).

FIGURA 5.62 – Gráfico com os comparativos entre os coeficientes de arrasto C_a obtidos por diferentes métodos

Fonte: o autor

TABELA 5.20 – Tabela com os comparativos entre os coeficientes de arrasto C_a obtidos por diferentes métodos

Método	CFD ($t = 120$)	CFD (média temporal)	NBR/Japan Standard
C_a	1.27	1.31	1.33

Fonte: o autor

As reações globais na base da edificação oriundas dos métodos previstos na NBR 6123 (ABNT, 2013) e na *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) foram calculadas de forma analítica conforme Eqs. 5.13 a 5.14 a seguir:

$$F_g = C_a \int_{A_e} q(z) dA, \quad (5.13)$$

e

$$M_g = C_a \int_{A_e} q(z) z dA, \quad (5.14)$$

em que F_g é a resultante de todas as forças exercidas pelo vento sobre uma edificação, M_g é a resultante de todos os momentos exercidos pelo vento sobre uma edificação, C_a é o coeficiente de arrasto, A_e é a área frontal efetiva (área da projeção ortogonal da edificação), q é a pressão dinâmica do vento e z é a altura.

As reações globais da simulação em *CFD* em cada passo de tempo foram obtidos a partir do processamento do objeto de classe nativo do *OpenFOAM* com título *forces1* (GREENSHIELDS, 2018), o qual apresenta o processamento das equações em todos os volumes de controle das superfícies do edifício.

$$\vec{F}_p = \sum_i \rho_i \vec{s}_{f,i} (p_i - p_{ref}), \quad (5.15)$$

e

$$\vec{M}_v = \sum_i s_{f,i} \cdot (\mu \mathbf{R}_{dev}), \quad (5.16)$$

em que $\vec{F}_p$ é o vetor da força global, $\vec{M}_p$ é o vetor do momento global, $s_{f,i}$ é área projetada do vetor i , p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica e $\mathbf{R}_{dev}$ é o tensor de tensão desviadora.

Os resultados das reações globais na base da edificação oriundas das pressões nas fachadas, obtidos através da NBR 6123 (ABNT, 2013) e da *Japanese Standard - Recommendations for Loads on Buildings* (AIJ, 2004) e pela simulação em *CFD* são apresentados a seguir:

FIGURA 5.63 – Comparativos das forças globais

Fonte: o autor

FIGURA 5.64 – Comparativos dos momentos globais

Fonte: o autor

TABELA 5.21 – Tabela com os comparativos entre os coeficientes de arrasto C_a obtidos por diferentes métodos

Reação	CFD ($t = 120$)	CFD (média temporal)	NBR/ <i>Japan Standard</i>
F_g [kN]	653.00	675.27	691.35
M_g [kNm]	10243.80	10583.16	11355.75

Fonte: o autor

5.5.5 Resultados qualitativos

Os resultados dos coeficientes de pressão externa (c_{pe}) em relação aos coeficientes aerodinâmicos NBR 6123 (ABNT, 2013) são apresentados nas figuras 5.65 a 5.70:

FIGURA 5.65 – Resultados do c_{pe} com traçadores

Fonte: o autor

FIGURA 5.66 – Resultados do c_{pe} na fachada frontal

Fonte: o autor

FIGURA 5.67 – Resultados do c_{pe} na fachada lateral direita

Fonte: o autor

FIGURA 5.68 – Resultados do c_{pe} na fachada posterior

Fonte: o autor

FIGURA 5.69 – Resultados do c_{pe} na fachada lateral esquerda

Fonte: o autor

FIGURA 5.70 – Resultados do c_{pe} na cobertura

Fonte: o autor

Os campos de velocidades resultantes são apresentados nas Figs. 5.71 a 5.73:

FIGURA 5.71 – Campo de velocidades em corte no plano z ($t = 120s$). Unidades: $[m/s]$

Fonte: o autor

FIGURA 5.72 – Campo de velocidades em corte no plano y na posição 150 metros ($t = 120s$). Unidades: $[m/s]$

Fonte: o autor

FIGURA 5.73 – Campo de velocidades em corte no plano x na posição 150 metros ($t = 120s$). Unidades: $[m/s]$

Fonte: o autor

5.5.6 Custo computacional

A Tab. 5.22 apresenta o tempo de processamento das simulações e o tamanho total dos arquivos gerados em cada simulação.

TABELA 5.22 – Custo computacional

Parâmetro de análise	Valor
Tempo total de execução [horas]	39.68
Tamanho total dos arquivos gravados [Gigabytes]	3.60

Fonte: o autor

5.6 ACOPLAMENTO *CFD*-MEF

As condições de contorno das simulações em *CFD*, especificadas em 5.1.4, consideram velocidade nula na interface sólido-fluido nas paredes da edificação, ou seja, as superfícies rígidas da edificação apresentam condição de contorno sem deslizamento *no slip* para as superfícies rígidas da edificação. As pressões dinâmicas sobre a edificação não geram deformações na estrutura, já que a edificação foi considerada rígida nas simulações em *CFD*. Para avaliação das deformações foi realizado o acoplamento fraco apresentado no item 3.5.4.

O pórtico espacial para processamento em MEF possui a mesma volumetria e dimensões em planta em relação à simulação em *CFD*. O pórtico foi modelado com 10 pavimentos tipo e cada pé direito possui 3 metros. Todos os nós no nível da

fundação são indeslocáveis quanto à translação e rotação conforme Fig. 5.74:

FIGURA 5.74 – Geometria unifilar do modelo estrutural em MEF (vista isométrica)

Fonte: o autor

Os pilares apresentam dimensões de 19x100cm e as vigas possuem dimensões de 19x60cm conforme Fig. 5.75:

FIGURA 5.75 – Formas do pavimento tipo do modelo estrutural em MEF (em planta)

Fonte: o autor

Para análise da deformabilidade, a estrutura foi considerada de concreto armado com as seguintes propriedades mecânicas do material:

- Coeficiente de Poisson: 0.2;
- Módulo de elasticidade: 28 GPa.

FIGURA 5.76 – Renderização do modelo estrutural em MEF (vista isométrica)

Fonte: o autor

O modelo em MEF foi carregado com três casos:

- Pressões dinâmicas calculadas pela NBR 6123 (ABNT, 2013) com carregamento descrito em 5.5.1;
- Vento sintético (parâmetros descritos a seguir); e
- Pressões resultantes nas superfícies da edificação pelo processamento em *CFD* da subseção 5.5.4 (acoplamento *CFD*-MEF).

O acoplamento *CFD*-MEF foi realizado em cada instante de tempo de 0 a 120, com passo de 1 segundo. O campo de pressões nas superfícies rígidas do modelo

em *CFD* foi processado para cada instante do processamento do modelo em MEF. As pressões foram convertidas em forças nodais por área de influencia. O processamento em MEF considerou a deformabilidade da estrutura do instante $t-1$ na solução da matriz de rigidez no instante seguinte.

FIGURA 5.77 – Pressões em cada volume de controle (*CFD* transferidas para cada instante de tempo no modelo estrutural (MEF))

Fonte: o autor

Para o carregamento no método do vento sintético, considerou o 9º andar como pavimento do centro de rajada, parâmetro S_2 para 3 segundos e 600 segundos. Harmônico ressonante é o quarto para as forças. Período de 0.95 segundos com tempo total de 120 segundos e passo de 1 segundo.

Os resultados dos três métodos são apresentados na Fig. 5.78:

FIGURA 5.78 – Gráfico do deslocamento no topo do pilar P11 obtidos com diferentes métodos

Fonte: (OLIVEIRA FILHO, 2020)

TABELA 5.23 – Tabela do deslocamento no topo do pilar P11 obtidos com diferentes métodos

Deslocamento	NBR	CFD	Vento sintético
Topo do P11 [cm]	1.35	0.8	1.1

Fonte: o autor

Deve ser ressaltado que o campo de deslocamentos dos modelos em MEF está diretamente relacionado com as rigidezes flexionais, axiais, torcionais e cisalhantes dos elementos do modelo estrutural, desta forma, os resultados apresentados na Tab. 5.23 tem mais relevância quanto ao resultado relativo entre os métodos do que seu resultado absolutos em si, já que estes dependem das propriedades do material.

O modelo do pórtico espacial em MEF apresentou deslocabilidades em regime transiente muito próximos para os três métodos analisados (NBR, CFD e vento sintético), sendo o deslocamento limite prescrito pela normatização brasileira neste caso é igual a 1.76 cm. Entre os três métodos adotados, o acoplamento CDF-MEF apresentou os menores efeitos estruturais quanto aos deslocamentos, e consequentemente apresentará as menores aberturas de fissuras e deformações devido à ação de cargas dinâmicas oriundas da ação do vento.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir em relação à metodologia apresentada neste trabalho:

- Os valores dos coeficientes de pressão externa obtidos através da Dinâmica dos Fluidos Computacional apresentaram resultados satisfatórios, com erros relativos em relação ao ensaio experimental inferiores a 2%;
- As curvas de isovalores obtidas através da Dinâmica dos Fluidos Computacional apresentaram mesmas características quanto ao formato e desenvolvimento das concentrações de sobrepressões em relação aos dados experimentais e demonstraram que os resultados das sobrepressões apresentam regiões de maior concentração;
- A utilização da simulação computacional por *CFD* possibilitou a captura de dados derivados, como velocidade, os quais são exigidos em ensaios mais específicos para obtenção em ensaios experimentais;
- A Dinâmica dos Fluidos Computacional permite a manipulação dos parâmetros de vento e de geometria da edificação, e desta forma os ensaios de túnel de vento podem ser realizados exclusivamente para situações com maiores criticidades quanto ao dimensionamento estrutural para edificações com geometrias não contempladas pela NBR 6123:1988 (ABNT, 2013). Esta alternativa permite a redução do número de ensaios experimentais;
- A modificação no solver (*pisoFoam*) para o cálculo da solução numérica apresentou resultados muito significativos em relação ao custo computacional do processamento realizado com o solver da biblioteca nativa. Houve redução de 60% no tempo de total do processamento das simulações computacionais deste trabalho (redução em torno de 70 horas em cada simulação) com a utilização do novo solver implementado;
- As reações horizontais e os momentos fletores totais na fundação calculadas

por *CFD* são respectivamente 3% e 8% menores em relação às reações calculadas pelas normas técnicas brasileira e japonesa;

- As análises comparativas do acoplamento do vento em pórticos espaciais, calculados por MEF, demonstraram que o acoplamento *CFD*-MEF ofereceu melhores níveis de segurança quanto aos estados limites de serviço (ELS) em comparação aos acoplamentos das pressões dinâmicas obtidas pelas normas técnicas e pelo método do vento sintético. O acoplamento fraco *CFD*-MEF apresentou os menores deslocamentos globais e locais (após estabilização e convergência do modelo), e consequentemente menores aberturas de fissuras e deformações.

Em razão dos resultados consistentes do processamento em *CFD* em estruturas rígidas, é recomendado para pesquisas futuras a interação fluido-estrutura através do acoplamento forte, com a implementação das rotinas do *OpenFOAM* para realização do processamento simultâneo dos efeitos dinâmicos (velocidades, pressões e turbulência) com os efeitos estruturais (tensões, deformações e deslocamentos) em estruturas deformáveis sob ação do vento.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721:2006**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios - Procedimento. Versão corrigida 2. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123:1988**: Forças devidas ao vento em edificações. Versão corrigida 2. Rio de Janeiro, 2013.

ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN. **Recommendations for loads on buildings**: Tokyo, 2004.

ASYIKIN, M. T. **CFD simulation of vortex induced vibration of a cylindrical structure**. Dissertação (Mestrado) — Institutt for bygg, anlegg og transport, 2012.

BONAFÉ, G. Ensaio em túnel de vento gera dados não contemplados pela norma da ABNT. **AECweb**, 2017. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/ensaio-em-tunel-de-vento-gera-dados-nao-contemplados-pela-norma-da-abnt_13604_0_1>. Acesso em: 06 jul. 2017.

BRASIL. Lei 8.078 de 11 de setembro de 1990. **Dispõe sobre a proteção do consumidor e dá outras providências.**, Brasília, DF, 1990. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8078.htm>. Acesso em: 12 fev. 2018.

BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. Aerodynamic and aeroelastic analyses on the caarc standard tall building model using numerical simulation. **Computers & Structures**, Elsevier, v. 87, n. 9-10, p. 564–581, 2009.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. 875 (part 3) indian standard code of practice for design loads (other than earthquake) for buildings and structures: part 3 - wind loads. **Bureau of Indian Standards, New Delhi**, 1987.

CHÁVEZ, E. S. Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do vento. **Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte**, 2006.

CHEN, C. J. **Fundamentals of turbulence modelling**. [S.l.]: CRC Press, 1997.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Ambiente Construído**, SciELO Brasil, v. 11, n. 1, p. 145–158, 2011.

- COURANT, R.; FRIEDRICH, K.; LEWY, H. On the partial difference equations of mathematical physics. **IBM journal of Research and Development**, IBM, v. 11, n. 2, p. 215–234, 1967.
- DAGNEW, A. K.; BITSUAMALK, G. T.; MERRICK, R. Computational evaluation of wind pressures on tall buildings. In: **11th American conference on Wind Engineering. San Juan, Puerto Rico**. [S.l.: s.n.], 2009.
- DERAMAN, S.; MAJID, T.; ZAINI, S.; YAHYA, W.; ABDULLAH, J.; ISMAIL, M. Enhancement of CFD validation exercise along the roof profile of a low-rise building. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S.l.], 2018. v. 140, n. 1, p. 012004.
- DOGAN, T.; KASTNER, P. Streamlined CFD simulation framework to generate wind-pressure coefficients on building facades for airflow network simulations. In: . [S.l.: s.n.], 2018.
- DURBIN, P. A reynolds stress model for near-wall turbulence. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 249, p. 465–498, 1993.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos Fundamentos e aplicações**. 3rd. ed. New York: Mc Graw Hill, 2007.
- FORTUNA, A. de O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos básicos e aplicações**. 1st. ed. São Paulo: EDUSP, 2000.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- FRANCO, M. Direct along-wind dynamic analysis of tall structures. **Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo BT/PEF/9303, São Paulo**, 1993.
- FRANCO, M.; MEDEIROS, S. O método do “vento sintético”: Novas considerações. **TQS News, São Paulo/SP**, p. 38–46, 2011.
- GEUZAIN, C.; REMACLE, J.-F. Gmsh: A 3-d finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. **International journal for numerical methods in engineering**, Wiley Online Library, v. 79, n. 11, p. 1309–1331, 2009.
- GREENSHIELDS, C. J. OpenFOAM user guide version 6.0. **OpenFOAM Foundation Ltd., London**, 2018.
- GROSSO, M. Wind pressure distribution around buildings: a parametrical model. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 101–131, 1992.
- GUERRA, A.; PRAVIA, Z. M. C. Obtenção de coeficientes aerodinâmicos através de mecânica computacional de fluidos para determinação de ações em edificações devidas ao vento. **Construmetal 2014**, Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, 2014.

- GUERRERO, J. **Introductory OpenFOAM® Course From 8th to 12th July, 2019**. Wolf Dynamics, University of Genoa, DICCA: [s.n.], 2019. Disponível em: <http://www.wolfdynamics.com/images/OF_intro_training/openfoam.pdf>. Acesso em: 06 set. 2019.
- HÖLSCHER, N.; NIEMANN, H.-J. Towards quality assurance for wind tunnel tests: A comparative testing program of the windtechnologische gesellschaft. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 74, p. 599–608, 1998.
- HOOFF, T. V.; BLOCKEN, B. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the amsterdam arena stadium. **Environmental Modelling & Software**, Elsevier, v. 25, n. 1, p. 51–65, 2010.
- HU, K.; CHENG, S.; QIAN, Y. CFD simulation analysis of building density on residential wind environment. **Journal of Engineering Science & Technology Review**, v. 11, n. 1, 2018.
- ISSA, R. I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. **Journal of computational physics**, Elsevier, v. 62, n. 1, p. 40–65, 1986.
- JATOBÁ, L. F. C. **Desenvolvimento de métodos numéricos para a simulação da transferência de massa no escoamento de misturas multicomponentes semicontínuas com caracterização adaptativa**. Tese (Doutorado) — COOPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- JENSEN, M.; FRANCK, N. **Model-scale tests in turbulent wind**. [S.l.]: Danish Technical Press Copenhagen, 1963.
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974.
- LENZI, C. L. **Sociologia ambiental: risco e sustentabilidade na modernidade**. 1st. ed. São Paulo: EDUSC, ANPOCS, 2006.
- LIU, S.; PAN, W.; ZHAO, X.; ZHANG, H.; CHENG, X.; LONG, Z.; CHEN, Q. Influence of surrounding buildings on wind flow around a building predicted by CFD simulations. **Building and Environment**, Elsevier, v. 140, p. 1–10, 2018.
- LOTURCO, B. **Engenharia do Vento**. 2010. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/156/artigo286688-1.aspx>>. Acesso em: 02 jul. 2017.
- MALLICK, M.; MOHANTA, A.; KUMAR, A.; RAJ, V. Modelling of wind pressure coefficients on c-shaped building models. **Modelling and Simulation in Engineering**, Hindawi, v. 2018, 2018.
- MANFRIM, S. T. Estudo numérico para a determinação das pressões devidas à ação do vento em edifícios industriais. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006.

MATOS, G.; WAGNER, L. Consumption of materials in the united states, 1900-1995. In: ANNUAL REVIEW OF ENERGY AND THE ENVIRONMENT, 23., 1998, Palo Alto. **Anais...** Palo Alto: Annual Reviews, 1998. p. 107–122.

MATTHEWS, E.; AMANN, C.; BRINGEZU, S.; FISCHER-KOWALSKI, M.; HÜTTLER, W.; KLEIJN, R.; MORIGUCHI, Y.; OTTKE, C.; RODENBURG, E.; ROGICH, D.; SCHANDL, H.; SCHÜTZ, H.; VOET, E. V. D.; WEISZ, H. **The weight of nations: material outflows from industrial economies**. Washington, DC, 2000. Disponível em: <http://pdf.wri.org/weight_of_nations.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2017.

MEDVECKÁ, S.; IVÁNKOVÁ, O.; MACÁK, M.; MICHALCOVÁ, V. Determination of pressure coefficient for a high-rise building with atypical ground plan. **Civil and Environmental Engineering**, Sciendo, 2018.

MENDIS, P.; NGO, T.; HARITOS, N.; HIRA, A.; SAMALI, B.; CHEUNG, J. Wind loading on tall buildings. **Electronic Journal of Structural Engineering**, EJSE International, 2007.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **US Standard Atmosphere**: 1962.

OLENKOV, V.; PUZYREV, P. Study of wind effects on unique buildings. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 262**, IOP Publishing, 2017.

OLIVEIRA FILHO, C. E. A. D. **Comportamento de edifícios sob ações dinâmicas de vento**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2020.

PASQUAL, T. C. S. **Um estudo sobre a ação do vento nas estruturas de membrana**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2011.

REINHOLD, T. A. **Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1982.

RHOADS, J. Effects of grid quality on solution accuracy. **OpenFOAM Workshop 2014**, 2014. Disponível em: <<https://afinemesh.files.wordpress.com/2014/07/ofw20141.pdf>>. Acesso em: 06 set. 2018.

SARKAR, P. P.; JONES, N. P.; SCANLAN, R. H. System identification for estimation of flutter derivatives. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 42, n. 1-3, p. 1243–1254, 1992.

SARMENTO, C. V. da S. **Estimativa de parâmetros aerodinâmicos em estruturas com a utilização da dinâmica dos fluidos computacional**. Dissertação (Mestrado), 2015.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. John Wiley New York, 1996.

SIMPSON, C.; WHALLEY, M. Dynamic thermal modelling and physical wind tunnel testing - An important partnership for building simulation 2009 conference. **Building Simulation**, 2009.

SINDUSCON-SP. **Boletim Econômico - Janeiro de 2017**. Disponível em: <<http://www.sindusconsp.com.br/wp-content/uploads/2017/02/01-Janeiro-2017.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

SONDAK, D. L.; PLETCHER, R. H. Application of wall functions to generalized nonorthogonal curvilinear coordinate systems. **AIAA journal**, v. 33, n. 1, p. 33–41, 1995.

STATHOPOULOS, T. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 67, p. 509–532, 1997.

SWAMI, M.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. **ASHRAE TRANSACTIONS 1988**, v. 1, p. 243–266, 1998.

TPU-COE. **Wind Effects on Buildings and Urban Environment Program**: Aerodynamic database of high-rise buildings. 2008. Disponível em: <<http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

VERMA, S.; ROY, A.; LATHER, S.; SOOD, M. CFD simulation for wind load on octagonal tall buildings. **International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE)**, 2015.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson education, 2007.