

Matheus Borges Seidel

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO EFEITO
DE VIZINHANÇA NA AÇÃO DO VENTO EM
EDIFICAÇÕES**

FEIRA DE SANTANA

OUTUBRO/2020

Matheus Borges Seidel

AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO EFEITO DE VIZINHANÇA NA AÇÃO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Orientador: Prof.º Dr.º José Mário Feitosa Lima

Coorientador: Prof.º Dr.º Geraldo José Belmonte dos Santos

Universidade Estadual de Feira de Santana

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

FEIRA DE SANTANA

OUTUBRO/2020

AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO EFEITO DE VIZINHANÇA NA AÇÃO DO
VENTO EM EDIFICAÇÕES

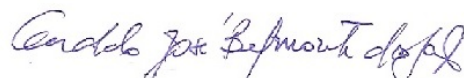
Matheus Borges Seidel

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA
DE SANTANA, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Aprovada por:



Prof. José Mário Feitosa Lima, D.Sc
(Universidade Federal do Rio de Janeiro)



Prof. Geraldo José Belmonte dos Santos, D.Sc
(Laboratório Nacional de Computação Científica)



Prof. Flávio Pietrobon Costa, D.Sc
(Laboratório Nacional de Computação Científica)



Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D.Sc
(Universidade Federal do Rio de Janeiro)

FEIRA DE SANTANA, BA-BRASIL
OUTUBRO DE 2020

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

S46a Seidel, Matheus Borges
Avaliação computacional do efeito de vizinhança na ação do vento em edificações / Matheus Borges Seidel. –, 2020.
123f.:il.

Orientador: José Mário Feitosa Lima.
Coorientador: Geraldo José Belmonte dos Santos
Dissertação(Mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

1. Engenharia do vento 2. Modelagem matemática do vento. 3. Estruturas civis – Determinação do efeito de vizinhança do vento. I. Lima, José Mário Feitosa, orient. II. Santos, Geraldo José Belmonte dos, coorient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU: 624

*Dedico este trabalho
aos meus pais, Carlos e Nete,
ao meu Mano, João Pedro
e ao amor da minha vida, Josy*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, o Autor da Vida que dá significado a tudo que sou e tenho.

Agradeço cordialmente aos meus orientadores Prof. Geraldo Belmonte e Prof. José Mário, pelos valiosos conselhos e contribuições a este trabalho.

Também agradeço à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos concedida, e à toda equipe do PPGECEA - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, que tornou esta dissertação possível.

Dedico um agradecimento especial aos meus pais, Carlos e Nete, que merecem mérito em tudo que vier a alcançar nesta vida, e ao meu Mano, João Pedro, pela amizade sempre presente.

À minha noiva e amor da minha vida, Josy, agradeço pelo carinho, cumplicidade e apoio que tornam a minha vida mais bonita.

*“O vento sopra onde quer, ouves a sua voz,
mas não sabes donde vem, nem para onde vai;
assim é todo o que é nascido do Espírito“*
João 3:4

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO EFEITO DE VIZINHANÇA NA AÇÃO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Matheus Borges Seidel

Outubro de 2020

Orientador: Prof.º Dr.º José Mário Feitosa Lima

Coorientador: Prof.º Dr.º Geraldo José Belmonte dos Santos

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

A verticalização dos edifícios nas grandes cidades tem sido uma tendência crescente nas últimas décadas em função do adensamento urbano nesses locais. O desenvolvimento de edifícios cada vez mais altos suscita a preocupação com as ações de vento sobre essas estruturas. Edificações altas, esbeltas, leves e flexíveis, como os modernos arranha-céus das grandes metrópoles, são particularmente sensíveis às ações aerodinâmicas. Na previsão das cargas de vento sobre estruturas, estudos mostram que a presença de edificações vizinhas podem modificar sensivelmente os esforços aplicados nas faces das estruturas. Sob este contexto e tendo em vista as limitações de complexidade geométrica das normas de vento e o alto custo e escassez de túneis de vento, este trabalho propõe-se a avaliar a interferência da vizinhança no cálculo das pressões nas fachadas de edificações via modelagem computacional, usando para isso o módulo Fluent do software *Ansys Workbench*, na mesma direção de estudos consolidados na área de Engenharia do Vento Computacional (EVC). Este trabalho apresenta ensaios de validação do modelo computacional com níveis crescentes de complexidade, obtidos a partir de resultados publicados na literatura. A partir do processo de validação, novos ensaios foram propostos com diferentes configurações de vizinhança e seus resultados foram comparados com aqueles obtidos para edificação isolada. Um edifício isolado foi ensaiado como modelo *one way* e *two way*, e verificou-se que as diferenças nos resultados não foram consideradas significativas e o segundo modelo apresentou custo computacional mais de 15 vezes superior ao primeiro. Os ensaios mostraram que a existência da vizinhança pode fazer surgir momentos torsores e forças na direção transversal ao escoamento não previstos na condição isolada. O aumento da

distância entre a vizinhança e o edifício modelo faz com que a força aplicada na direção do escoamento aproxime-se do valor calculado na condição da estrutura isolada, enquanto que o mesmo não pode ser dito de forma tão previsível para as forças nas demais direções. A análise dos dados ratifica a validade da utilização destas ferramentas na previsão das cargas de vento na etapa de projetos de estruturas, além de mostrar a importância de, na avaliação do vento, considerar o pior cenário, considerando que o entorno da edificação pode sofrer modificações ao longo do tempo.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Computational Evaluation of the Neighborhood Effect of Wind Action on Buildings

Matheus Borges Seidel

September of 2020

Advisor: Prof. Dr. José Mário Feitosa Lima

Co-Advisor: Prof. Dr. Geraldo José Belmonte dos Santos

Department: Civil and Environment Engineering

The verticalization of buildings in large cities has been a growing trend in recent decades due to the urban densification in these locations. The development of increasingly tall buildings raises concerns about wind loads on these structures. Tall, slender, lightweight and flexible buildings, like the modern skyscrapers in large cities, are particularly sensitive to aerodynamic actions. In predicting wind loads on structures, studies show that the presence of neighboring buildings can significantly modify the stresses applied to the faces of the structures. In this context and in view of the limitations of geometric complexity of wind standards and the high cost and scarcity of wind tunnels, this work aims to evaluate the interference of the neighborhood in the calculation of pressures on building facades via computational modeling, using the Fluent module of the Ansys Workbench software, in the same sense as consolidated studies in the area of Computational Wind Engineering (CWE). This work presents validation tests of the computational model with increasingly levels of complexity, obtained from results published in literature. From the validation process, new tests were proposed with different configurations of neighborhood and their results were compared with those obtained for isolated building. An isolated building was tested as a one way model and two way model, it was found that the differences in results were not considered significant and the second model presented computational cost more than 15 times higher than the first. The tests showed that the existence of a neighborhood can cause torsion moments and forces in the direction transversal to the flow not foreseen in the isolated condition. The increase in the distance between the neighborhood and the model building causes the force applied in the flow direction to approach the value calculated for the isolated structure, the same cannot be said so predictably for the forces

in the other directions. Analysis of the data confirms the validity of the use of these tools in the calculation of wind loads in the structural design stage, in addition to showing the importance of considering the worst scenario when evaluating the wind, considering that the building's surroundings may undergo modifications over time.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Pirâmide de Gizé. Fonte: Liberato (2006)	1
Figura 1.2 – Catedral de Lincoln. Fonte: Haywood (2009)	2
Figura 1.3 – Torre Eiffel. Fonte: Haywood (2009)	3
Figura 1.4 – Reconstrução do Meyer-Kiser Bank Building em 1927. Fonte: Fishbaugh (1927)	8
Figura 1.5 – Colapso da Ponte Tacoma Narrows em 1940. Fonte: Press (1940)	8
Figura 2.1 – Perfil de velocidade média do vento. Fonte: Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2004)	11
Figura 2.2 – Barlavento e sotavento.	12
Figura 2.3 – Esteira de uma edificação rombuda. Fonte: Cook (1985)	14
Figura 2.4 – Edifício isolado e parcialmente protegido. Fonte: Houghton e Carruthers (1976) (adaptado)	15
Figura 2.5 – Deflexão vertical do vento. Fonte: Wise (1971)	16
Figura 2.6 – Efeito Venturi. Fonte: Carpeggiani (2004)	17
Figura 2.7 – Desprendimento de vórtices. Fonte: Netto (1998)	18
Figura 2.8 – Vórtices estacionários a sotavento de um cilindro. Fonte: Braun (2007)	18
Figura 2.9 – Início do desprendimento de vórtices. Fonte: Cook (1985)	19
Figura 2.10–Desprendimento alternado de vórtices. Fonte: Cook (1985)	19
Figura 2.11–Vórtices de von Kàrman. Fonte: Research Gate (2016)	20
Figura 2.12–Vórtices de von Kàrman. Fonte: Pravia e Drehmer (2004)	20
Figura 2.13–Aplicação da equação de Bernoulli. Fonte: Carrera (2007) (adaptado)	23
Figura 2.14–Mapa de isopleias. Fonte: ABNT (1988)	25
Figura 2.15–Modelo do Empire State Building usado em túnel de vento. Fonte: Harris (1934)	28
Figura 2.16–Modelos ensaiados. Fonte: Blessmann (1985) (adaptado)	30
Figura 2.17–Vizinhança do modelo localizado em São Paulo. Fonte: Blessmann (1992)	30
Figura 2.18–Vizinhança do modelo localizado no Rio de Janeiro. Fonte: Blessmann (1992)	31
Figura 2.19–Coeficiente de torção em função do ângulo de incidência do vento para os edifícios em (a) São Paulo e (b) Rio de Janeiro. A linha tracejada refere-se ao modelo isolado e a linha contínua, ao modelo com vizinhança. Fonte: Blessmann (1992)	31
Figura 2.20–CAARC Standard Tall Building. Fonte: Bênia (2013)	33
Figura 2.21–Configuração 1. Fonte: Bênia (2013)	33
Figura 2.22–Configuração 2. Fonte: Bênia (2013)	33
Figura 2.23–Configuração 3. Fonte: Bênia (2013)	34

Figura 2.24–Posições relativas dos edifícios. Fonte: Kim, Tamura e Yoshida (2015) (adaptado)	34
Figura 2.25–Posições relativas dos edifícios. Fonte: Vieira, Brito e Loredo-Souza (2018) (adaptado)	35
Figura 2.26–Ensaio realizado por Braun e Awruch (2009): (a) Ponte Tacoma, (b) silo cilíndrico, (c) edificação com ventilação, (d) conjunto de edifícios e (e) edifício vertical prismático. Fonte: Braun e Awruch (2009)	38
Figura 2.27–Ensaio realizado por Awruch, Braun e Greco (2015): (a) Elevação da ponte sobre rio Guamá, (b) seção transversal da ponte e (c) campo de pressão sobre o edifício alto. Fonte: Awruch, Braun e Greco (2015)	39
Figura 2.28–Coeficientes de pressão por ponto de medição. Fonte: Gunawardena et al. (2017) (adaptado)	39
Figura 2.29–Correlação dos coeficientes de pressão obtidos pelos dois métodos. Fonte: Gunawardena et al. (2017) (adaptado)	40
Figura 2.30–Arranjo típico de método passivo. Fonte: Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004)	41
Figura 2.31–Outros tipos de dispositivos utilizados nos métodos passivos. Fonte: Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004)	41
Figura 2.32–Dispositivo emissor de jatos de ar. Fonte: Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004)	42
Figura 2.33–Fotografia e respectivo modelo reduzido de um edifício com vizinhança. Fonte: Nunez, Loredo-Souza e Rocha (2012)	42
Figura 2.34–Algoritmo de simulação aeroelástica. Fonte: Awruch, Braun e Greco (2015)	47
Figura 3.1 – Mapeamento injetivo. Fonte: Murad (2008)	50
Figura 3.2 – Volume de controle fechado. Fonte: Murad (2008) (adaptado)	51
Figura 3.3 – Experimento realizado por Reynolds para avaliar a turbulência no escoamento. Fonte: Munson et al. (2009) (adaptado).	57
Figura 5.1 – Domínio do fluido em torno do cilindro 2D. Dimensões em metros	65
Figura 5.2 – Coeficientes de pressão em torno do cilindro com escoamento $Re = 40$	67
Figura 5.3 – Campo de pressão em torno do cilindro durante resposta estacionária	68
Figura 5.4 – Linhas de corrente em torno do cilindro durante resposta estacionária	68
Figura 5.5 – Linhas de corrente com zoom na região indicada na figura anterior	69
Figura 5.6 – Coeficientes de pressão em torno do cilindro com escoamento $Re = 10^3$	70
Figura 5.7 – Campo de pressão instantâneo em torno do cilindro	71
Figura 5.8 – Linhas de corrente em torno do cilindro num dado instante	71
Figura 5.9 – Domínio do fluido em torno da viga	72
Figura 5.10–Campo de velocidade em torno da viga	73
Figura 5.11–Perfil de velocidade no (a) conduto superior e (b) conduto inferior	73

Figura 5.12–Campo de pressão em torno da viga	74
Figura 5.13–Pressões aplicadas na viga pela ação do fluido. Modelo em perspectiva	75
Figura 5.14–Deslocamentos ao longo do comprimento da viga	75
Figura 5.15–Características geométricas do escoamento. Fonte: Braun (2007) (adaptado)	76
Figura 5.16–Perfil do vento na entrada	77
Figura 5.17–Malha do edifício isolado	77
Figura 5.18–Convenção para determinação dos coeficientes. Fonte: Braun (2007) (adaptado)	79
Figura 5.19–Campo de pressão instantâneo - Plano vertical de simetria	80
Figura 5.20–Campo de pressão instantâneo - Plano horizontal a 30,0 m do solo	80
Figura 5.21–Linhas de corrente instantâneas - Plano vertical de simetria	81
Figura 5.22–Linhas de corrente - Plano horizontal a 30,0 m do solo	82
Figura 5.23–Disposição dos edifícios	82
Figura 5.24–Malha do edifício com vizinhança	83
Figura 5.25–Perfil do vento na entrada	84
Figura 5.26–Campo de pressão - Vento a 0° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo (metade da altura dos edifícios)	86
Figura 5.27–Campo de pressão - Vento a 0° - Plano vertical de simetria	86
Figura 5.28–Linhas de corrente - Vento a 0° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo (metade da altura dos edifícios)	87
Figura 5.29–Linhas de corrente - Vento a 0° - Plano vertical de simetria	87
Figura 5.30–(a) Escoamento de corpo isolado, (b) interferência na esteira e (c) escoamento deslizante. Fonte: Cook (1990) (adaptado)	87
Figura 5.31–Campo de pressão - Vento a 90° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo	88
Figura 5.32–Campo de pressão - Vento a 90° - Plano vertical passando pelo eixo do modelo	88
Figura 5.33–Linhas de corrente - Vento a 90° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo	89
Figura 5.34–Linhas de corrente - Vento a 90° - Plano vertical passando pelo eixo do modelo	89
Figura 6.1 – Dimensões do edifício analisado	91
Figura 6.2 – Volume de controle da análise	92
Figura 6.3 – Malha do edifício isolado	92
Figura 6.4 – Perfil de vento na entrada	93
Figura 6.5 – Modelo aerodinâmico - Campo de pressão em plano horizontal y=30,0m	95
Figura 6.6 – Modelo aerodinâmico - Zoom no campo de pressão em plano horizontal y=30,0m	95
Figura 6.7 – Modelo aerodinâmico - Campo de pressão em plano vertical de simetria	96
Figura 6.8 – Modelo aerodinâmico - Linhas de corrente em plano horizontal y=30,0m	96

Figura 6.9 – Modelo aerodinâmico - Linhas de corrente em plano vertical de simetria	97
Figura 6.10–Modelo aerodinâmico - Perspectiva tridimensional das linhas de corrente em plano vertical de simetria	98
Figura 6.11–Modelo aerodinâmico - Perspectiva tridimensional das linhas de corrente em plano horizontal $y=30,0m$	98
Figura 6.12–Configuração de vizinhança IA. Dimensões em metros	99
Figura 6.13–Configuração de vizinhança IB. Dimensões em metros	99
Figura 6.14–Configuração de vizinhança IC. Dimensões em metros	99
Figura 6.15–Configuração de vizinhança IIA. Dimensões em metros	100
Figura 6.16–Configuração de vizinhança IIB. Dimensões em metros	100
Figura 6.17–Configuração de vizinhança IIC. Dimensões em metros	100
Figura 6.18–Configuração de vizinhança IIIA. Dimensões em metros	101
Figura 6.19–Configuração de vizinhança IIIB. Dimensões em metros	101
Figura 6.20–Configuração de vizinhança IIIC. Dimensões em metros	101
Figura 6.21–Malha do edifício com vizinhança	102
Figura 6.22–Configuração IA - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	103
Figura 6.23–Configuração IA - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	103
Figura 6.24–Configuração IB - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	104
Figura 6.25–Configuração IB - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	104
Figura 6.26–Configuração IC - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	105
Figura 6.27–Configuração IC - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	105
Figura 6.28–Configuração IIA - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	106
Figura 6.29–Configuração IIA - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	106
Figura 6.30–Configuração IIB - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	107
Figura 6.31–Configuração IIB - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	107
Figura 6.32–Configuração IIC - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	108
Figura 6.33–Configuração IIC - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	108
Figura 6.34–Configuração IIIA - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	109
Figura 6.35–Configuração IIIA - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	109
Figura 6.36–Configuração IIIB - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	110
Figura 6.37–Configuração IIIB - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	110
Figura 6.38–Configuração IIIC - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$	111
Figura 6.39–Configuração IIIC - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo	111
Figura 6.40–Configuração de vizinhança IVA. Dimensões em metros	113
Figura 6.41–Configuração de vizinhança VA. Dimensões em metros	113
Figura 6.42–Configuração de vizinhança VIA. Dimensões em metros	113

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Propriedades do escoamento - $Re = 40$	66
Tabela 5.2 – Propriedades do escoamento - $Re = 10^3$	69
Tabela 5.3 – Propriedades do escoamento - Viga entre dois condutos	72
Tabela 5.4 – Propriedades da viga	74
Tabela 5.5 – Propriedades do escoamento - Edifício isolado	78
Tabela 5.6 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício isolado	79
Tabela 5.7 – Propriedades do escoamento - Edifício com vizinhança	84
Tabela 5.8 – Coeficientes médios de força na direção do escoamento - Edifício com vizinhança	84
Tabela 5.9 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança	85
Tabela 6.1 – Propriedades do escoamento - Edifício isolado	93
Tabela 6.2 – Propriedades mecânicas do modelo estrutural	94
Tabela 6.3 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício isolado	94
Tabela 6.4 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IA	103
Tabela 6.5 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IB	104
Tabela 6.6 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IC	105
Tabela 6.7 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIA	106
Tabela 6.8 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIB	107
Tabela 6.9 – Coeficientes de força e momento - Edifício com vizinhança IIC	108
Tabela 6.10 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIIA	109
Tabela 6.11 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIIB	110
Tabela 6.12 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIIC	111
Tabela 6.13 – Coeficientes médios de força e momento - Vizinhanças IVA, VA e VIA	114
Tabela 6.14 – Fator de Vizinhança referente a CF_z	114

Lista de símbolos

h	Altura
z_d	Altura da subcamada sobre a superfície
z_{ref}	Altura de referência
z	Altura em análise
A	Área
A_e	Área efetiva
C	Coefficiente aerodinâmico
CF_i	Coefficiente de força na direção i
CM_i	Coefficiente de momento em torno de i
\bar{S}_{ij}	Componentes do tensor taxa de deformação
l	Comprimento característico do escoamento
C_S	Constante de Smagorinsky
S	Espaçamento livre entre as edificações
p	Expoente de característica do terreno
S_2	Fator de rugosidade do entorno, dimensões e altura da edificação
S_1	Fator topográfico
S_3	Fator de utilização
FV	Fator de vizinhança
F	Força
X_i	Força de campo na direção i
F_c	Forças de contato

F_g	Forças de volume
g	Gravidade
b	Largura
P	Pressão
q	Pressão estática no ponto de obstrução
I	Matriz identidade
Q	Momento linear
Ma	Número de Mach
Re	Número de Reynolds
t	Tempo
v	Velocidade
v_o	Velocidade básica
v_k	Velocidade característica
c	Velocidade do som no meio
$\bar{v}(z_{ref})$	Velocidade média do vento na altura de referência z_{ref}
$\bar{v}(z)$	Velocidade média do vento na altura z
\vec{n}	Vetor normal
V	Volume
δ_{ij}	Delta de Kronecker
$\bar{\Delta}$	Dimensão característica do filtro de escalas
ρ	Massa específica
γ	Peso específico
τ_{ij}^{SGS}	Tensor de tensões de submalha
σ	Tensor tensão de segunda ordem
ν	Viscosidade cinemática molecular
μ	Viscosidade dinâmica

ν_t	Viscosidade turbulenta
λ	Viscosidade volumétrica

Sumário

	1 INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	5
1.2	JUSTIFICATIVA	5
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	9
	2 ENGENHARIA DO VENTO	10
2.1	VENTO NATURAL	10
2.2	FENÔMENOS AERODINÂMICOS NAS EDIFICAÇÕES	12
2.3	NBR 6123 - FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES	22
2.4	DETERMINAÇÃO DO EFEITO DE VIZINHANÇA DO VENTO EM ESTRUTURAS CIVIS	28
2.4.1	Estudos em túnel de vento	28
2.4.2	Estudos com modelagem numérico-computacional	36
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	40
2.6	ENGENHARIA DO VENTO COMPUTACIONAL	44
	3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO VENTO	49
3.1	MODELAGEM DE SISTEMAS CONTÍNUOS	49
3.1.1	Hipóteses básicas	49
3.1.2	Equação de conservação da massa	50
3.1.3	Equação de conservação do momento linear	52
3.2	ABORDAGENS DE EULER E LAGRANGE	54
3.3	EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES	55
3.4	TURBULÊNCIA	56
	4 MÉTODO	62
	5 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	65
5.1	CILINDRO 2D $Re = 40$	65
5.2	CILINDRO 2D $Re = 10^3$	69
5.3	VIGA ENTRE DOIS CONDUTOS	72
5.4	EDIFÍCIO ALTO ISOLADO	76
5.5	EDIFÍCIO ALTO COM VIZINHANÇA	82
	6 ENSAIOS E RESULTADOS	91
6.1	EDIFÍCIO ISOLADO	91
6.2	EDIFÍCIO COM VIZINHANÇA	98

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

O adensamento e conseqüente verticalização das edificações nos centros urbanos é uma tendência marcante nas últimas décadas, sendo o resultado do crescimento exponencial das grandes cidades em todo o mundo. Esse processo de verticalização urbana tem suscitado estudos na área da aerodinâmica, pois, com o aumento da altura dos edifícios, cresce também a preocupação com as cargas de vento sobre estas estruturas tipicamente esbeltas e flexíveis, que podem sofrer efeitos locais ou globais, como arrancamento de vedações e deslocamentos horizontais excessivos.

As primeiras grandes estruturas desenvolvidas foram as pirâmides no Antigo Egito, construídas em torno de 2600 a.C., sendo a maior delas a Grande Pirâmide de Gizé (Figura 1.1), com 139 metros (JONES, 2014), que permaneceu como a edificação mais alta do mundo por quase 4000 anos. Apenas no século XIV a pirâmide egípcia foi superada pela Catedral de Lincoln (Figura 1.2), localizada na cidade homônima na Inglaterra. A catedral anglicana em estilo gótico tinha 160 metros de altura e permaneceu com o recorde de construção mais alta do mundo por 238 anos, quando teve sua torre mais alta destruída em 1549 durante uma tempestade com fortes rajadas de vento. Após esta data e até o final do século XIX, outras estruturas altas foram construídas, mas sem grandes avanços no que diz respeito à dimensão vertical/esbeltez.



Figura 1.1 – Pirâmide de Gizé. Fonte: [Liberato \(2006\)](#)



Figura 1.2 – Catedral de Lincoln. Fonte: [Haywood \(2009\)](#)

Após a Primeira Revolução Industrial, fatores como o desenvolvimento de novas tecnologias, criação de novas indústrias, avanços na economia de mercado, aprimoramento da eficiência agrícola, dentre outros, contribuíram para que muitos moradores do campo migrassem para as zonas urbanas, provocando um grande crescimento populacional (não muito bem planejado) nas cidades. Essa tendência de crescimento iniciou-se principalmente na Inglaterra em meados do século XVIII, e espalhou-se pela Europa, América do Norte e quase todo o mundo, exigindo que o espaço nas cidades fosse otimizado em função do aumento vertiginoso da demanda por espaço.

Estruturas desenvolvidas a partir deste período já mostravam-se sensíveis aos efeitos aerodinâmicos, especialmente em pontes e estruturas metálicas esbeltas. Um exemplo marcante é o projeto da Torre Eiffel (Figura 1.3), que foi construída em 1889 e atingiu 300 metros de altura. Gustave Eiffel, engenheiro que projetou e deu nome à torre, considerou a resistência da edificação ao vento o principal requisito de projeto da estrutura. A partir do início do século XX, a produção de materiais mais leves e resistentes, tecnologias construtivas mais eficientes, desenvolvimento de elevadores modernos e os altos custos dos terrenos incentivaram a construção de edificações cada vez mais altas ([FONTES, 2003](#); [FILHO, 1992](#)).

No Brasil, o processo de verticalização urbana começou um pouco mais tarde, intensificando-se a partir de 1964 com a criação do Banco Nacional da Habitação (BNH) ([SOUSA, 1989](#)). As estatísticas recentes mostram claramente esta intensa concentração urbana na população brasileira. Em 2017, um estudo realizado pela Embrapa (SP) calculou que 80% da população habitava apenas 0,63% do território. No censo de 2010 do IBGE, verificou-se que 84,4% da população brasileira era urbana e, de acordo com a ONU-Habit, este percentual deve ultrapassar 90% até 2030.



Figura 1.3 – Torre Eiffel. Fonte: [Haywood \(2009\)](#)

Neste contexto, com a utilização de estruturas cada vez mais altas, esbeltas e leves, aumentou-se também a preocupação com os efeitos do vento, especialmente dinâmicos, sobre essas edificações, pois, em contraste com construções antigas, tipicamente baixas e rígidas, as estruturas modernas são particularmente sensíveis a cargas aerodinâmicas ([BLESSMANN, 1986](#)). Desprendimento alternado de vórtices, drapejamento, galope e martelamento, por exemplo, além da ação de forças estáticas, podem ter efeitos significativos em estruturas particularmente flexíveis.

Devido às baixas frequências naturais de vibração e baixa rigidez das estruturas modernas, torna-se imprescindível analisar os efeitos do vento nestas edificações de forma mais acurada. Por isso, estudos específicos são necessários para determinar as propriedades aerodinâmicas das estruturas e avaliar como seus elementos interagem com escoamentos de fluidos nos quais estão imersos.

No cálculo das pressões de vento nas estruturas é também importante considerar os efeitos aplicados pela vizinhança onde o edifício analisado está inserido. A influência de construções lindeiras é particularmente importante nos grandes centros urbanos, onde a presença de muitas estruturas influi na forma como o vento atua na região ao modificar a área de escoamento do ar, criar zonas concentradas de altas e baixas pressões, provocar o surgimento de vórtices e alterar a direção principal das rajadas.

Ao contrário do que pode parecer intuitivo, a existência de construções vizinhas não necessariamente implica em um efeito de proteção à ação do vento. A vizinhança pode, de fato, oferecer algum tipo de proteção, mas pode também criar cenários desfavoráveis e

umentar as pressões aerodinâmicas, como evidenciam [Blessmann \(1992\)](#) e [Bênia \(2013\)](#).

A interferência da vizinhança é importante mesmo nos casos em que esta oferece proteção e diminui as pressões exercidas pelo vento em termos absolutos. Determinadas configurações de entorno podem inverter o sentido da ação do vento (usualmente de sobrepressão para sucção) ou criar excentricidades que provoquem momentos torsores nos pilares, condições que podem não ser previstas em projeto se um estudo aerodinâmico não for realizado corretamente.

Ao projetar uma estrutura, deve-se também considerar a possibilidade de modificações futuras na vizinhanças, o que, na maioria dos casos práticos, pode ser muito difícil de se fazer com exatidão. Sendo assim, faz-se necessário avaliar de maneira mais precisa a forma que a vizinhança pode afetar as edificações e, então, considerar a pior situação hipotética futura.

Além de ser um fator relevante por motivos claros de segurança, visto que os elementos estruturais devem ser dimensionados conforme os esforços mecânicos aplicados, o estudo das cargas de origem eólica é um requisito determinante no sucesso de projetos de produtos e estruturas submetidos a escoamentos de ar. Como afirma [Blessmann \(1986\)](#), o estudo aerodinâmico viabiliza o projeto de estruturas mais leves e eficientes, proporcionando uma maior economia à execução das mesmas ao evitar superdimensionamentos dispendiosos.

O estudo dos efeitos do vento nas edificações deu origem à chamada Engenharia do Vento (EV), que trata do comportamento do escoamento de ar em sua interação com estruturas. A EV, sendo um ramo relativamente novo da engenharia, ainda apresenta lacunas importantes e encontra-se em pleno desenvolvimento. Tradicionalmente, os trabalhos em EV utilizaram-se de ensaios físicos em túneis de vento que simulam modelos em escala reduzida das estruturas reais submetidas a um vento artificial produzido por um ventilador e conjunto de acessórios convenientemente dispostos. Apesar da validade do uso dos túneis de vento, sua aplicação é onerosa, devido aos altos custos de implantação e manutenção dos laboratórios, e sua quantidade é escassa para torná-los acessíveis. Além disso, os resultados obtidos através destes equipamentos não são isentos de erros, tendo em vista as imperfeições na Teoria de Semelhança, instrumentos de medição e nas paredes do túnel e modelos reduzidos, por exemplo.

Nas últimos anos, especialmente a partir da segunda metade da década de 80, o avanço da computação científica deu origem à chamada Engenharia do Vento Computacional (EVC), que utiliza ferramentas computacionais para, através de modelagens e simulações numéricas, resolver problemas da EV. Embora a EVC lide com as limitações da capacidade de processamento dos computadores, seu desenvolvimento tem sido viabilizado pelos notórios avanços na computação gráfica e científica, muitas vezes incentivados até pela indústria do cinema e dos jogos digitais, além do uso de modelos de turbulência, que permitem realizar simulações numéricas com custo computacional exequível.

Nesta perspectiva, a EVC tem se apresentado como uma alternativa viável para resolução de problemas reais de estruturas submetidas a escoamento de vento, inclusive com a consideração dos já mencionados efeitos de vizinhança.

Nesse sentido, o presente trabalho visa realizar experimentos numérico-computacionais para avaliar a influência da vizinhança nas pressões aplicadas pelo vento nas estruturas usando o programa *Ansys Inc.*. Como será mostrado no decorrer do texto, a modelagem computacional de problemas de vento inclui uma série de desafios, mas apresenta-se como uma alternativa sólida e confiável para análise aerodinâmica como complementação e aprimoramento dos métodos experimentais realizados em túnel de vento.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral:

Avaliar o grau de interferência de vizinhança nas pressões exercidas pelo vento em edificações por meio da modelagem numérico-computacional.

Objetivos específicos:

- (a) Avaliar a estratégia de análise da interação fluido-estruturas entre os métodos parcialmente acoplado (*one way*) e completamente acoplado (*two way*).
- (b) Selecionar problemas da literatura para simulação, visando verificação e validação da modelagem.
- (c) Realizar a verificação e validação, através de comparação com resultados da literatura, da modelagem computacional de problemas de escoamento de fluidos (ar) com barreiras (estruturas), em ordem crescente de complexidade, visando definir os melhores parâmetros de modelagem.
- (d) Escolher um problema e fazer análise paramétrica do efeito de vizinhança em uma edificação, considerando a posição e distância das edificações vizinhas.
- (e) Comparar os resultados obtidos com os fornecidos pela norma brasileira NBR 6123.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como afirmado anteriormente, é imprescindível estimar as cargas aerodinâmicas que atuam nas edificações para garantir a segurança e eficiência de estruturas arrojadas,

esbeltas e flexíveis, típicas de grandes centros urbanos densamente povoados. Conforme será apresentado na seção 2.4, muitos estudos tem sido feitos para prever o comportamento dos campos de pressão em torno de edificações onde a influência da vizinhança é relevante; apesar disto, ainda muito há de ser feito para estabelecer um conhecimento sólido que possa ser cristalizado em normas e procedimentos que tratem especifica e detalhadamente da influência de edifícios vizinhos (THORDAL; BENNETSEN; KOSS, 2019).

Por sua própria natureza física, escoamento de fluidos usualmente implica em problemas complexos modelados pelas equações de Navier-Stokes, cuja solução numérica, em casos reais, exige técnicas sofisticadas e um grande esforço computacional para obtenção de resultados confiáveis. Devido à sua ausência de estrutura cristalina e desorganização de suas moléculas em escala microscópica, fluidos são caracterizados fisicamente pela capacidade de escoar continuamente quando tensionados. Matematicamente, esta propriedade implica que as equações de fluidos sejam dadas em função do campo de velocidade (descrição euleriana), enquanto os problemas de sólidos são usualmente descritos em termos do campo de deslocamento (descrição lagrangeana).

Esta complexidade que envolve o comportamento dos fluidos torna difícil a sua modelagem matemática, especialmente quando aplicada a problemas de vento com a presença de turbulência. De acordo com Murakami (1997), dois motivos tornam difícil a modelagem de problemas de vento: a existência de obstáculos (estruturas) ao escoamento e o formato rombudo desses obstáculos, isto é, possuindo cantos expostos e arestas vivas que geram perturbações no fluxo de ar, além de sua permeabilidade e esbeltez. Além disso, se for considerada a permeabilidade e deformabilidade da estrutura, a modelagem deve ser ainda mais sofisticada. Essa complexidade é evidenciada pela ausência de soluções analíticas, universalmente precisas e determinadas diretamente a partir de leis físicas. No campo da matemática, por exemplo, ainda existem vários problemas não solucionados na área de escoamento de fluidos.

A dificuldade de solução dos problemas é agravada nos casos em que o escoamento é turbulento (caótico) e modelos matemáticos para consideração da turbulência são necessários para simular com grau de exatidão aceitável as características e os efeitos do vento natural.

A própria história da Mecânica dos Fluidos mostra que diversos engenheiros e pesquisadores preocuparam-se em realizar experimentos para determinar equações empíricas para os diversos casos particulares em análise (NETTO, 1998). Portanto, verifica-se a necessidade de desenvolvimento de estudos específicos, físicos ou numéricos, para determinar de forma confiável as cargas de vento nas estruturas.

A importância de se calcular as cargas de vento é evidenciada em diversos acidentes registrados na história da engenharia. Nos casos mais graves, os danos causados pelo vento podem comprometer a estrutura global de determinadas edificações, levando-as à

completa ruína. Em outros casos, a força do vento pode causar danos locais à estrutura ou aos elementos construtivos, como telhas, esquadrias, vidros, revestimentos cerâmicos e mobiliário; embora menos grave, esse último caso é relativamente comum e pode acarretar grandes prejuízos financeiros e até humanos.

De acordo com [Blessmann \(1986\)](#) as causas dos acidentes relacionados ao vento podem ser divididas em aerodinâmicas e estruturais. Dentre as causas aerodinâmicas, pode-se citar:

- Coeficientes aerodinâmicos: a utilização de coeficientes aerodinâmicos incorretos pode levar a danos causados pelo vento, especialmente em coberturas ou arestas vivas, onde sucções intensas são comuns e nem sempre previstas no projeto estrutural ou projeto de revestimento/cobertura.

- Velocidade máxima do vento: a velocidade do vento é um dos fatores determinantes na mensuração das cargas aerodinâmicas, pois a força do vento varia com o quadrado da sua velocidade. O valor para velocidade máxima do vento varia em função da região do país e das condições em torno da construção e está prevista na norma brasileira de vento, NBR 6123, conforme será mostrado na seção [2.3](#).

- Pressão interna: a força do vento é sempre resultado de um gradiente de pressão que produz o deslocamento da massa de ar. Por isso, baixas pressões internas tendem a diminuir as forças do vento nas zonas de sucção, enquanto sobrepressões internas (devido a entrada de ar através de aberturas) somam-se às sucções externas, intensificando a força aplicada.

- Objetos lançados pelo vento: de forma indireta, o vento pode causar danos ao arremessar objetos soltos do solo ou de outras edificações, como telhas, peças cerâmicas, árvores e fragmentos diversos. Além do risco de acidentes com vítimas humanas, esses projéteis são particularmente perigosos em esquadrias ou fachadas de vidro.

Dentre as causas estruturais, pode-se citar a falta de ancoragem de elementos construtivos, contraventamento insuficiente, fundações inadequadas e deformações excessivas.

Um caso clássico de acidente provocado pelo vento é o do Meyer-Kiser Bank Building, Flórida-EUA, edifício que já esteve entre os mais altos de Miami. A construção foi inaugurada em março de 1926 e em setembro do mesmo ano foi atingida por um furacão, o que deformou sua estrutura metálica e provocou o arrancamento de diversas paredes. O Meyer-Kiser Bank Building, que inicialmente tinha 17 pavimentos, foi reconstruído posteriormente (Figura [1.4](#)), mas com apenas 7 pavimentos ([BLESSMANN, 1986](#); [HISTORY, 2015](#)).

Outro exemplo icônico de acidente associado à ação do vento é o da Ponte Tacoma Narrows (Figura [1.5](#)), localizada no estado de Washington-EUA. A ponte suspensa foi construída em estrutura metálica com tabuleiro de seção H e foi aberta ao público em julho

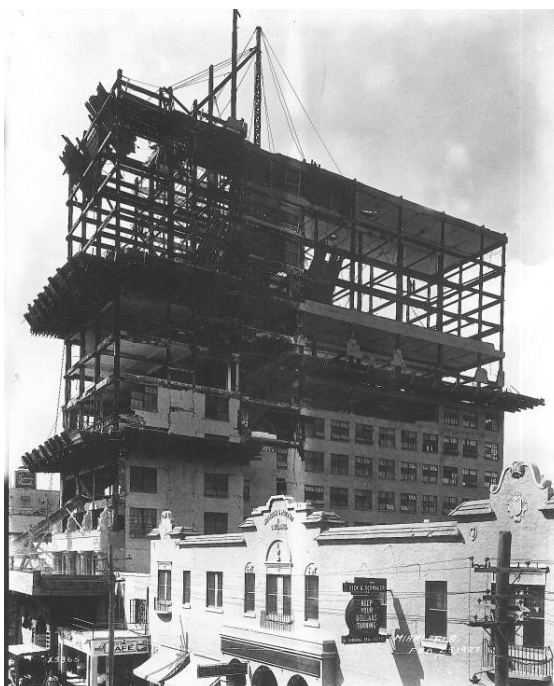


Figura 1.4 – Reconstrução do Meyer-Kiser Bank Building em 1927. Fonte: [Fishbaugh \(1927\)](#)

de 1940. Desde a etapa de construção, a estrutura apresentava deformações excessivas, o que lhe rendeu o apelido de "Gertie Galopante", mas até então não se verificava risco à segurança da edificação. Apenas 4 meses após sua inauguração, no dia 7 de novembro, a estrutura colapsou, estando submetida a ventos de apenas 67 km/h. Ao contrário do que é afirmado em diversos livros de física básica, a ruína da Ponte Tacoma não ocorreu devido à ressonância, mas sim a um *flutter* aeroelástico torcional, fenômeno que ocorreu por 45 minutos antes da ruptura global do tabuleiro da ponte ([BILLAH; SCANLAN, 1991](#)).

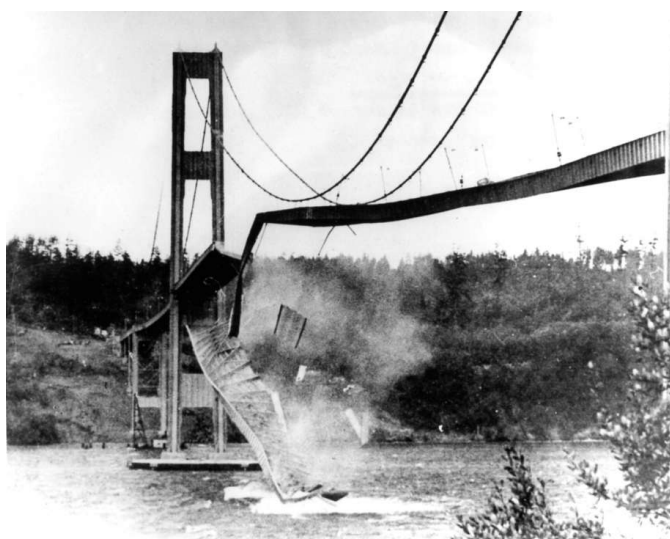


Figura 1.5 – Colapso da Ponte Tacoma Narrows em 1940. Fonte: [Press \(1940\)](#)

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

No presente capítulo, os problemas aerodinâmicos a serem considerados neste trabalho são contextualizados historicamente e evidencia-se sua abordagem relativamente recente na engenharia. Também são apresentados os objetivos do presente trabalho e justificativas que ratificam a necessidade prática de estudos em aerodinâmica.

O capítulo 2 introduz os conceitos básicos, a fundamentação teórica da Engenharia do Vento (EV) e os principais fenômenos aerodinâmicos são apresentados de forma qualitativa; é mencionada a NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações e conceitua-se a chamada Engenharia do Vento Computacional, ramo dentro da EV no qual localiza-se este trabalho. Além disso, são apresentados estudos que tratam dos efeitos do vento sobre estruturas considerando a interferência da vizinhança. Os trabalhos citados são separados entre aqueles realizados através de experimentos físicos em túnel de vento e aqueles implementados através de modelagem e simulação numérico-computacional

No capítulo 3 são apresentadas as hipóteses básicas e as equações que modelam o escoamento de ar e resolvem os problemas de vento. Também são apresentados do forma breve os principais conceitos relacionados à modelagem da turbulência.

As etapas de verificação e validação abordando níveis crescentes de complexidade, e de realização de novos ensaios são apresentadas no capítulo 4, onde também são identificados o *software* e o equipamento utilizados nas simulações.

O capítulo 5 apresenta os ensaios utilizados para verificação e validação do modelo computacional através da simulação de problemas já estudados por outros autores. Os ensaios são apresentados em nível crescente de complexidade e tem como objetivo ratificar a acurácia do modelo para os ensaios subsequentes.

No capítulo 6 são mostrados os ensaios propostos no presente trabalho em que uma estrutura é sujeita a ação do vento com a interferência de uma edificação vizinha. Os respectivos resultados são avaliados através de coeficientes de força e campos de pressão. Os valores obtidos são analisados e comparados com o modelo isolado.

Por fim, o capítulo 7 apresenta considerações finais obtidas através da pesquisa e ensaios realizados, além de fazer sugestões para trabalhos futuros.

2 ENGENHARIA DO VENTO

Como introduzido anteriormente, a chamada Engenharia de Vento é relativamente recente como campo de pesquisa formalizado, tendo seu desenvolvimento suscitado pelas edificações modernas que tendem a ser mais sensíveis aos efeitos aerodinâmicos.

Sob a perspectiva da NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, as forças do vento nas edificações classificam-se como ações variáveis e/ou ações excepcionais e devem ser consideradas nos projetos de dimensionamento.

Na tentativa de estimar o valor das ações eólicas com base na descrição matemática dos fluidos, modelos de turbulência e dados empíricos, alguns métodos tem sido utilizados: aplicação da norma NBR 6123, realização de ensaios em túnel de vento e simulações computacionais; cada um destes métodos possui suas particularidades e limitações.

Os itens a seguir descrevem os principais conceitos da Engenharia do Vento.

2.1 VENTO NATURAL

O vento é definido pela movimentação de massas de ar, que são causadas naturalmente por diferenças de pressão na atmosfera e provocam fluxos de ar que incidem sobre todos os tipos de estruturas. O ar, como qualquer outro fluido, sempre tende a escoar de zonas de maior pressão para as de menor pressão. Dependendo da forma, intensidade e frequência com que estas cargas de vento atuam, diferentes respostas e fenômenos aerodinâmicos (ver exemplos na seção 2.2) podem ser observados.

Pela sua natureza caótica e intermitente, a ação do vento é necessariamente dinâmica. Apesar disso, para muitas aplicações práticas, esses efeitos de variação temporal podem ser desprezados, considerando-se apenas sua contribuição estática equivalente, conforme permitido pela norma NBR 6123. Exceção é feita quando a aceleração é usada como parâmetro de conforto ou a proximidade com o fenômeno da ressonância gera amplificação significativa dos efeitos, o que pode acontecer em estruturas leves e esbeltas.

O perfil de velocidades médias do vento natural é crescente com a altura dentro da camada limite atmosférica (CLA). A CLA é a região da troposfera que é afetada

pela superfície da terra, seja natural ou de origem antrópica, ocupando uma faixa de aproximadamente 2500 m a partir da superfície do terreno, embora possa apresentar variações em função das particularidades do local (LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004), como a presença de vales, montanhas, vegetação, indústrias, edificações etc. A Figura 2.1 apresenta um gráfico da velocidade do vento em função da altura:

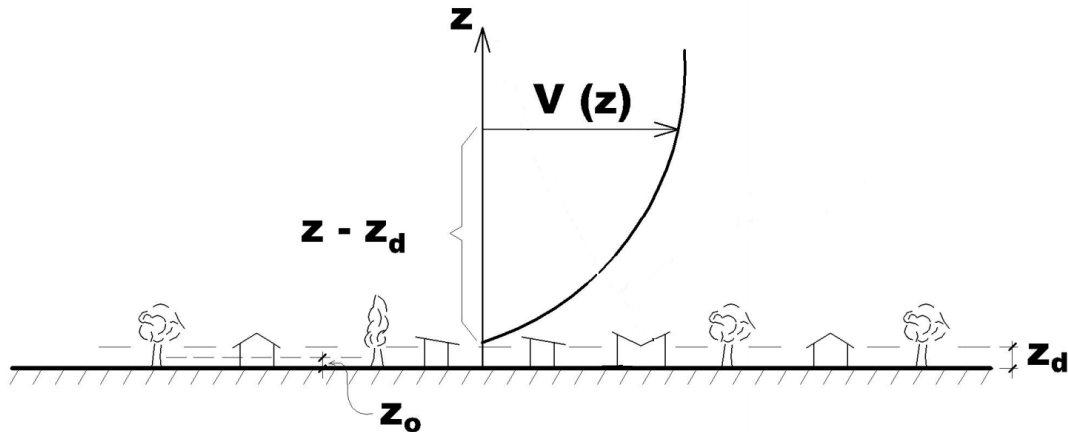


Figura 2.1 – Perfil de velocidade média do vento. Fonte: Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004)

De acordo com Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004), o perfil de vento natural pode ser dado matematicamente em lei de potência:

$$\frac{\bar{v}(z)}{\bar{v}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}}\right)^p \quad (2.1)$$

onde

z : altura em análise

z_{ref} : altura de referência

$\bar{v}(z)$: velocidade média do vento na altura z

$\bar{v}(z_{ref})$: velocidade média do vento na altura de referência z_{ref}

z_d : altura da subcamada sobre a superfície

p : característica do terreno

Note-se na Figura 2.1 que existe uma subcamada onde a velocidade é nula, cuja altura é identificada por z_d e é chamada de deslocamento do plano-zero. Nesta subcamada, o fluido assume a mesma velocidade da interface (neste caso, o solo com velocidade nula) e caracteriza a condição de contorno de não-deslizamento (ou *no-slip*). O parâmetro z_o apresentado na imagem caracteriza a rugosidade local do terreno e é utilizado em outras equações que modelam o perfil de velocidades. O expoente p varia de 0,11, para locais planos, até 0,34 para centros urbanos com edificações altas, sendo, portanto, uma função das particularidades do terreno supracitadas (LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004).

O caráter intrinsecamente variável e turbulento do vento natural torna difícil prever sua velocidade. Matematicamente, a velocidade do vento pode ser expressa pela soma da velocidade média (constante) com um fator de rajada variável no tempo que computa as flutuações de velocidade em torno da média (BÊNIA, 2013). Supondo que a velocidade média do vento atue em apenas uma direção, pode-se escrever:

$$\vec{v}(z, t) = \bar{v}(z)\vec{i} + u(z, t)\vec{i} + v(z, t)\vec{j} + w(z, t)\vec{k} \quad (2.2)$$

onde $\vec{v}(z, t)$ é o vetor velocidade variável no tempo e na altura, u , v e w são as componentes da flutuação da velocidade nas 3 direções e \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} são os vetores unitários da base canônica.

2.2 FENÔMENOS AERODINÂMICOS NAS EDIFICAÇÕES

Os efeitos do vento são usualmente desprezíveis em edificações baixas e de grande rigidez nos elementos estruturais e construtivos, mas podem constituir um dos fatores mais importantes no projeto de estruturas leves, esbeltas e flexíveis, como prédios altos, coberturas metálicas, galpões, ginásios cobertos, hangares, torres de transmissão, dentre outros (PRAVIA; DREHMER, 2004). Além dos efeitos globais na estrutura, também podem ser importantes os efeitos locais em elementos de vedação, como alvenarias e esquadrias, o que pode exigir o reforço desses itens.

A pressão de vento atua sempre perpendicularmente ao plano que bloqueia seu escoamento, podendo aplicar forças de sobrepressão (convencionadas como positivas) ou de sucção (negativas). A região de onde o vento sopra é chamada de barlavento e a região oposta denominada de sotavento, conforme a Figura 2.2.

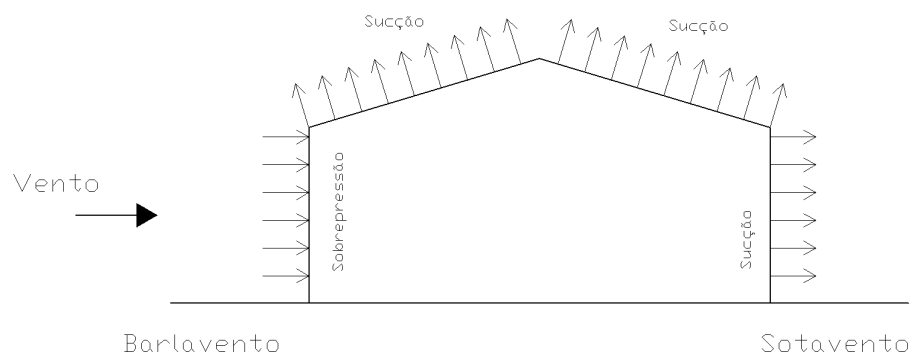


Figura 2.2 – Barlavento e sotavento.

O comportamento do vento e sua influência nas edificações podem ser explicados, em muitos casos práticos, pela equação (2.3), desenvolvida pelo matemático suíço Daniel Bernoulli (1700-1782):

$$P_A + \frac{\rho_A \cdot v_A^2}{2} + \gamma_A \cdot z_A = P_B + \frac{\rho_B \cdot v_B^2}{2} + \gamma_B \cdot z_B \quad (2.3)$$

onde

P : pressão estática

ρ : massa específica

v : velocidade

γ : peso específico

z : altura em relação a um referencial adotado

A e B : são pontos distintos em uma mesma linha de corrente

A equação de Bernoulli (2.3) é uma das principais equações da Mecânica dos Fluidos e, apesar de impor diversas condições à sua implementação correta, é aplicável a uma grande variedade de problemas de engenharia que envolvem fluidos. Essa equação serve, inclusive, de fundamentação teórica para o método de cálculo das pressões de vento apresentado na NBR 6123, como será mostrado na seção 2.3.

Cada termo da equação (2.3) possui dimensão de força por unidade de área, estando associado a uma parcela de energia, e recebe um nome específico. P é a chamada pressão estática, que é medida por um observador estático em relação ao ponto do fluido; $(\rho_A \cdot v_A^2)/2$ é pressão dinâmica, que é associada à energia cinética do escoamento; e $\gamma_B \cdot z_B$ é a pressão hidrostática, que é associada à energia potencial do fluido.

A dedução da equação de Bernoulli consiste essencialmente na integração da Equação de Euler ao longo de uma linha de corrente. Na dedução assume-se que o fluido é invíscido, incompressível e que o escoamento é permanente. Embora nenhuma destas condições seja exatamente cumprida no vento natural, a equação de Bernoulli é muito útil para uma descrição inicial aproximada e, se necessário, pode ser aplicada com ajustes matemáticos.

Analisando-se a equação (2.3) percebe-se que, sendo as variações de altura desprezíveis ($z_A = z_B = 0$), um aumento na pressão dinâmica (velocidade de escoamento) implicará em uma diminuição da pressão estática. Portanto, em regiões de edificações onde o vento é parcialmente obstruído e tende a fluir com mais velocidade, é natural que surjam forças de sucção. Na Figura 2.2, por exemplo, aparecerão forças de sobrepressão na fachada a barlavento e forças de sucção na fachada a sotavento e na cobertura.

Desta forma, grandes forças de sucção podem ser especialmente importantes em coberturas leves, onde o arrancamento e desestabilização global da estrutura constitui um dos casos críticos na combinação de forças. Tais casos motivam o dimensionamento de

fundações e/ou pilares mais robustos para combater esses efeitos.

Dependendo da geometria da edificação submetida ao vento, das condições do escoamento e da vizinhança, diversos fenômenos aerodinâmicos podem ser identificados. Dentre os principais fenômenos e conceitos relacionados, tem-se:

- *Esteira*

Esteira é o termo que designa a região localizada a sotavento da edificação em análise, caracterizada por apresentar perturbações em relação ao escoamento natural devido ao impacto do fluxo de ar com o obstáculo, o qual pode ser um corpo rombudo ou aerodinâmico.

Corpos rombudos (*bluff bodies*) são definidos por apresentarem um descolamento entre as linhas de escoamento do vento e sua superfície, o que tende a gerar turbilhões mais intensos e uma esteira mais longa. Já os corpos aerodinâmicos (*streamlined bodies*) possuem geometria mais suave de forma que o escoamento permanece tangente à sua superfície, o que gera uma perturbação menor no fluxo de ar e, portanto, uma esteira mais curta.

A Figura 2.3 apresenta a esteira de uma edificação rombuda. A região a sotavento, separada por arestas vivas, cria uma região de baixa pressão, para onde o ar tende a escoar assim que ultrapassa o limite posterior do edifício; esta mudança abrupta de direção no gradiente de pressão gera uma série de movimentos rotacionais que caracteriza a esteira da maioria das construções civis.



Figura 2.3 – Esteira de uma edificação rombuda. Fonte: Cook (1985)

Não é fácil definir com exatidão o tamanho da esteira de determinada edificação, mas efeitos importantes podem aparecer a uma distância de até 10 vezes a altura da edificação (BLESSMANN, 1998).

- *Proteção de edifícios vizinhos*

Como evidenciado por diversos estudos citados na seção 2.4, a existência de edificações vizinhas pode oferecer tanto um efeito de proteção, quanto efeitos desfavoráveis a uma estrutura. A Figura 2.4 mostra como uma construção pode oferecer proteção, ainda que parcial, a outra.

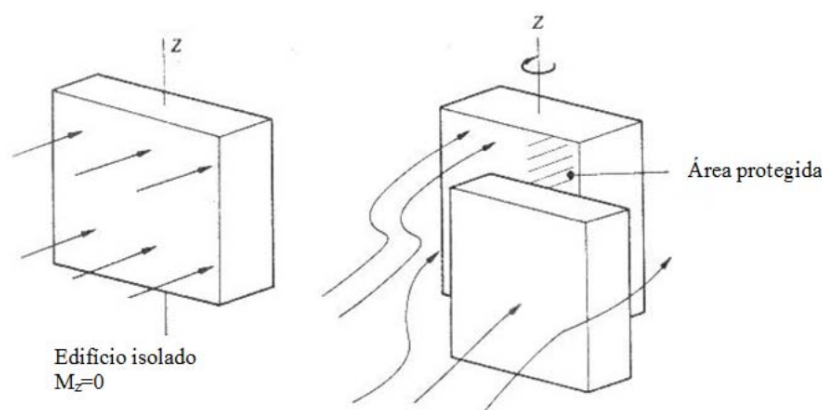


Figura 2.4 – Edifício isolado e parcialmente protegido. Fonte: [Houghton e Carruthers \(1976\)](#) (adaptado)

Note-se, pela Figura 2.4, que o bloqueio físico da edificação a barlavento impede que parte do vento exerça sobrepressão na edificação a sotavento. Entretanto, apesar de diminuir a pressão média, esta configuração faz surgir um momento torçor que não existia na situação isolada; além disso, é possível prever que as linhas de corrente que incidirão sobre a lateral do edifício a sotavento possuirão uma velocidade maior do que a média das linhas de corrente na configuração isolada devido à diminuição da área efetiva de escoamento.

- *Deflexão vertical do vento*

A existência de vizinhança pode afetar não apenas edifícios a sotavento, mas também aqueles localizados a barlavento. Em edificações altas, planas e sem obstáculos no entorno, o vento tende a se deslocar para baixo, como mostrado pelas linhas de corrente na Figura 2.5:

Esta movimentação do ar pode gerar altas velocidades próximas ao solo afetando edificações mais baixas e até gerando desconforto de pedestres devido às intensas rajadas ([WISE, 1971](#)).

- *Conforto dos usuários*

O conforto dos usuários de uma edificação e do seu entorno também é um ponto

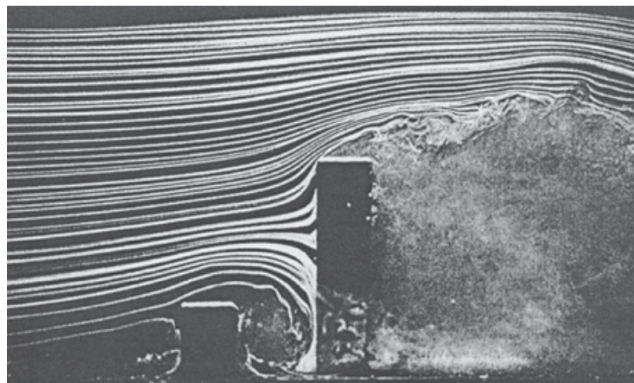


Figura 2.5 – Deflexão vertical do vento. Fonte: [Wise \(1971\)](#)

relevante no estudo da ação do vento, devido às já mencionadas rajadas pela deflexão vertical do vento, mas também pelos deslocamentos horizontais provocados nas estruturas.

Construções muito flexíveis podem sofrer intensas deformações que, embora não ofereçam risco estrutural, podem causar o desconforto dos usuários ao provocar náuseas e outras manifestações somáticas. Esses efeitos dependem da intensidade, frequência e aceleração das oscilações estruturais, além da sensibilidade de cada indivíduo.

Para satisfazer o conforto dos usuários, costuma-se utilizar quebra ventos nas fachadas, marquises nos primeiros pavimentos ou barreiras vegetais, no caso de desconforto devido à deflexão vertical do vento, e sistemas de amortecedores estruturais, no caso de grandes oscilações horizontais.

- *Efeito Venturi*

Quando a configuração das edificações em uma região cria uma condição de afinilamento na seção de escoamento do vento, surge o chamado efeito Venturi (como mostrado na Figura 2.6), nomeado a partir do físico italiano Giovanni Venturi (1746-1822), que demonstrou esse efeito em 1797.

Esse efeito é caracterizado pelo aumento da velocidade do vento gerando altas sucções nos edifícios laterais ao escoamento e intensas sobrepressões em edificações diretamente a sotavento. Esse fenômeno ocorre sempre que há um estrangulamento da seção de escoamento de qualquer fluido, justificando-se, matematicamente pela Lei de Conservação da Massa (que será apresentada formalmente no item 3.1.2). Assim:

$$(\rho Av)_{entrada} = (\rho Av)_{saída} \quad (2.4)$$

onde

A : área da seção de escoamento

v : velocidade

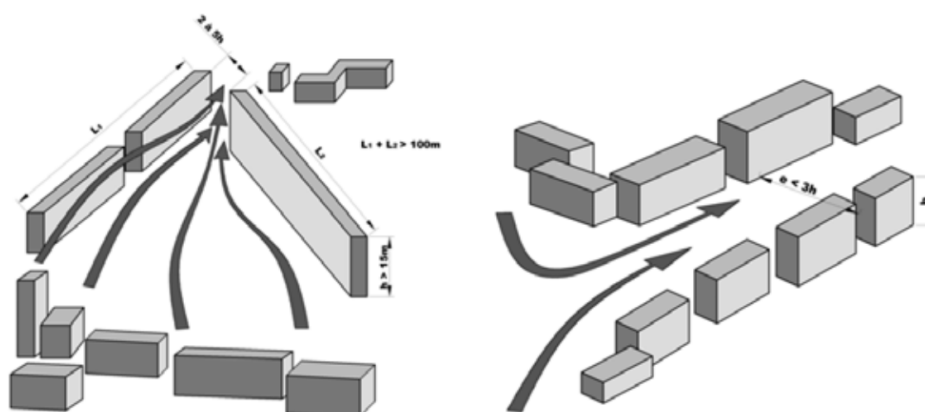


Figura 2.6 – Efeito Venturi. Fonte: Carpeggiani (2004)

ρ : massa específica

Se o escoamento for considerado incompressível, *i.e.*, com massa específica constante, então:

$$(\rho)_{entrada} = (\rho)_{saída} \Rightarrow (Av)_{entrada} = (Av)_{saída} \quad (2.5)$$

e, portanto, se a área na entrada é maior que a área na saída, necessariamente, a velocidade de saída será superior à de entrada.

- Impacto de rajadas

Quando o vento incide sobre uma edificação, independentemente de sua vizinhança, há a transferência de energia cinética das rajadas para a estrutura. Essas rajadas, que são flutuações em torno da velocidade média, fazem com que a pressão dinâmica cresça abruptamente, permaneça constante por um determinado intervalo de tempo e decresça ao valor médio inicial. A duração, intensidade e frequência das rajadas são bastante variáveis e de difícil previsão devido ao seu caráter estocástico. Apesar do seu caráter intrinsecamente dinâmico, essas rajadas aplicadas diretamente oferecem baixo risco de ressonância (o que seria a situação mais desfavorável do ponto de vista estrutural) devido à sua não periodicidade (RAUSCH, 1973 apud BLESSMANN, 1998).

De acordo com Blessmann (1995), o fator mais importante na resposta da estrutura às rajadas não é necessariamente sua intensidade pontual, mas a energia total transmitida por uma sequência de rajadas.

A resposta estrutural às rajadas também depende da pressão interna da edificação, já que o efeito final será dado em função do gradiente de pressão nas faces da edificação. Desta forma, uma sucção em uma cobertura, por exemplo, pode ter seu efeito minimizado se a pressão interna na edificação também for de sucção ou seu efeito pode ser majorado se

a pressão interna for positiva. Normalmente, a pressão interna é influenciada pela abertura de portas e janelas na região de sobrepressão. Mais detalhes sobre este assunto podem encontrados em [Blessmann \(2013\)](#).

- *Desprendimento de vórtices*

Um dos pontos mais importantes a ser considerado na influência do vento sobre as estruturas está associado ao desprendimento de vórtices. Os vórtices ou turbilhões são comuns em corpos rombudos, especialmente onde há arestas vivas que criam zonas de baixa pressão, como mostra a Figura 2.7.

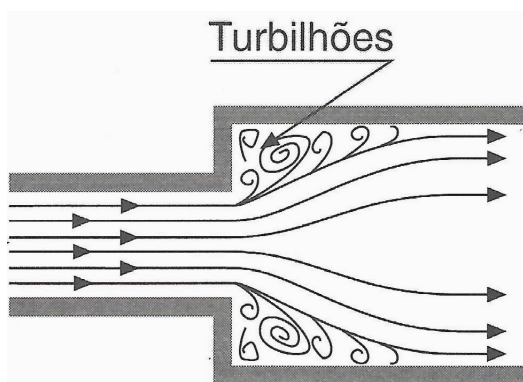


Figura 2.7 – Desprendimento de vórtices. Fonte: [Netto \(1998\)](#)

Em escoamentos com baixo número de Reynolds (conceito que será apresentado no item 3.4) e com superfícies suaves, podem surgir vórtices estacionários na região a sotavento, como mostra a Figura 2.8.

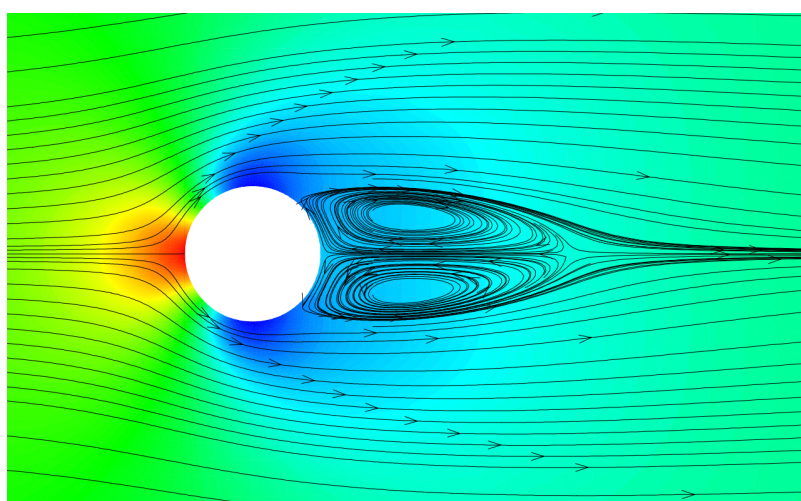


Figura 2.8 – Vórtices estacionários a sotavento de um cilindro. Fonte: [Braun \(2007\)](#)

Esta condição de equilíbrio entre um par de vórtices fica restrita a escoamentos de baixa velocidade e/ou alta viscosidade (*i.e.* Reynolds baixo) e torna-se bastante instável

com números de Reynolds mais elevados; nesses casos, pequenas perturbações interrompem o equilíbrio entre os dois vórtices fazendo com que um desses se desprenda da superfície do cilindro e inicie uma sucessão de desprendimento de vórtices de forma alternada. As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam o início e o desenvolvimento de vórtices.

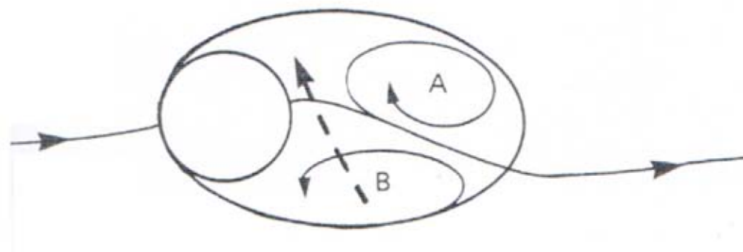


Figura 2.9 – Início do desprendimento de vórtices. Fonte: Cook (1985)

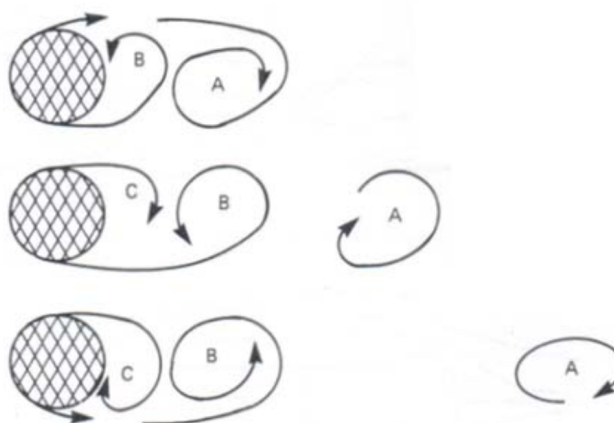


Figura 2.10 – Desprendimento alternado de vórtices. Fonte: Cook (1985)

O fenômeno de vórtices desprendidos periodicamente recebeu o nome de vórtices de von Kármán, em homenagem ao famoso engenheiro húngaro Theodore von Kármán (1881-1963), que primeiro estudou esse assunto e foi orientando de doutorado do também conhecido engenheiro alemão Ludwig Prandtl.

Os vórtices de von Kármán podem se estender por longas distâncias a sotavento da edificação, como mostra a Figura 2.11, e tendem a excitar a estrutura na direção transversal ao escoamento do vento (Figura 2.12) de forma periódica. O grande risco para a construção, neste caso, é que a frequência de excitação transversal aproxime-se da frequência natural de vibração da estrutura e provoque o fenômeno da ressonância, que tende a amplificar as respostas de forma a comprometer a integridade dos materiais.

- *Martelamento (buffeting)*

O martelamento, também usualmente referido pelo termo inglês *buffeting*, é um fenômeno que ocorre na esteira de edificações que provocam o desprendimento de vórtices

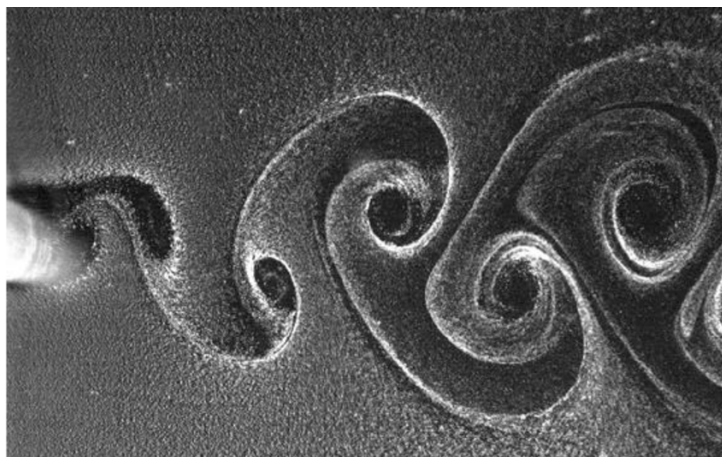


Figura 2.11 – Vórtices de von Kàrman. Fonte: [Research Gate \(2016\)](#)

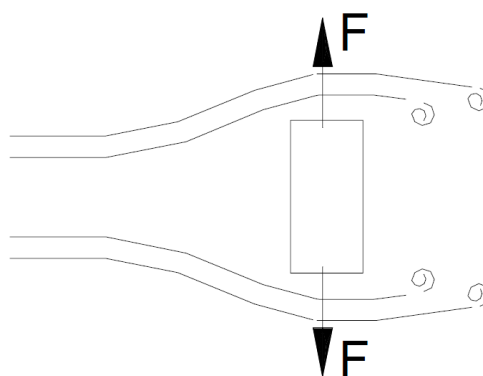


Figura 2.12 – Vórtices de von Kàrman. Fonte: [Pravia e Drehmer \(2004\)](#)

regulares, como os vistos no tópico anterior. Nesta situação, embora a velocidade média do vento na esteira seja menor do que a do vento a barlavento, a turbulência tende a ser bem mais elevada e os vórtices gerados podem chocar-se contra a edificação localizada a sotavento aplicando impactos regulares, como se fossem "marteladas" com uma frequência bem definida. Novamente, esta configuração oferece o risco de ressonância caso a frequência das "marteladas" aproxime-se da frequência natural de vibração (BLESSMANN, 1998).

O efeito do martelamento pode ser significativo, inclusive, a distâncias longas, da ordem de dez vezes a altura da edificação a barlavento. Além disso, o fenômeno ocorre majoritariamente na esteira de uma ou poucas edificações de dimensões semelhantes e em posições convenientes, não ocorrendo em grandes centros com muitos edifícios altos, onde a interferência de muitas geometrias não favorece eventos dinâmicos periódicos e regulares. O fenômeno do martelamento pode ser observado, por exemplo, em [Blessmann \(1985\)](#).

Galope é um fenômeno de instabilidade aerodinâmica que ocorre em apenas um grau de liberdade em estruturas esbeltas e flexíveis. As vibrações produzidas por galope são intensas, ocorrem na direção transversal ao escoamento do vento e são diretamente proporcionais à sua velocidade (BLESSMANN, 1998).

A instabilidade é iniciada de forma súbita quando atingi-se uma velocidade de disparo, que depende do amortecimento de cada estrutura; aquelas que são menos amortecidas possuem uma velocidade de disparo mais baixa, que pode aproximar-se da velocidade prevista em projeto (BLESSMANN, 1998).

De acordo com Simiu e Scanlan (1996), o galope provoca oscilações com frequências mais baixas do que as que ocorrem por desprendimento de vórtices.

- *Divergência torcional*

Este tipo de instabilidade é prevalente em estruturas em forma de placa, como tabuleiros de pontes com grandes vãos e é caracterizado por apresentar deformação em apenas um grau de liberdade, provocando torção em torno do eixo longitudinal da estrutura (COOK, 1985).

Simiu e Scanlan (1996) afirmam que uma estrutura sob ação do vento estará sujeita a forças de arrasto (na direção do vento), de sustentação (perpendicular ao vento na vertical) e um momento torsor. A torção é proporcional à velocidade do vento que deforma a estrutura e, por sua vez, aumenta o ângulo de ataque do vento aumentando a intensidade do momento torsor. Dependendo da velocidade do vento, esta condições pode levar a estrutura à ruptura.

- *Drapejamento (flutter)*

De acordo com Simiu e Scanlan (1996), o termo drapejamento, também usualmente referido pelo termo inglês *flutter*, já foi utilizado para designar vários tipos de vibrações, sendo acompanhado por outros termos como drapejamento clássico, drapejamento de um grau de liberdade e drapejamento de painel.

O drapejamento clássico consiste em uma instabilidade aerodinâmica que excita dois graus de liberdade de um estrutura, torção e flexão, que se acoplam e aumentam com a velocidade do vento, como ocorrido, por exemplo, no colapso da ponte Tacoma Narrows (BILLAH; SCANLAN, 1991).

2.3 NBR 6123 - FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES

A norma NBR 6123 tem como objetivo estabelecer um método para quantificar as ações do vento nas estruturas de forma simples e acessível, considerando suas forças estáticas e dinâmicas. A determinação destas ações é limitada por parâmetros de simplificação arquitetônica, tendo em vista as condições geométricas previstas na norma *a priori*. Esta limitação é reconhecida pela própria norma em seu item 1.2:

Esta Norma não se aplica a 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. 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 nesta Norma (ABNT, 1988, p.1).

A referida norma recomenda que os efeitos do vento sejam determinados separadamente para: elementos de vedação (esquadrias, telhas, vidros), elementos construtivos (alvenarias, telhados) e estrutura global. Para os propósitos do presente trabalho, serão considerados os efeitos apenas na estrutura como um todo.

A fundamentação teórica do procedimento de cálculo apresentado na norma está baseado na equação de Bernoulli (2.3) e, mais especificamente, numa aplicação da mesma desenvolvida por Henri Pitot (engenheiro francês, 1695-1771) em 1732. Pitot utilizou um pequeno tubo curvo onde considerou um ponto de estagnação (onde tem-se velocidade nula e pressão máxima) no seu interior no qual era possível medir a pressão relativa no ponto. Através da aplicação da equação de Bernoulli, Pitot estabeleceu uma relação matemática entre pressão relativa e velocidade de escoamento.

Semelhantemente ao procedimento utilizado por Pitot, que mediu a pressão relativa para determinar a velocidade, a norma estabelece uma velocidade característica do vento e calcula a sobrepessão aplicada pelo escoamento na estrutura. Considerando-se uma estrutura genérica conforme a Figura 2.13, e dois pontos A e B unidos por uma linha de corrente, pode-se aplicar a equação de Bernoulli entre os referidos pontos:

$$P_A + \frac{\rho_A \cdot v_A^2}{2} + \gamma_A \cdot z_A = P_B + \frac{\rho_B \cdot v_B^2}{2} + \gamma_B \cdot z_B. \quad (2.6)$$

Sendo B um ponto de estagnação, tem-se:

$$v_B = 0. \quad (2.7)$$

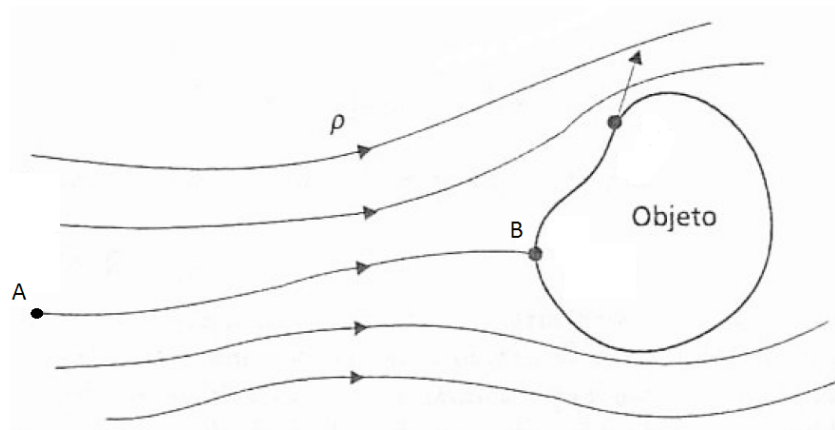


Figura 2.13 – Aplicação da equação de Bernoulli. Fonte: Carrera (2007) (adaptado)

Considerando o ar como incompressível, tendo em vista a escala de tempo de vida útil da edificação e as velocidades relativamente baixas (maiores detalhes são dados na seção 3.1.2), pode-se escrever:

$$\rho_A = \rho_B = \rho. \quad (2.8)$$

$$\gamma_A = \gamma_B = \gamma. \quad (2.9)$$

Desprezando-se as variações de altura:

$$z_A = z_B. \quad (2.10)$$

Sendo A um ponto genérico na atmosfera, tem-se:

$$P_A = P_{atm}. \quad (2.11)$$

Substituindo as expressões de (2.7) a (2.11) na equação (2.6):

$$P_{Atm} + \frac{\rho \cdot v_A^2}{2} = P_B. \quad (2.12)$$

Portanto, a sobrepessão exercida pelo escoamento no ponto B será igual à pressão dinâmica no ponto A:

$$q = \Delta P = P_B - P_{Atm} = \frac{\rho \cdot v_A^2}{2}. \quad (2.13)$$

Supondo condições normais de temperatura e pressão (CNTP, 1 atm, 15°C), onde a massa específica do ar é $1,225\text{kg}/\text{m}^3$ e considerando v_A como a velocidade característica do vento v_k :

$$q = 0,613.v_k^2. \quad (2.14)$$

A velocidade característica do vento é avaliada a partir da velocidade básica e de fatores por:

$$v_k = v_0.S_1.S_2.S_3 \quad (2.15)$$

onde

v_0 : velocidade básica

S_1 : fator topográfico

S_2 : fator de rugosidade do entorno, dimensões e altura da edificação

S_3 : fator de utilização

Para determinar a velocidade característica do vento, a norma apresenta um mapa de isopletas (Figura 2.14) que inclui todo território nacional e define as velocidades básicas (v_0) do vento para cada região. Essa velocidade básica é definida como uma rajada de vento de 3s, medida a uma altura de 10m, em campo aberto e plano, com um tempo de recorrência de 50 anos, isto é, sendo excedida em média apenas uma vez neste intervalo.

As velocidades previstas no mapa de isopletas foram estabelecidas estatisticamente através de medições em 49 estações meteorológicas do então Ministério da Aeronáutica (atualmente extinto), listadas no Anexo C da norma. Pesquisas mostram (PASQUAL, 2011) que os referidos dados meteorológicos podem estar defasados, com velocidades inferiores às medidas atualmente, e que a densidade territorial de estações de medição no Brasil é consideravelmente baixa, quando comparada com países de semelhante desenvolvimento econômico. Uma análise do Anexo C da norma ainda revela que a densidade de estações meteorológicas é substancialmente maior nas regiões Sul e Sudeste do país, o que é justificado pelo fato de estas regiões apresentarem ventos mais fortes e, portanto, requererem dados mais precisos. Atualmente, empresas privadas e públicas, ligadas especialmente à produção de energia, possuem registros de medições de velocidade de vento que podem fundamentar uma versão aprimorada do mapa de isopletas.

O fator topográfico S_1 considera a influência da topografia do entorno da edificação no escoamento do vento. Assim, tem-se para S_1 : 1,0 para terrenos planos ou fracamente acidentados; 0,9 para vales profundos e protegidos do vento; e maior ou igual a 1,0 para locais próximos do topo de morros ou crista de taludes, conforme especificações no item 5.2 da norma.

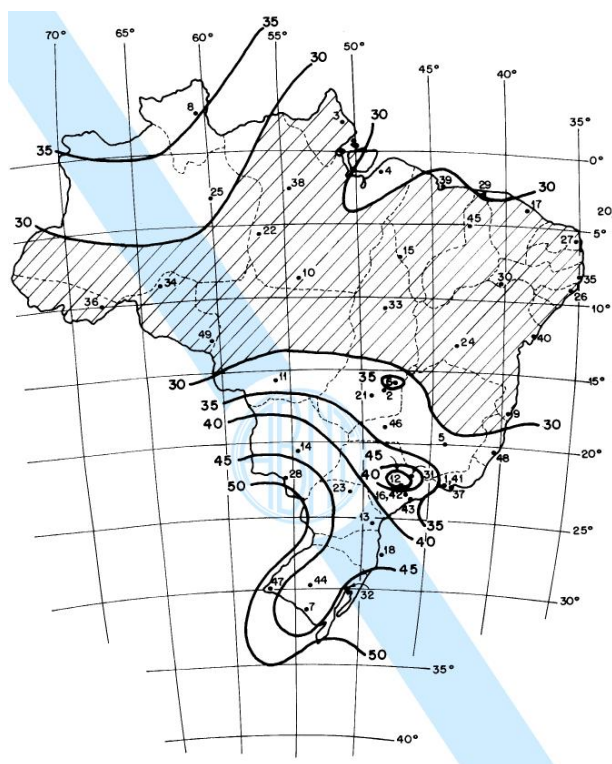


Figura 2.14 – Mapa de isopletas. Fonte: ABNT (1988)

O fator S_2 computa o efeito da rugosidade do terreno, da variação do vento com a altura da edificação e das dimensões máximas da estrutura. Para isso, o item 5.3 da norma divide a rugosidade em 5 categorias, as dimensões máximas em 3 classes e estabelece tabelas e relações matemáticas que dependem da altura da edificação. Sem adentrar em mais detalhes, observa-se que o fator S_2 é:

- Inversamente proporcional à rugosidade do terreno, isto é, considera os obstáculos como dispositivos de proteção contra o vento;
- Diretamente proporcional à dimensão máxima da edificação;
- Diretamente proporcional à altura da construção.

O fator estatístico S_3 é dado em função da utilização da edificação e da segurança necessária à mesma. O item 5.4 da norma prevê 5 grupos com S_3 variando de 0,83 a 1,10, sendo utilizados valores mais altos para construções que implicam em um risco de maior prejuízo humano e social, e menor para construções temporárias ou para elementos construtivos não estruturais.

Uma vez definidas todas as variáveis para o cálculo da sobrepessão do vento em uma estrutura, calcula-se a força exercida pelo escoamento mediante a seguinte fórmula:

$$F = C.q.A_e \quad (2.16)$$

onde

F : força resultante aplicada na estrutura

C : coeficiente aerodinâmico calculado em função da geometria da edificação através de tabelas e ábacos na norma (itens 6 e 7)

q : sobrepessão calculada pela equação (2.14)

A_e : área efetiva (projeção da face da edificação afetada pelo vento)

É importante registrar que os coeficientes aerodinâmicos disponíveis nas tabelas e ábacos da norma, além de prescrições de natureza qualitativa, foram obtidos a partir de experimentos em túnel de vento (PRAVIA; DREHMER, 2004). Normalmente, no caso da aplicação da norma em projetos de estruturas, os coeficientes são obtidos destas tabelas e ábacos e a força atuante é calculada; no caso de estudos específicos em túnel de vento ou simulações numéricas, a força resultante pode ser obtida como um resultado da análise e, então, o coeficiente é calculado e pode ser comparado com outras fontes.

Neste método matemático apresentado pelo norma, verifica-se que tanto o fator S_1 quanto o fator S_2 consideram, ainda que de forma bastante simplificada, efeitos do entorno da edificação; o primeiro, ao levar em consideração a vizinhança natural, e o segundo ao considerar a rugosidade do terreno, seja produzida por elementos naturais ou por outras construções. Além disso, a NBR 6123 faz algumas outras considerações a respeito da vizinhança, como será mostrado a seguir.

O item 5.3.3 da norma cita a deflexão vertical do vento nas fachadas a barlavento de edificações altas e, por isso, recomenda que seja utilizado o fator S_2 referente ao topo da edificação no dimensionamento de elementos de vedação próximos ao solo. Esta recomendação leva em conta o fenômeno físico e "corrige" a consideração simplificada da norma quanto ao comportamento do vento nos pavimentos mais baixos.

O item 6.5.3 também diz respeito à influência da vizinhança ao determinar que o vento que incide sobre uma edificação é turbulento quando a altura da edificação analisada não excede duas vezes a altura média das construções vizinhas. O mesmo item também define até que distância a vizinhança deve ser considerada em função da altura do edifício.

O item 6.6.2 estabelece uma excentricidade mínima que deve ser considerada na ação do vento sobre edificações paralelepípedicas, tendo em vista eventuais esforços de torção. A excentricidade depende das dimensões da edificação e é dobrada para o caso em que a vizinhança é considerada, o que mostra-se coerente com estudos de Blessmann (1992) e Vieira, Brito e Loredou-Souza (2018).

Embora não trate diretamente da vizinhança, o item 9.1 é importante por considerar o caráter dinâmico do vento devido à turbulência atmosférica. Nesta seção, a norma prevê um método simplificado que considera a força dinâmica como uma força estática equivalente e, apesar de não citar especificamente a vizinhança, relaciona-se indiretamente com seus

efeitos, já que esta tende a interferir na turbulência do vento.

O Anexo G da norma ainda estabelece algumas últimas considerações sobre os efeitos da vizinhança. Nesta seção são citados fenômenos da aerodinâmica (venturi, deflexão vertical do vento e turbulência de esteira) e é definido o chamado Fator de Vizinhança (FV), apresentado na equação (2.17).

$$FV = \frac{C_{vizinhança}}{C_{isolado}}, \quad (2.17)$$

onde C é o coeficiente aerodinâmico em análise, que pode ser calculado experimentalmente por:

$$C = \frac{F}{q \cdot A_e}, \quad (2.18)$$

que decorre imediatamente da equação (2.16).

O FV é definido pela norma entre 1,0 e 1,3 a partir da relação s/d , onde s é o afastamento entre os planos adjacentes de edificações vizinhas e d é definido como o menor valor entre o menor lado da edificação e sua semidiagonal. Como será evidenciado na seção 6.2 e também verifica-se em [Vieira, Brito e Loredou-Souza \(2018\)](#), esses valores não são suficientes para computar todas as variações de pressão provocadas pela vizinhança. O próprio texto da norma afirma que "não é possível indicar valores numéricos para efeitos de vizinhança de um modo genérico e normativo" ([ABNT, 1988](#), p.58).

Portanto, verifica-se que, apesar da sua relevância e aceitação no âmbito nacional, a NBR 6123 possui limitações, especialmente no que tange a consideração dos efeitos de vizinhança. As prescrições do texto normativo que tratam da interferência da vizinhança mostram-se insuficientes para avaliar a complexidade dos efeitos aerodinâmicos nessas condições e constituem uma aproximação um tanto genérica. Assim, é evidenciada a necessidade de implementação de outros métodos para análise de casos complexos e diferentes daqueles previstos pelos coeficientes da norma.

Durante a redação deste trabalho, a norma encontrava-se em revisão para incorporar novos estudos em túnel de vento e, especialmente, dados de estações meteorológicas para revisão do mapa de isopletas; entretanto, até o final do presente texto, a nova versão ainda não havia sido publicada.

2.4 DETERMINAÇÃO DO EFEITO DE VIZINHANÇA DO VENTO EM ESTRUTURAS CIVIS

Nesta seção são apresentados estudos que calcularam as ações de vento em estruturas específicas, considerando também efeitos de vizinhança. Os trabalhos citados foram realizados tanto através de experimentos em túnel de vento, quanto utilizando modelagem e simulação numérica.

2.4.1 Estudos em túnel de vento

Já na década de 30 nos Estados Unidos, estudos começaram a ser realizados para avaliar a interferência de edifícios vizinhos na pressão exercida pelo vento. Harris (1934) realizou a análise aerodinâmica do *Empire State Building* próximo a dois edifícios vizinhos que poderiam vir a ser construídos posteriormente. Nesse trabalho, que é provavelmente o primeiro que se tem registro a considerar a influência de edificações vizinhas, o autor é categórico em afirmar que ninguém sabia ao certo quais pressões de vento a estrutura deveria resistir. Para prever como a distribuição de pressões seria modificada pela existência de edifícios lindeiros, foi feita a análise em túnel de vento dos três edifícios em questão, sendo o *Empire State Building* construído em alumínio com três níveis de tomada de pressão e as outras duas edificações em madeira sem medições de pressão. A disposição dos modelos é apresentada na Figura 2.15, sendo o modelo do *Empire State* identificado pela letra A e os vizinhos por B e C:

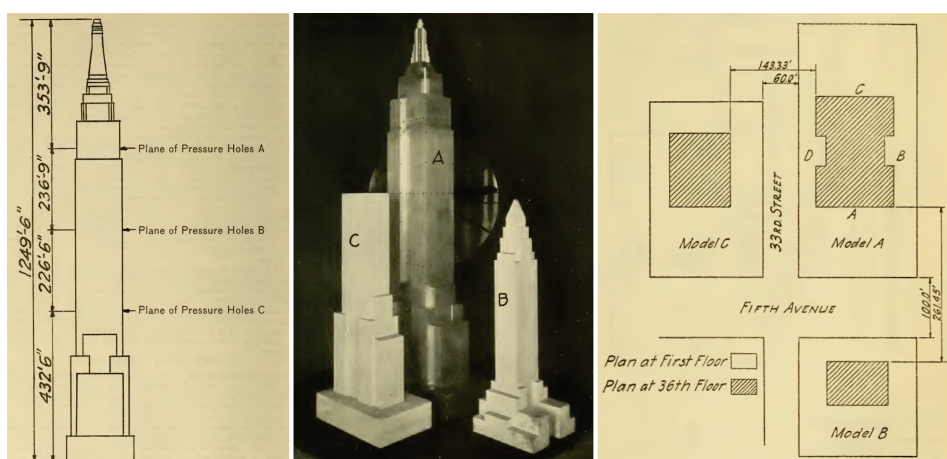


Figura 2.15 – Modelo do Empire State Building usado em túnel de vento. Fonte: Harris (1934)

Os resultados experimentais obtidos pelo autor mostraram que a influência das construções vizinhas é diretamente proporcional à proximidade destas ao modelo analisado,

o que é intuitivamente esperado. As pressões medidas em função da vizinhança mostraram acréscimo em algumas faces e decréscimo em outras, sendo que o efeito global resultante mostrou uma diminuição na ação provocada pelo vento. Apesar disso, a presença de edifícios vizinhos provocou a inversão de pressões na base do edifício (de sobrepressão para sucção) e dobrou o momento torçor em torno do eixo vertical da estrutura. De acordo com o autor, a alteração no momento torçor provocado pelo efeito da vizinhança é particularmente importante e recomenda-se atenção especial ao projeto dos pilares, que deverão suportar a maior parte deste esforço.

Wise (1971) também ensaiou em túnel de vento diferentes edificações com suas respectivas vizinhanças e analisou o conforto dos pedestres no entorno desses prédios. O autor mediu as velocidades do vento em pontos próximos ao solo ao redor da edificação e percebeu que determinadas condições podem provocar ventos intensos que comprometam o conforto de pessoas na região, especialmente em locais de clima frio, como a Inglaterra, onde o estudo foi publicado.

No Brasil, parte considerável dos estudos relacionados à ação do vento sobre estruturas têm se concentrado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC, localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, além do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, em São Paulo. No LAC, encontra-se o Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, que é pioneiro na América Latina e está em funcionamento há mais de 45 anos (NUNEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012); o trabalho do Professor Joaquim Blessmann, já falecido, lhe confere até os dias de hoje o título de principal pesquisador brasileiro na área de ação do vento em edificações, possuindo vasta literatura sobre o assunto.

Blessmann (1985) estudou o comportamento aeroelástico de um edifício de seção quadrada com 17 pavimentos sob a influência de uma edificação semelhante (mesmas dimensões e forma), porém rígida, localizada à barlavento. O estudo foi feito com 15 posições relativas entre os dois modelos, conforme mostra a Figura 2.16, e para dois tipos de escoamento, um com velocidade média aproximadamente uniforme de baixa turbulência e outro escoamento turbulento de camada limite.

O experimento foi realizado em túnel de vento e mediu a aceleração RMS (*root mean square*, ou raiz do valor quadrático médio, em português) no topo do modelo aeroelástico. A relação entre a aceleração na condição de vizinhança e na condição isolada definiram o fator de martelamento (*buffeting factor* - BF). O BF é análogo ao Fator de Vizinhança - FV, definido na equação (2.17).

Os resultados mostraram valores de BF superiores a 1 (portanto, acelerações mais intensas) para todas as posições nas curvas 1, 2 e 3, chegando a um aumento de 78% na direção longitudinal.

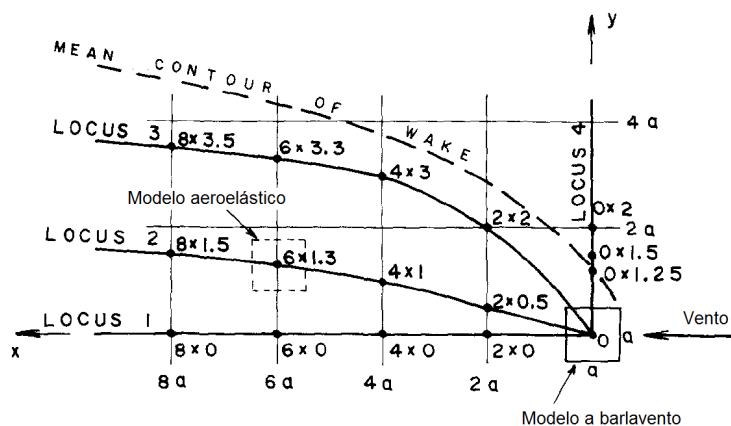


Figura 2.16 – Modelos ensaiados. Fonte: Blessmann (1985) (adaptado)

Semelhantemente, Blessmann (1992) ensaiou dois edifícios nas condições isolado e com vizinhança para comparar os resultados obtidos nas duas condições. As edificações analisadas possuíam 97m e 98,15m de altura e localizavam-se nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, respectivamente, que são regiões densamente povoadas. O estudo foi realizado em túnel de vento tomando-se medições de pressão para o vento incidindo a cada 15° através de manômetros analógicos. As Figuras 2.17 e 2.18 mostram a vizinhança dos dois edifícios. O número nas construções vizinhas representa a altura destas em metros com relação ao nível da rua em frente ao edifício principal.

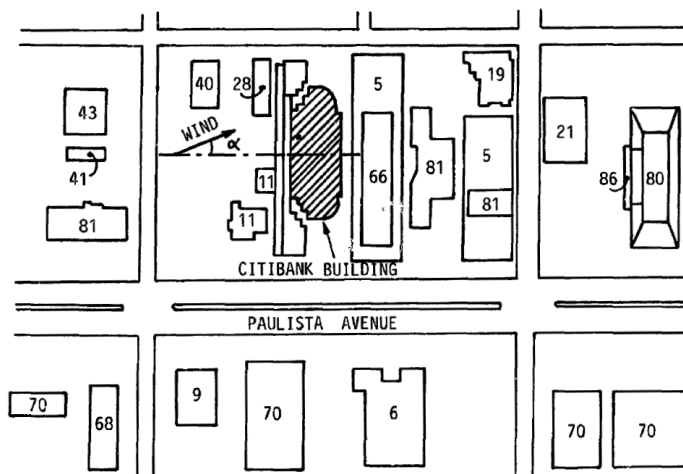


Figura 2.17 – Vizinhança do modelo localizado em São Paulo. Fonte: Blessmann (1992)

Os resultados mostraram que a ação do vento varia consideravelmente dependendo das particularidades de cada edificação, sendo que os efeitos de vizinhança podem oferecer proteção em alguns casos e efeitos desfavoráveis em outros. A Figura 2.19, por exemplo, apresenta a variação do coeficiente de torção em função do ângulo de incidência do vento

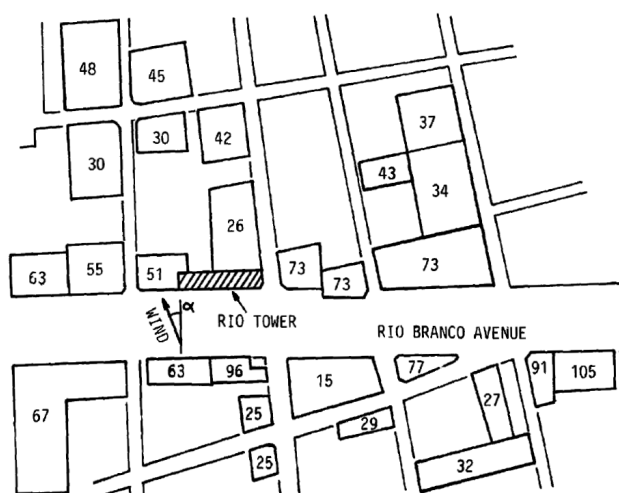


Figura 2.18 – Vizinhança do modelo localizado no Rio de Janeiro. Fonte: Blessmann (1992)

para os casos isolado e com vizinhança; assim, é possível identificar regiões de aumento e diminuição destes coeficientes.

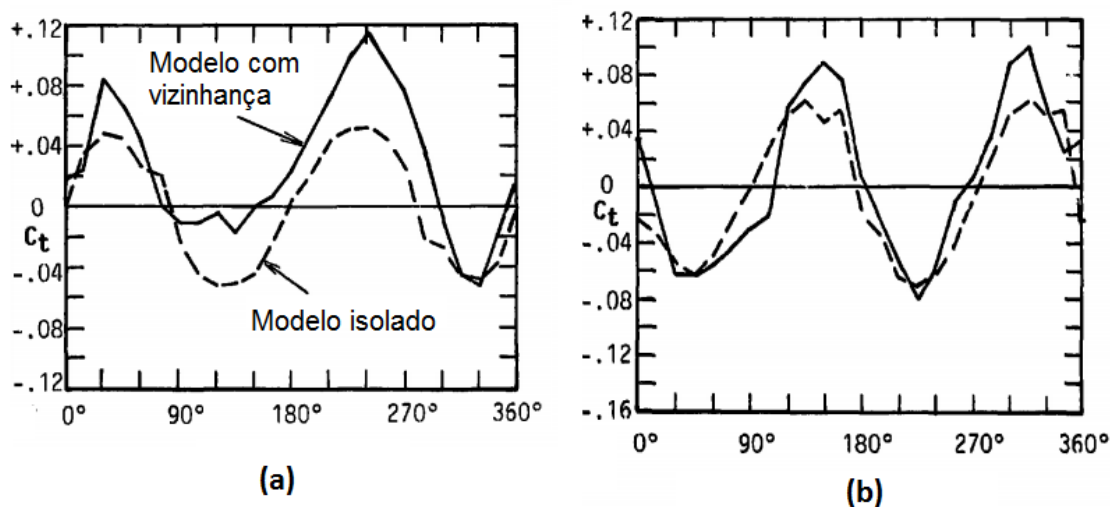


Figura 2.19 – Coeficiente de torção em função do ângulo de incidência do vento para os edifícios em (a) São Paulo e (b) Rio de Janeiro. A linha tracejada refere-se ao modelo isolado e a linha contínua, ao modelo com vizinhança. Fonte: Blessmann (1992)

A análise da Figura 2.19 mostra que o edifício localizado em São Paulo teve um aumento de até 125% no coeficiente de torção e o localizado no Rio de Janeiro, chegou a um aumento pontual de 54%.

Em Khanduri, Stathopoulos e Bédard (1998) verifica-se uma tentativa de sistematizar e generalizar os conhecimentos a respeito da influência da vizinhança nas cargas de vento, tendo em vista a complexidade do problema e a insuficiência das orientações nas normas e códigos para consideração desses efeitos. Nesse trabalho, os autores utilizaram

dados já publicados na literatura técnica para estabelecer padrões de interferência entre dois edifícios iguais, chegando-se a uma equação polinomial para o cálculo de FV:

$$FV = -0,05 + 0,65x + 0,29x^2 - 0,24x^3 \quad (2.19)$$

$$x = \log\left[\frac{S(h+b)}{hb}\right] \quad (2.20)$$

onde

S : espaçamento livre entre as edificações

h : altura dos edifícios

b : largura

O levantamento de dados feito pelos autores mostrou que a influência da vizinhança é particularmente importante nas componentes flutuantes da velocidade do vento, podendo, de uma forma geral, oferecer efeitos de proteção ou de acréscimo de cargas dependendo de cada caso; também verificaram aumentos importantes nos momentos torsores de estruturas sujeitas a efeitos de vizinhança, exigindo-se atenção especial a estas ações. Além disso, o trabalho fez um extenso levantamento histórico e bibliográfico enfatizando a necessidade de estudos que estabeleçam formulações gerais e simplificadas para consideração dos efeitos de vizinhança para fins de normalização.

Bênia (2013) analisou de forma experimental em túnel de vento 18 tipos diferentes de vizinhança em torno do *CAARC Standard Tall Building*. Este modelo de edificação padronizada foi definido pelo *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council* (CAARC) em 1969 e serve para calibrar ensaios de aerodinâmica com diferentes métodos de experimentação.

O *CAARC Standard Tall Building* consiste num prisma de seção retangular com dimensões reais 100ft x 150ft x 600ft (30,48m x 45,72m x 182,88m), conforme mostrado na Figura 2.20. O modelo padronizado caracteriza-se pela sua simplicidade e esbeltez relativamente alta, igual a 6, que é a relação entre a maior e a menor dimensão do prisma.

Naturalmente, nos ensaios em túnel de vento, este edifício precisa ser analisado como um modelo em escala reduzida ajustado por métodos de semelhança; em modelos computacionais, é possível ensaiar o modelo em tamanho real, visto que trata-se uma estrutura virtual.

O trabalho de Bênia (2013) colocou o modelo ensaiado sobre uma balança dinâmica de três graus de liberdade, desenvolvida por Oliveira (2009) (flexão em duas direções e torção em torno do eixo vertical) e considerou as edificações vizinhas como rígidas. Os 18 experimentos realizados consistiram em 3 configurações de vizinhança com 6 espaçamentos diferentes, conforme mostrado nas Figuras 2.21, 2.22 e 2.23:

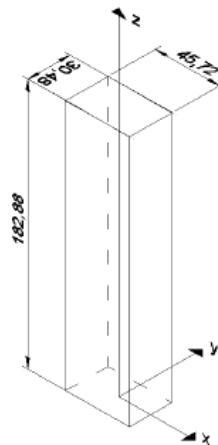


Figura 2.20 – CAARC Standard Tall Building. Fonte: Bênia (2013)

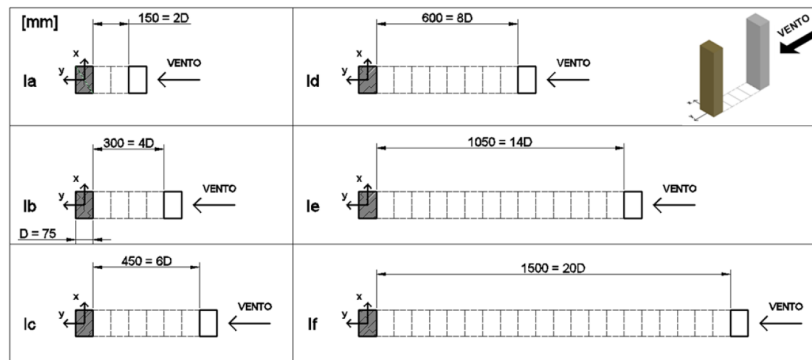


Figura 2.21 – Configuração 1. Fonte: Bênia (2013)

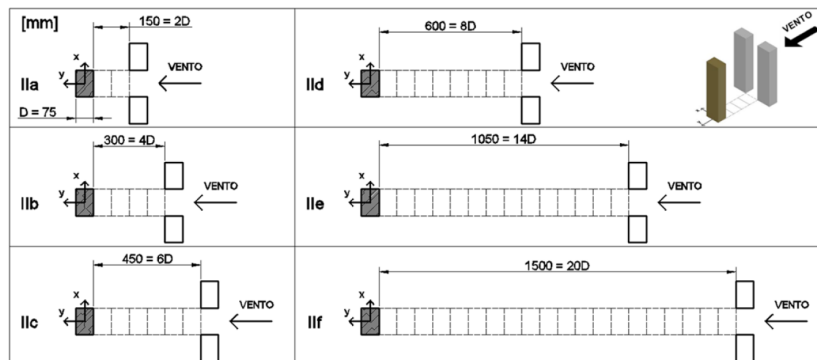


Figura 2.22 – Configuração 2. Fonte: Bênia (2013)

Como resposta, foram medidos os deslocamentos horizontais (nas duas direções) no topo do modelo e as rotações em torno do eixo vertical. Os resultados foram apresentados na forma de gráficos de deslocamento normalizado em função da velocidade reduzida e foram separados em resposta média e desvio padrão. A discussão detalhada das respostas é muito extensa para ser resumida neste texto, mas é possível verificar que em todos os

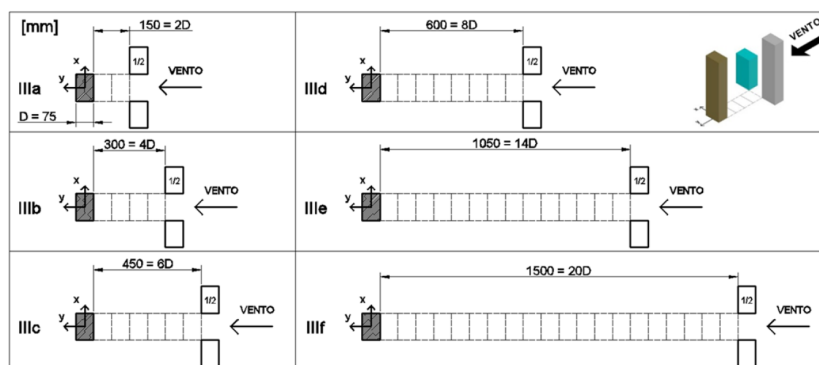


Figura 2.23 – Configuração 3. Fonte: Bênia (2013)

casos, os dados mostraram que as respostas do edifício com vizinhança tende a coincidir com a resposta isolada com o aumento da distância dos edifícios vizinhos, o que é bastante natural. De uma forma geral, a análise das respostas mostra, assim como outros trabalhos, que a vizinhança não oferece necessariamente efeitos de proteção para edificação, podendo criar cenários mais desfavoráveis, nos quais a presença de estruturas a barlavento provoca o aumento dos deslocamentos no edifício em análise. O trabalho ainda apresenta a necessidade de novos estudos e sugere ensaios para prosseguimento da análise, tais como: refinamento da malha de distâncias, variação do tamanho dos modelos e variação da direção de incidência do vento, o que pode vir a ser feito, inclusive, computacionalmente.

Kim, Tamura e Yoshida (2015) realizaram um estudo em túnel de vento analisando 37 posições relativas entre o edifício principal e o edifício vizinho, além de variar a altura deste último em 50%, 100% e 150% da altura do principal. A Figura 2.24 mostra as posições analisadas:

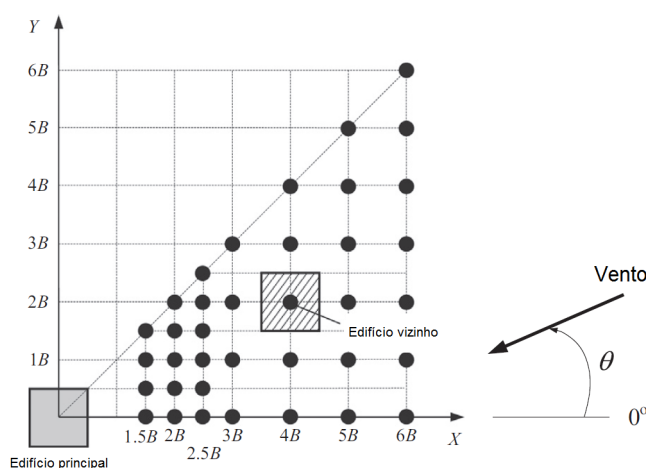


Figura 2.24 – Posições relativas dos edifícios. Fonte: Kim, Tamura e Yoshida (2015) (adaptado)

Os autores mediram o MIF e RIF (*Mean Interference Factor* e *Rms Interference*

Factor, respectivamente), que são equivalentes ao FV calculado como valor médio e FV calculado como valor RMS (*root mean square*), respectivamente. A partir das medições, verificou-se que, embora a vizinhança ofereça algum efeito de proteção para casos específicos, a maior parte dos resultados de interferência indicaram aumento das pressões de vento na condição com vizinhança. Excetuam-se deste resultado os casos em que o edifício vizinho tinha apenas 50% da altura do edifício principal, condição que levou a resultados semelhantes aos da edificação isolada, isto é, mostrando uma interferência muito pequena do edifício baixo. De acordo com os autores, a interferência é proporcional à relação entre a altura do edifício vizinho e a do modelo instrumentado. Embora explicações desse fenômeno não estejam no texto, pode-se inferir que, tendo em vista o perfil de velocidade do vento proporcional a altura, edifícios baixos influem na região onde o vento possui velocidade mais baixa e, assim, provocam uma interferência menos significativa.

Vieira, Brito e Loredo-Souza (2018) também analisaram experimentalmente em túnel de vento o *CAARC Standard Tall Building* para diferentes disposições da vizinhança; a escolha da geometria do CAARC foi feita para possibilitar comparações com outros autores. A Figura 2.25 apresenta as configurações analisadas:

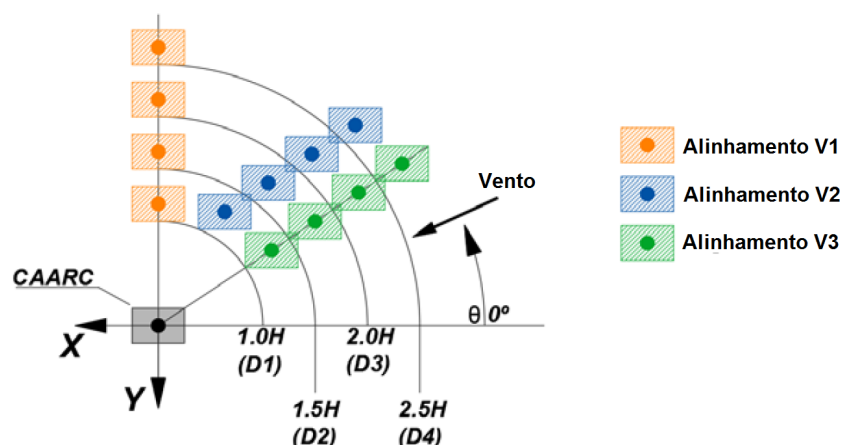


Figura 2.25 – Posições relativas dos edifícios. Fonte: Vieira, Brito e Loredo-Souza (2018) (adaptado)

O estudo mediu as respostas transversal, longitudinal e torcional do modelo CAARC calculando os coeficientes aerodinâmicos para cada configuração de vizinhança e para diferentes ângulos de incidência do vento. Os coeficientes calculados para cada vizinhança foram comparados com aqueles obtidos para a edificação isolada através do parâmetro FV.

Os fatores de vizinhança medidos por Vieira, Brito e Loredo-Souza (2018) foram comparados com os previstos na NBR 6123 e verificou-se que mais de 80% dos resultados para momentos fletores e pelo menos 47% dos resultados para torção estavam acima do que era estabelecido pela NBR 6123, evidenciando a incapacidade da norma de avaliar

satisfatoriamente os efeitos de vizinhança e a necessidade de estudos específicos a este respeito.

2.4.2 Estudos com modelagem numérico-computacional

Além de trabalhos experimentais em túnel de vento, estudos têm sido feitos através de modelagens numérico-computacionais para prever o comportamento das estruturas submetidas a escoamento de ar (NUNEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012). Esses métodos matemáticos são amplamente utilizados em outras áreas da Engenharia e são usualmente mais acessíveis do que procedimentos experimentais, tendo em vista: (I) possibilidade de execução de experimentos sem a necessidade da instalação física de um túnel de vento; (II) custo significativamente reduzido em relação aos ensaios experimentais de modelos físicos em escala; (III) não necessidade de validação via Teoria da Semelhança quanto à correspondência entre os materiais de fabricação dos modelos físicos e das edificações reais; e (IV) maior velocidade na obtenção de resultados.

A utilização de modelagens numérico-computacionais para resolução de problemas de vento deu origem à chamada Engenharia do Vento Computacional (EVC), que é um ramo específico da Engenharia do Vento (EV). A EVC estabeleceu-se a partir de meados da década de 80 (MURAKAMI, 1997; BRAUN, 2007) e seu desenvolvimento está intimamente associado ao avanço no poder de processamento e armazenamento dos computadores, além do desenvolvimento da computação gráfica. Nesta área do conhecimento, aplicam-se conceitos e ferramentas da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) e da Dinâmica de Estruturas Computacional (DEC).

Com o passar dos anos, a EVC passou a receber maior atenção de pesquisadores da engenharia de estruturas civis e em 1992 foi realizado, na cidade de Tokyo, o primeiro Simpósio Internacional sobre Engenharia do Vento Computacional, evento que vem sendo realizado desde então a cada 4 anos. Também desde o início da década de 90, o *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* tem se destacado por publicar artigos incluindo aplicações da EVC e não mais apenas resultados experimentais.

Dois trabalhos clássicos da EVC, Murakami (1997) e Stathopoulos (1997), apresentados no segundo Simpósio Internacional sobre Engenharia do Vento Computacional, foram publicados nos volumes 67 e 68 do *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* e ilustram bem o estágio em que o desenvolvimento da EVC encontrava-se na época.

Murakami (1997) apresentou a complexidade dos problemas da EVC e os seus campos de aplicação. O autor cita a análise de campos de velocidade e temperatura em torno do corpo humano, análise dos campos de velocidade e pressão em torno de corpos

rombudos, análise acoplada de fluidos e estrutura, avaliação de conforto de pedestres próximos a edifícios altos sujeitos a ação do vento, estudo de dispersão de poluentes, dentre outras aplicações. O trabalho também apresenta limitações e perspectivas em relação aos modelos de turbulência aplicados nos métodos numéricos.

[Stathopoulos \(1997\)](#) apresentou a utilização de soluções numéricas como tendo o potencial de superar as limitações existentes nos métodos experimentais, como ensaios em túnel de vento, cujos resultados fundamentam normas e códigos de vento no mundo todo (uma breve discussão sobre as limitações dos túneis de vento será feita na seção 2.5). Neste trabalho, o autor fez um levantamento de diversos resultados obtidos através de métodos numéricos já publicados na literatura da época e comparou-os entre si e com resultados experimentais. Apesar de as soluções numéricas mostrarem-se promissoras, muitas divergências e limitações nos modelos de turbulência ainda restringiam a aplicação destes métodos, segundo o autor.

O artigo de [Stathopoulos \(1997\)](#) apontou a necessidade de prosseguimento nas pesquisas da EVC para que sua aplicação se tornasse suficientemente acurada e precisa, além de enfatizar a importância dos procedimentos de validação dos resultados da DFC. O autor ainda demonstra preocupação com a crescente aplicação da EVC na indústria por pessoas com pouca ou nenhuma formação em dinâmica dos fluidos e métodos computacionais, tendo em vista o otimismo exacerbado quanto à confiabilidade dos métodos então disponíveis. Diante de tais preocupações, em 1998 o comitê de norma de Dinâmica dos Fluidos Computacional do American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) publicou um guia para verificação e validação de simulações computacionais em dinâmica dos fluidos ([AIAA, 1998](#)), e em 2009 a ASME publicou uma norma equivalente para análise de erros e incertezas dos resultados das simulações ([ASME, 2009](#)).

A preocupação demonstrada por [Stathopoulos \(1997\)](#) com respeito ao uso de softwares por profissionais sem formação específica é confirmada também em outras áreas da Engenharia. A aplicação de ferramentas computacionais, especialmente com interface gráfica intuitiva e acessível, pode sugerir uma falsa sensação de segurança quanto aos resultados obtidos. Na EVC, erros nos coeficientes podem levar a subdimensionamentos e desconsideração de efeitos aerodinâmicos importantes, como inversão de esforços e intensas pressões localizadas em elementos de construtivos. Por isso, verifica-se a importância da verificação e validação dos modelos computacionais utilizados e dos resultados obtidos.

[Braun e Awruch \(2009\)](#) também realizaram diversas simulações numéricas e compararam-nas com resultados obtidos em túnel de vento. O modelo matemático utilizado no trabalho foi baseado no Método dos Elementos Finitos e foi desenvolvido na tese de doutorado de um dos autores ([BRAUN, 2007](#)) especificamente para simulações aerodinâmicas, tanto considerando a estrutura rígida, quanto flexível. O referido trabalho apresenta a simulação de várias estruturas, como o tabuleiro da Ponte Tacoma Narrows,

um silo de armazenagem cilíndrico, um conjunto de edifícios representando uma região da cidade de Montreal no Canadá, uma edificação cúbica com uma área de ventilação e um edifício alto retangular (Figura 2.26). Para todos os casos, os resultados mostraram-se concordantes e muito próximos daqueles obtidos em ensaios em túnel de vento, permitindo concluir a viabilidade e confiabilidade da modelagem proposta.

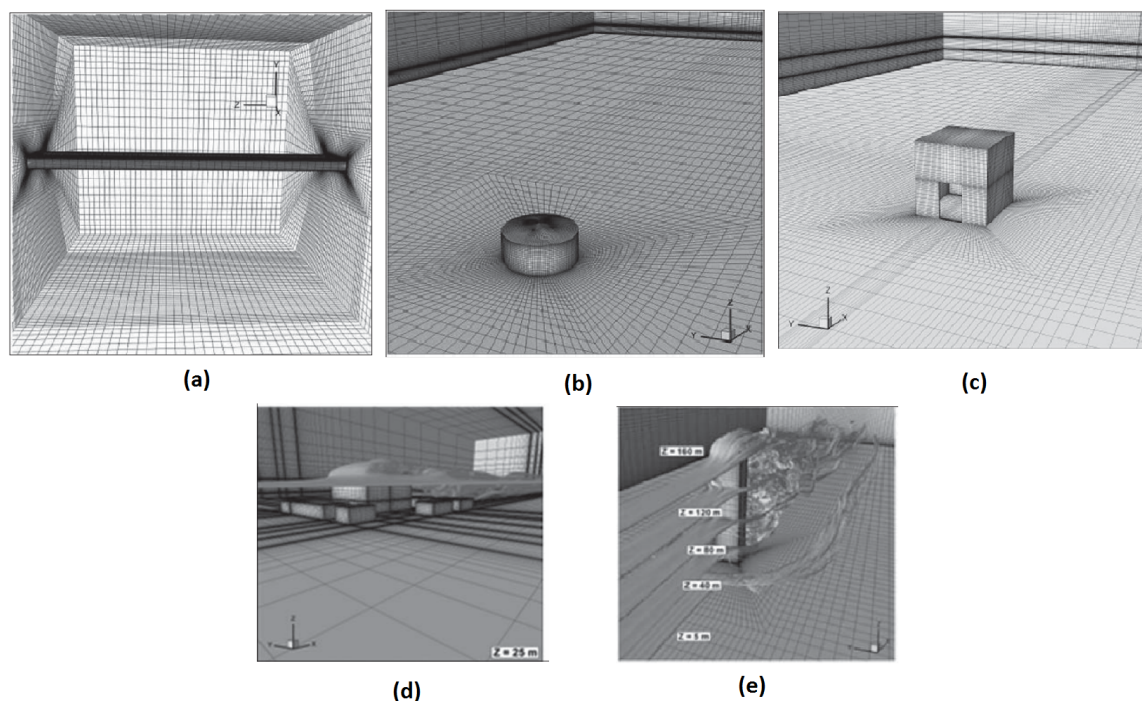


Figura 2.26 – Ensaios realizados por [Braun e Awruch \(2009\)](#): (a) Ponte Tacoma, (b) silo cilíndrico, (c) edificação com ventilação, (d) conjunto de edifícios e (e) edifício vertical prismático. Fonte: [Braun e Awruch \(2009\)](#)

Em [Awruch, Braun e Greco \(2015\)](#) também verifica-se a utilização de métodos numéricos para simular virtualmente estruturas já ensaiadas em túnel de vento. Nesse trabalho, os autores realizaram a simulação da ponte sobre o rio Guamá e de um edifício alto (Figura 2.27); a ponte foi modelada tanto em sua condição rígida, quanto flexível, enquanto o edifício foi modelado de forma apenas flexível. Em ambos os casos, os resultados conseguiram captar os principais fenômenos físicos de cada análise e mostraram-se coerentes com aqueles obtidos experimentalmente em túnel de vento, ratificando novamente a viabilidade da implementação de códigos numéricos para resolução de problemas desta natureza.

[Gunawardena et al. \(2017\)](#) fizeram um relato dos principais aspectos relacionados à análise do vento e projeto de edifícios altos. No trabalho evidencia-se a preocupação com a percepção das pessoas dos deslocamentos impostos pelo vento e com o conforto de pedestres nas regiões adjacentes a edifícios altos. Verifica-se que, em todo o mundo, as normas apresentam limitações de forma, localização e altura das estruturas, levando

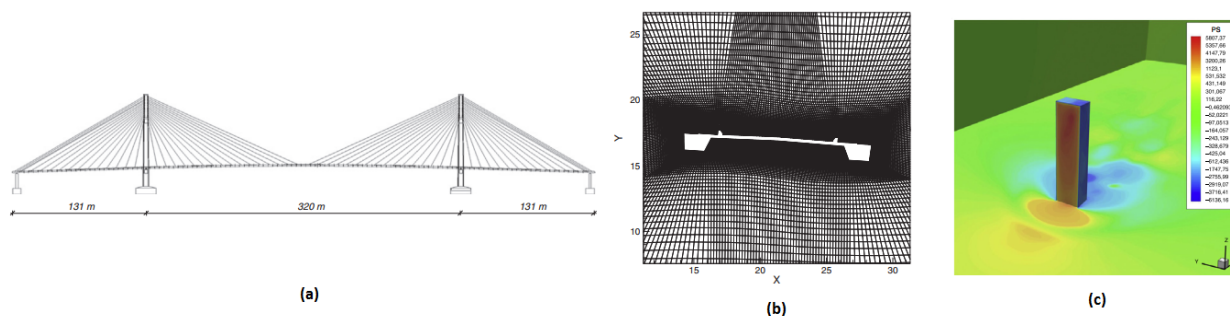


Figura 2.27 – Ensaios realizados por [Awruch, Braun e Greco \(2015\)](#): (a) Elevação da ponte sobre rio Guamá, (b) seção transversal da ponte e (c) campo de pressão sobre o edifício alto. Fonte: [Awruch, Braun e Greco \(2015\)](#)

projetistas e buscarem estudos específicos mais aprofundados. Os autores afirmam que, apesar dos métodos de modelagem computacional exigirem extensos estudos para validação, os mesmos já têm sido utilizados pela indústria da construção. Além disso, apresenta-se o estudo de caso de uma edificação em Colombo-Sri Lanka que foi analisada fisicamente em túnel de vento e através de modelagem no software Ansys. A Figura 2.28 mostra os resultados dos coeficientes de pressão em função dos pontos de tomada de medição no modelo; o traçado azul indica os resultados obtidos computacionalmente, e o laranja, aqueles obtidos em túnel de vento.

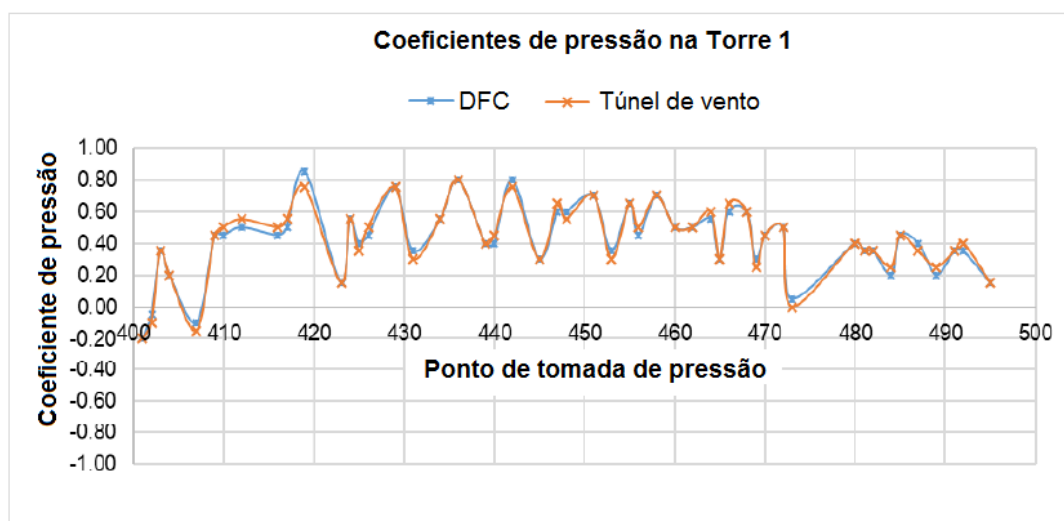


Figura 2.28 – Coeficientes de pressão por ponto de medição. Fonte: [Gunawardena et al. \(2017\)](#) (adaptado)

A Figura 2.29 apresenta o coeficiente estatístico de correlação dos coeficientes aerodinâmicos obtidos através dos dois métodos, onde são apresentados os valores computacionais no eixo horizontal e os do túnel de vento no eixo vertical. A análise estatística dos resultados mostra uma correlação de 0,97 e evidencia a precisão dos ensaios realizados.

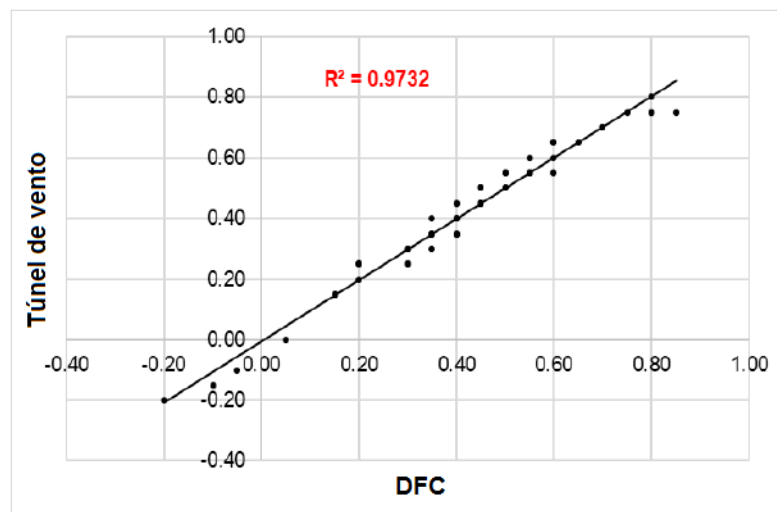


Figura 2.29 – Correlação dos coeficientes de pressão obtidos pelos dois métodos. Fonte: [Gunawardena et al. \(2017\)](#) (adaptado)

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Tendo em vista que os casos específicos disponíveis na norma de vento são limitados a exemplos relativamente simples, projetistas tendem a lançar mão de ensaios em túnel de vento para analisar estruturas particularmente sensíveis aos efeitos do vento e/ou de geometria complexa não prevista pela norma.

Nos ensaios realizados em túnel de vento, são criados modelos reduzidos das edificações e do seu entorno (vizinhança) em escala pré-determinada e são aferidas as pressões em diversos pontos do modelo através de manômetros convenientemente localizados.

A partir da medição das pressões no modelo reduzido e da área de influência de cada ponto de tomada de pressão, são calculados os coeficientes aerodinâmicos pela equação (2.18). De acordo com [Nunez, Loredou-Souza e Rocha \(2012\)](#), a aplicação destes coeficientes é a forma mais básica de avaliar o desempenho aerodinâmico de uma edificação.

Os túneis de vento são equipamentos caros e de grande porte, estando disponíveis em poucos centros de pesquisa e universidades. Há dois tipos comuns: o túnel de retorno fechado e o de retorno aberto. O primeiro é caracterizado pela recirculação do escoamento em um circuito fechado, consome menos energia e permite que a área de trabalho tenha pressão próxima da atmosférica, porém é mais caro para se construir e provoca o aumento gradual da temperatura do ar, que pode eventualmente interferir no ensaio. O segundo tipo é caracterizado por possuir uma saída de escoamento aberta, tendo como vantagens o menor custo e evitar aquecimento do ar, apesar de apresentar variações de pressão em torno da pressão atmosférica na área de trabalho ([LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004](#)).

Para simular o vento natural conforme indicado na Figura 2.1 e equação (2.1) nas seções de ensaio dos túneis, [Loredo-Souza, Schettini e Paluch \(2004\)](#) apresentam métodos passivos e ativos. Os métodos passivos consistem em colocar obstáculos físicos como grelhas, barreiras horizontais, pequenos blocos para simular rugosidade, "colunas elípticas" verticais, dentre outros aparatos, para "moldar" o escoamento de ar ao perfil do vento natural na camada limite atmosférica. As Figuras 2.30 e 2.31 mostram o arranjo típico destes obstáculos e outras opções usuais, respectivamente. Nos métodos ativos, busca-se o mesmo objetivo, mas através de pequenos jatos de ar na direção perpendicular ao escoamento principal, como mostra a Figura 2.32.

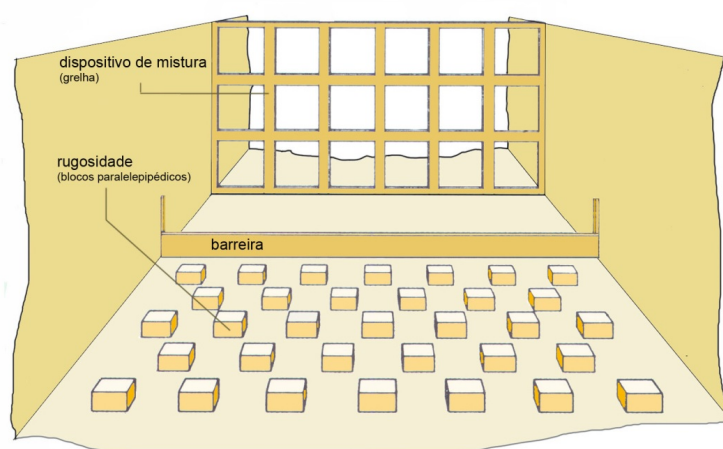


Figura 2.30 – Arranjo típico de método passivo. Fonte: [Loredo-Souza, Schettini e Paluch \(2004\)](#)

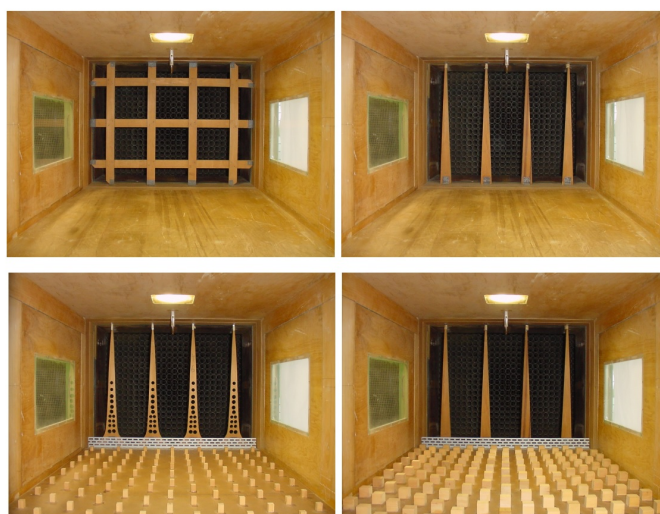


Figura 2.31 – Outros tipos de dispositivos utilizados nos métodos passivos. Fonte: [Loredo-Souza, Schettini e Paluch \(2004\)](#)

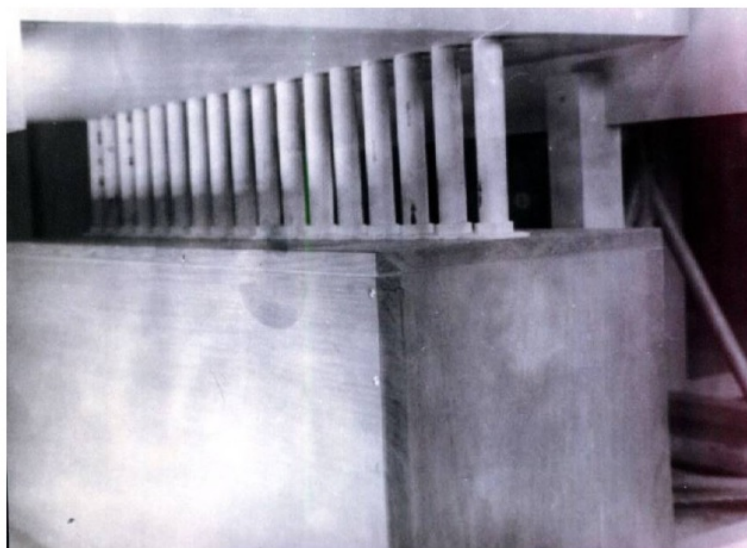


Figura 2.32 – Dispositivo emissor de jatos de ar. Fonte: [Loredo-Souza, Schettini e Paluch \(2004\)](#)

Quando a interferência dos edifícios adjacentes é considerada relevante, os modelos reduzidos são construídos com sua respectiva vizinhança, como mostra a Figura 2.33. Nesses casos, as edificações vizinhas são construídas como modelos "mudos", sem nenhuma medição, enquanto o edifício principal é devidamente instrumentado para medição das pressões.



Figura 2.33 – Fotografia e respectivo modelo reduzido de um edifício com vizinhança. Fonte: [Nunez, Loredo-Souza e Rocha \(2012\)](#)

[Nunez, Loredo-Souza e Rocha \(2012, p.12\)](#) afirmam de forma peremptória que "atualmente, a melhor ferramenta disponível para o estudo das ações do vento durante a fase de projeto e desenvolvimento de um produto é o túnel de vento". Os autores também mencionam a possibilidade de realização de simulações numéricas como substituição aos ensaios físicos, mas afirmam sua limitação justamente nas situações onde o modelo interage

com outros obstáculos, isto é, com interferência da vizinhança. Assim, no caso de edificações no centro de grandes cidades, os autores definem o túnel de vento como a melhor maneira de estudar os efeitos do vento.

Braun e Awruch (2009) afirmam que, de fato, as técnicas experimentais desenvolvidas em túnel de vento são o método mais *tradicional* para resolução de problemas de vento, mas apresentam modelos numéricos com resultados bastante satisfatórios.

Awruch, Braun e Greco (2015) evidenciam o fato de que ensaios em túnel de vento *não são isentos de erros*, já que os dispositivos de medição, as paredes do túnel, o efeito de escala e correlações podem influenciar significativamente os resultados.

Esta discussão possui longa data. Khanduri, Stathopoulos e Bédard (1998) afirmam que túneis de vento são a principal fonte de conhecimento no que tange aos efeitos de vizinhança em edifícios, enquanto, em outro trabalho, Stathopoulos (1997) enfatiza a inabilidade dos métodos experimentais em túnel de vento de representar completamente os modelos reais com número de Reynolds adequado.

Este trabalho não possui a pretensão de esgotar este assunto, mas deve-se atentar que: ensaios em túnel de vento, embora amplamente utilizados e razoavelmente confiáveis, não são a realidade, mas um modelo físico, em escala reduzida, em que busca-se representar a realidade com algum grau de aproximação; e, as simulações e modelagens numérico-computacionais devem ser consideradas como uma possibilidade viável, considerando que atualmente tem-se recursos tecnológicos para simular os efeitos do vento em edificações de forma satisfatório por meio do desenvolvimento e uso de modelos matemáticos e computacionais mais complexos e eficazes.

Sobre os ensaios em túnel de vento, deve-se considerar que:

(a) O vento induzido nos equipamentos não é o vento natural, apesar dos dispositivos apresentados anteriormente;

(b) Os modelos de semelhança utilizados para ensaiar modelos em escala reduzida invariavelmente possuem erros, como reconhecem Nunez, Loredou-Souza e Rocha (2012);

(c) As paredes da seção do túnel interferem no escoamento, não simulando a situação real das edificações que normalmente são localizadas ao ar livre;

(d) Os manômetros que medem as pressões que incidem no edifício são de qualidade e acurácia limitada e podem interferir no escoamento do fluxo de ar, devido às suas elevadas dimensões e aberturas relativas em relação aos modelos físicos em escala;

(e) Os materiais utilizados para construção dos modelos reduzidos podem interferir nos resultados devido a sua rugosidade e rigidez diferentes da estrutura real.

Não é intenção deste texto desqualificar os ensaios em túnel de vento. Como será mostrado posteriormente, os resultados desenvolvidos nesta pesquisa foram, inclusive, bali-

zados também com resultados desenvolvidos nestes equipamentos. Apesar disto, deve-se evidenciar que os resultados experimentais não devem ser aceitos como dogmaticamente inquestionáveis. Portanto, dentro das limitações da ciência atual, os resultados experimentais podem ser aceitos, porém não como única alternativa para avaliar os efeitos do vento em edificações, e deve-se vislumbrar a implementação de métodos numéricos como uma alternativa relevante para resolução de problemas na Engenharia do Vento.

Em muitas áreas do conhecimento tais como a aeronáutica, automotiva, industrial, petróleo e gás, previsão climática etc., a modelagem computacional vem sendo usada largamente para simular problemas reais complexos com redução significativa de tempo e recursos financeiros, pois existem atualmente conhecimento e recursos computacionais necessários para o desenvolvimento e solução de modelos complexos, robustos e eficazes que representem fenômenos reais.

Na área de Engenharia de Vento não é diferente, pois a área de DFC, com ou sem o acoplamento da dinâmica de estruturas na interação fluido-estruturas, é uma área consolidada e se ainda não há um uso difundido em EV deve-se por um lado à praticidade de manipulação das normas de projetos, e em casos específicos de túnel de vento, e por outro lado à falta de formação de Engenheiros Cíveis nessa complexa disciplina de DFC.

2.6 ENGENHARIA DO VENTO COMPUTACIONAL

Nesta perspectiva, a utilização de métodos numérico-computacionais apresenta-se como uma alternativa viável em substituição aos escassos e onerosos ensaios realizados em túneis de vento.

Como já introduzido na seção 2.4, em meados da década de 80 deu-se início a chamada Engenharia do Vento Computacional (EVC), como um dos ramos da Engenharia do Vento. A EVC une as ferramentas de DFC e Dinâmica das Estruturas Computacional (DEC) aos conhecimentos específicos da EV e, em essência, tem como objetivo prever o comportamento do escoamento de fluidos interagindo com estruturas neles imersos; objetivo semelhante aos estudos em túnel de vento. No entanto, os modelos computacionais são mais flexíveis para adaptar-se a necessidades distintas de forma mais fácil e rápida.

Nascimento, Bono e Bono (2017) afirmam que programas computacionais baseados em métodos numéricos já são amplamente aplicados, na forma de pacotes e plataformas comerciais, ou na forma de códigos desenvolvidos por profissionais das engenharias e computação, para a resolução de problemas estruturais, mas que apesar disso, a DFC ainda é pouco utilizada para resolução de problemas de carga de vento sobre estruturas. De fato, a implementação de modelagem e simulação computacional, em abordagem numérica,

é de uso rotineiro nas áreas estrutural, automobilística, aeronáutica, de petróleo e gás, química e petroquímica, metalurgia/siderurgia, cimentícia e em muitas outras indústrias, ao contrário do que acontece com aerodinâmica de edificações civis.

Apesar de contar quase 40 anos de existência, a EVC ainda pode ser considerada um ramo relativamente novo da engenharia, especialmente no Brasil. A formação nem sempre sólida dos estudantes de engenharia em disciplinas físicas e matemáticas, a escassez de grandes centros de pesquisa com recursos e a cultura de resistência a inovações típica da indústria da construção civil podem ser aventadas como explicações para este atraso, embora uma discussão mais aprofundada sobre este assunto fuja ao escopo deste trabalho.

Desde o seu surgimento, umas das principais limitações da EVC foi o poder de processamento dos computadores. De acordo com [Murakami \(1997\)](#), a grande dificuldade dos problemas de EVC é a existência de corpos rombudos com arestas vivas nas quinas. Essa especificidade exige a implementação de malhas bastante refinadas, ou uso de métodos de análise de camada limite e/ou interferência multidirecional de escoamentos, que invariavelmente aumentam o custo computacional destas análises, isto é, a quantidade de memória requerida pelas CPUs para realizar os cálculos. Assim, computadores com baixo poder de processamento podem levar vários dias e até semanas para resolução de um único problema. Uma solução infraestrutural tem sido o emprego de ferramentas de processamento de alto desempenho, como computação paralela e/ou orientada a objeto, por exemplo, lançando mão de codificações computacionais mais complexas, porém otimizando a capacidade computacional e reduzindo o tempo de processamento para aquisição de soluções numéricas.

As últimas décadas proporcionaram um notável avanço na capacidade dos computadores e, conseqüentemente, o seu barateamento, além da disponibilização de clusters e supercomputadores, o que torna a execução de análises aerodinâmicas computacionais consideravelmente mais acessíveis. Apesar disso, o custo computacional continua sendo uma preocupação na resolução de problemas de EVC. Para contornar as limitações impostas pelos computadores disponíveis atualmente à resolução de problemas de escoamento de fluidos, são utilizados modelos de turbulência que permitem simular a multiplicidade de escalas em que ocorrem os fenômenos aerodinâmicos de forma computacionalmente viável ([PICCOLI, 2009](#)).

[Neto \(2002\)](#) apresenta uma expressão matemática que calcula o número N de equações que seriam necessárias para solucionar escoamentos atmosféricos tridimensionais de forma direta, isto é, sem aplicação de modelos de turbulência:

$$N = \left(\frac{L}{l}\right)^3 \quad (2.21)$$

onde L é a dimensão característica do problema e l é a escala dissipativa de Kolmogorov.

Embora a resolução direta das equações em todas as escalas seja a forma mais precisa de resolver problemas de escoamento (SANGALLI, 2009), o refinamento da malha exigido para isso torna-se proibitivo. Um problema que apresente, por exemplo, $L = 30,0m$ e $l = 1,0mm$, contará com um número de equações da ordem de $N = 10^{13}$, cerca de 100.000 vezes mais do que o número de equações praticável atualmente, em torno de 10^8 (PICCOLI, 2009).

A equação (2.21) evidencia como a multiplicidade de escalas geométricas nos problemas de escoamento do vento, especialmente em corpos rombudos, torna o custo computacional consideravelmente elevado.

Além das restrições dos equipamentos, os modelos matemáticos para modelagem da turbulência de problemas da EVC também possuem algumas limitações. A interação de fluidos com corpos rombudos é consideravelmente mais complexa do que os problemas clássicos de mecânica dos fluidos como o escoamento de fluidos em tubulações ou canais e até mesmo em superfícies suaves (MURAKAMI, 1997). Apesar disso, o avanço científico na EVC tem o potencial de superar estas limitações (STATHOPOULOS, 1997) e nos últimos anos tem proporcionado resultados bastante sólidos e confiáveis, como pode ser verificado em Tutar e Oguz (2007), Awruch, Braun e Greco (2015), Blocken, Stathopoulos e Beeck (2016), Gunawardena et al. (2017), Bairagi e Dalui (2018), Mukherjee e Bairagi (2018), Alminhana (2018) e Thordal, Bennetsen e Koss (2019).

As simulações de cargas aerodinâmicas em edificações civis constituem um problema de interação fluido-estrutura (*FSI*, na sigla em inglês), que pode ser resolvido de duas formas: *FSI one way* (uma via) ou *FSI two way* (duas vias).

A análise *FSI one way* considera a simulação do fluido e da estrutura de maneira independente, analisando-se primeiro o escoamento do fluido em torno da estrutura rígida e procedendo com a transferência do campo de pressões para a simulação da estrutura. Uma vez transferidas estas pressões do fluido, a estrutura terá seu comportamento analisado sob atuação da carga de vento e seus deslocamentos e esforços serão calculados. Desta forma, os deslocamentos verificados na edificação não influem no domínio do fluido e, portanto, os dados são transferidos apenas do fluido para a estrutura (por isso a expressão uma via). Esta análise que considera a estrutura rígida durante a modelagem de fluido também é chamada simplesmente de simulação *aerodinâmica* e tende a apresentar custo computacional reduzido em relação à outra alternativa.

Por outro lado, a análise *FSI two way* realiza a simulação do fluido e da estrutura de maneira interdependente ou totalmente acoplada. O escoamento do fluido provoca cargas na estrutura que, por isso, sofrerá deformações e, por sua vez, modificará o domínio do fluido interferindo no seu escoamento. Este procedimento de interferência mútua é analisado em cada passo de tempo da simulação e tende a exigir um esforço computacional bastante elevado. Este tipo de análise também é chamada de simulação *aeroelástica* e

implica em transferência de dados do fluido para a estrutura e também da estrutura para o fluido (por isso a expressão duas vias).

Este processo iterativo é ilustrado na Figura 2.34, onde \mathbf{u} indica o deslocamento da estrutura, \mathbf{v} e p indicam a velocidade e pressão do fluido, respectivamente, e n indica o passo de tempo. A referida figura representa um algoritmo desenvolvido por [Awruch, Braun e Greco \(2015\)](#), no qual é dado o campo de deslocamentos da estrutura no passo de tempo n e são calculados os campos de velocidade e pressão do fluido no passo de tempo $n-1/2$ (isto é, meio passo de tempo anterior). A partir destes dados, são calculados os dados do fluido meio passo de tempo à frente, que são posteriormente utilizados para recalcular os deslocamentos da estrutura no passo n e, a partir deste, calcula-se o campo de deslocamentos no passo de tempo $n+1$. O processo iterativo descrito continua indefinidamente até atingir o tempo final da análise e consiste numa metodologia de aproximações sucessivas com correções interdependentes dos campos velocidade e pressão do fluido, bem como deslocamento, velocidade e aceleração dinâmica da estrutura.

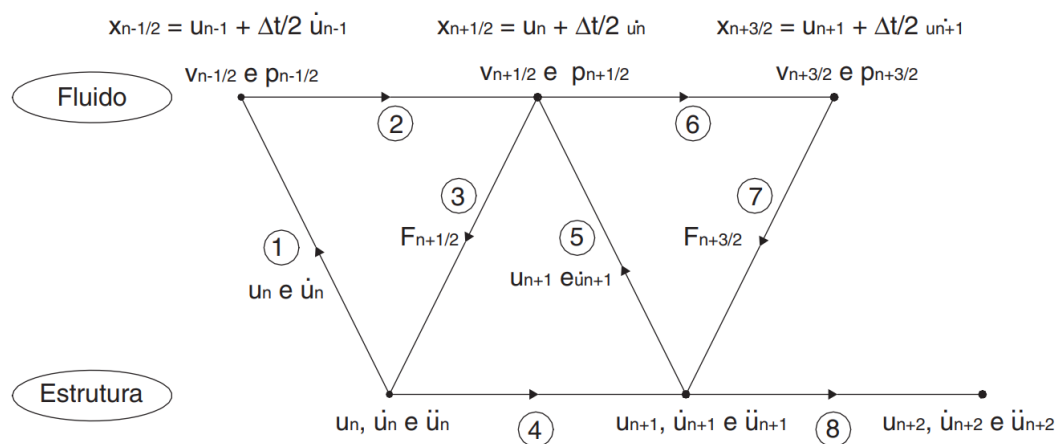


Figura 2.34 – Algoritmo de simulação aeroelástica. Fonte: [Awruch, Braun e Greco \(2015\)](#)

Apesar de os ensaios em túnel de vento ainda serem mais populares para resolução de problemas de vento no Brasil, as modelagens numéricas possuem diversas vantagens em relação ao método experimental ([BRAUN; AWRUCH, 2009](#)), como maior versatilidade para obtenção de resultados, maior variabilidade nos parâmetros físicos e geométricos, custo reduzido e menor tempo para obtenção de respostas.

[Thordal, Bennetsen e Koss \(2019\)](#) também ressaltam que as ferramentas da DFC aplicadas à EVC são praticamente disponíveis para todos, podem até considerar aspectos difíceis de serem modelados experimentalmente em túneis de vento, como a temperatura, e, quando executadas em computadores com alto poder de processamento, apresentam-se suficientemente rápidas. Além disso, os autores também apontam a vantagem das modelagens numéricas em permitir a captação de resultados em uma quantidade virtualmente

infinita de pontos no contorno da estrutura, enquanto ensaios em túneis de vento possuem uma quantidade limitada de pontos de tomada de pressão, o que pode não captar pequenas flutuações de pressão nas zonas de separação e recirculação do escoamento.

De acordo com [Maliska \(2004\)](#), o crescimento exponencial do poder de processamento dos computadores e a redução dos seus custos faz com que a aplicação de técnicas numéricas para solução de problemas de engenharia tenda a torna-se cada vez mais fácil, tanto no meio acadêmico, quanto industrial. Em contraste com a experimentação física, o autor resume bem as particularidades dos métodos numéricos e alerta para sua validação:

A experimentação numérica (uso de técnicas numéricas) [...] praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados com uma rapidez fantástica. Os dados obtidos devem ser, entretanto, confiáveis e este é um ponto de extrema importância a ser observado pelo analista. ([MALISKA, 2004](#), p.2).

[Maliska \(2004\)](#) prevê também que experimentos físicos e ensaios numéricos tendam a ser complementares e igualmente respeitados no meio científico, com as simulações numéricas desempenhando papel decisivo nos projetos de engenharia. Assim, uma vez que o modelo matemático (de aplicação menos custosa) seja devidamente conhecido e validado, os experimentos físicos (mais caros e onerosos) para problemas "rotineiros" da engenharia tornam-se obsoletos, ficando sua aplicação direcionada a problemas de fronteira do conhecimento, onde os modelos ainda não estejam bem estabelecidos, e para problemas em que a complexidade da solução emprega a modelagem e simulação computacional como metodologia de orientação da fabricação dos protótipos em escala e otimização de sua simulação experimental, intuitivamente mais confiável para a maioria das pessoas externas à comunidade científica e acadêmica.

Com o desenvolvimento de estruturas cada vez arrojadas no Brasil (geralmente arranha-céus em grandes cidades), espera-se que a demanda por estudos aerodinâmicos seja proporcional ao aumento de projetos deste tipo. Tendo em vista a escassez e alto custo dos laboratórios com túnel de vento, além das limitações da norma de vento, abre-se espaço para utilização de métodos inovadores neste campo de estudo.

Portanto, as simulações e modelagens numérico-computacionais devem ser consideradas como uma opção viável para resolução de problemas de vento, especialmente em vista do seu baixo custo e ampla disponibilidade. Quando devidamente verificados e validados, seus resultados são confiáveis e podem contribuir com aqueles desenvolvidos nos tradicionais túneis de vento.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO VENTO

Neste capítulo são apresentadas as expressões matemáticas fundamentais para modelagem do escoamento do ar como um sistema contínuo. As equações apresentadas aqui compõem os códigos de programas que simulam a ação do vento sobre estruturas.

3.1 MODELAGEM DE SISTEMAS CONTÍNUOS

Apesar de serem formados por partículas discretas que interagem entre si, os fluidos são usualmente modelados como sistemas contínuos. Esta abordagem será apresentada a seguir a partir das leis de conservação da massa e do momento linear. As equações da termodinâmica foram suprimidas deste texto, pois em nenhuma das análises será considerada a variação de temperatura do sistema.

3.1.1 Hipóteses básicas

Um sistema contínuo β pode ser definido como um conjunto de partículas que são representadas por um mapeamento injetivo correspondente aos pontos da região ($\mathcal{K}(\beta)$) que esse sistema ocupa (MURAD, 2008), conforme mostrado na Figura 3.1. Qualitativamente, um sistema contínuo difere-se de um sistema discreto, que é caracterizado por porções espaçadas de matéria, entre as quais não se podem estabelecer medições das propriedades do sistema. Em um sistema contínuo todas as funções apresentam continuidade em todo domínio do problema, não havendo "vazios", interstícios ou qualquer tipo de descontinuidade física. O ar natural não atende universalmente a este critério de continuidade, mas apresenta continuidade razoável do ponto de vista macroscópico, sendo viável a utilização deste princípio como hipótese.

É importante notar que nos casos em que aplica-se o cálculo diferencial ao estudo de fluidos, os elementos ditos infinitesimais são pequenos o suficiente do ponto de vista macroscópico, mas não são pequenos o suficiente para considerar efeitos moleculares ou mesmo serem influenciados pelo espaçamento entre as moléculas do fluido. Nesse sentido,

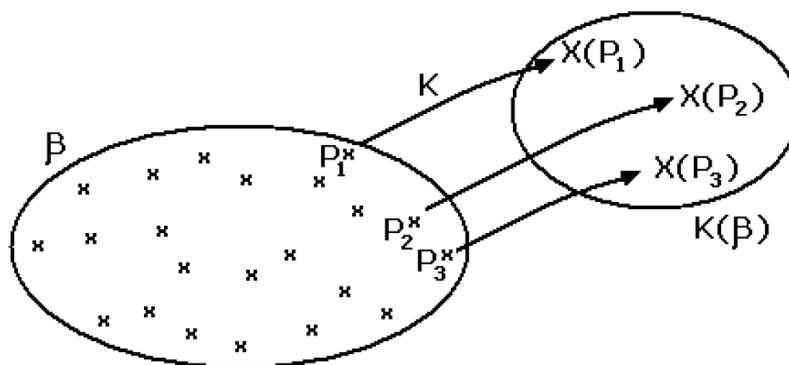


Figura 3.1 – Mapeamento injetivo. Fonte: Murad (2008)

quanto mais rarefeito for o gás menos atende à hipótese do contínuo, fazendo com que tal modelagem não seja possível.

Quanto a compressibilidade do fluido, esta propriedade é usualmente determinada em função do Número de Mach Ma que é a relação entre a velocidade do fluido v e a velocidade do som c no mesmo meio:

$$Ma = \frac{v}{c}. \tag{3.1}$$

Se o número de Mach for inferior a 0,3, o fluido pode ser modelado como incompressível. Assim, sendo a velocidade do som no ar atmosférico igual a 340 m/s, tem-se:

$$Ma = 0,3 = \frac{v}{c} \Rightarrow v \leq 102m/s. \tag{3.2}$$

Visto que a velocidade máxima do vento no Brasil prevista na NBR 6123 é de 50m/s, o vento pode ser considerado como incompressível para todos os casos práticos; para esta velocidade máxima, tem-se:

$$Ma = \frac{50}{340} \Rightarrow Ma = 0,147 < 0,3 \tag{3.3}$$

3.1.2 Equação de conservação da massa

A equação de conservação de massa (ou equação de continuidade) expressa matematicamente o princípio universal de que a matéria não pode ser criada ou destruída.

Supondo-se um sistema com um volume de controle fechado V e uma superfície de contorno A , pode-se escrever o seguinte (conforme mostrado na Figura 3.2):

$$\frac{dM}{dt} + \dot{m} = 0 \tag{3.4}$$

onde

$\frac{dM}{dt}$: variação da massa M interna do sistema

\dot{m} : vazão em massa por unidade de tempo que atravessa a superfície de contorno



$$\left[\begin{array}{c} \text{taxa de variação} \\ \text{de massa dentro} \\ \text{do domínio A} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{fluxo de massa} \\ \text{através da} \\ \text{fronteira V} \end{array} \right] = 0$$

Figura 3.2 – Volume de controle fechado. Fonte: Murad (2008) (adaptado)

Note-se que a equação (3.4) é igual a zero pois não há fontes ou consumo de massa dentro do domínio.

Substituindo $dM = \rho dV$, \dot{m} pelo balanço do fluxo de massa entrando e saindo do volume de controle através de seu contorno (fronteira superficial que o determina), e integrando o primeiro termo no volume e o segundo termo na superfície na equação anterior, tem-se:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_A \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \tag{3.5}$$

onde \vec{n} é definido como o vetor normal em cada ponto da superfície de contorno orientado para fora do volume. Assim, o produto escalar $\vec{v} \cdot \vec{n}$ considera apenas a componente normal da velocidade em relação à superfície, já que a componente tangencial não implica trocas de massa com o sistema externo.

Para simplificar a equação de continuidade, pode-se aplicar o Teorema de Gauss, que associa a integral de volume com a integral de superfície de um campo vetorial:

$$\int_{\text{Área}} \vec{F} \cdot \vec{n} ds = \int_{\text{Volume}} \text{div}(\vec{F}) dV \tag{3.6}$$

onde \vec{F} é um campo vetorial qualquer.

Aplicando este Teorema à equação (3.5), obtém-se a forma integral, também denominada forma fraca, da eq. de continuidade:

$$\int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) \right) dV = 0. \quad (3.7)$$

Visto que dV é um elemento de volume genérico, ou seja, pode assumir qualquer valor, o integrando deve ser nulo para sustentar a equação, resultando a forma diferencial, ou forma forte, da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0. \quad (3.8)$$

Aplicando a seguinte identidade ao divergente na equação anterior:

$$\text{div}(a \vec{b}) = a \text{div}(\vec{b}) + \vec{b} \cdot \nabla a, \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div}(\vec{v}) + \vec{v} \cdot \nabla \rho = 0. \quad (3.10)$$

Utilizando o conceito de derivada material $\frac{d\rho}{dt}$ e substituindo-o em em (3.10):

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho, \quad (3.11)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div}(\vec{v}) = 0. \quad (3.12)$$

Visto que o escoamento pode ser considerado como incompressível, conforme equação (3.3), a massa específica ρ será constante e, portanto, sua derivada temporal será nula. Neste caso, pode-se escrever:

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \Rightarrow \text{div}(\vec{v}) = 0. \quad (3.13)$$

3.1.3 Equação de conservação do momento linear

A equação de conservação do momento linear é dada pela aplicação da 2ª Lei de Newton a um volume de controle:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{Q}}{dt} \quad (3.14)$$

onde

$\vec{\mathbf{F}}$: força

$\vec{\mathbf{Q}}$: momento linear

t : tempo

O momento linear $\vec{\mathbf{Q}}$ é obtido pela soma das parcelas referentes ao volume e ao contorno. A massa do sistema pode ser considerada constante e, analogamente ao que foi feito para a conservação de massa, pode-se integrar a variação do momento no volume de controle e na superfície de contorno:

$$\vec{\mathbf{F}} = \frac{d\vec{\mathbf{Q}}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \vec{\mathbf{v}} \rho dV + \int_A \vec{\mathbf{v}} \rho \vec{\mathbf{v}} \cdot \vec{\mathbf{n}} dA. \quad (3.15)$$

As forças que atuam no sistema podem ser de campo ou de contato. As forças de campo F_g são aquelas aplicadas no volume do sistema, sem que necessariamente haja contato com outro corpo; neste caso, será considerada apenas a força gravitacional. Já as forças de contato F_c são forças externas aplicadas em uma área específica do contorno do sistema. Portanto:

$$\vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{F}}_g + \vec{\mathbf{F}}_c = \frac{d\vec{\mathbf{Q}}}{dt}, \quad (3.16)$$

$$\vec{\mathbf{F}}_g = \int_V \rho \vec{\mathbf{g}} dV, \quad (3.17)$$

$$\vec{\mathbf{F}}_c = \int_A \sigma \vec{\mathbf{n}} dA, \quad (3.18)$$

onde σ é o tensor tensão de segunda ordem aplicado ao sistema.

Substituindo as expressões das forças na equação (3.15):

$$\int_V \rho \vec{\mathbf{g}} dV + \int_A \sigma \vec{\mathbf{n}} dA = \frac{d}{dt} \int_V \vec{\mathbf{v}} \rho dV + \int_A \vec{\mathbf{v}} \rho \vec{\mathbf{v}} \cdot \vec{\mathbf{n}} dA. \quad (3.19)$$

Utilizando-se o conceito de produto tensorial:

$$\vec{\mathbf{n}}(\rho \vec{\mathbf{n}} \cdot \vec{\mathbf{n}}) = (\vec{\mathbf{n}} \otimes \rho \vec{\mathbf{n}}) \vec{\mathbf{n}}. \quad (3.20)$$

e aplicando novamente o Teorema de Gauss dado pela equação (3.6), a equação de conservação do momento linear pode ser reescrita na forma integral (ou fraca):

$$\int_V (\rho \vec{\mathbf{g}} + \text{div}(\sigma) - \frac{\partial(\rho \vec{\mathbf{g}})}{\partial t} - \text{div}(\vec{\mathbf{v}} \otimes \rho \vec{\mathbf{v}})) dV = 0 \quad (3.21)$$

Mais uma vez, fazendo o procedimento semelhante ao da conservação de massa, visto que dV é um volume infinitesimal qualquer, o integrando da equação anterior deve ser nulo, portanto, obtém-se a forma diferencial (ou forte) da equação de conservação do momento linear:

$$\rho \vec{g} + \text{div}(\sigma) - \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} - \text{div}(\vec{v} \otimes \rho \vec{v}) = 0 \quad (3.22)$$

3.2 ABORDAGENS DE EULER E LAGRANGE

Existem, essencialmente, dois métodos de se analisar o escoamento de um fluido. Esses métodos devem ser utilizados conforme a conveniência de cada caso, não devendo provocar mudanças nos resultados obtidos com ambos.

O método de Lagrange (ou descrição Lagrangeana) considera o fluido como um conjunto de partículas e as analisa individualmente, variando no tempo e no espaço. Para este método, emprega-se o conceito de trajetória, que pode ser definida como o conjunto dos lugares geométricos (pontos no espaço) ocupados por cada partícula ao longo do seu escoamento. Assim, a descrição do escoamento é efetuada através da descrição do movimento de cada partícula ao longo de sua trajetória.

O método de Euler (ou descrição Euleriana) difere-se por fixar sua análise em um ponto do espaço, enquanto diversas partículas diferentes passam pelo ponto analisado. Neste método é utilizado o conceito de linha de corrente, definida como a linha tangente ao vetor velocidade em cada ponto do escoamento. Dessa forma, a descrição do escoamento é executada através da descrição das modificações de sua velocidade e pressão, de forma macroscópica e não por partícula, em cada ponto do espaço (ou "janela de observação") escolhido para analisar o escoamento do fluido.

Em problema de mecânica dos sólidos, em que os deslocamentos relativos entre duas partículas próximas são pequenos, usa-se a descrição de Lagrangeana. No caso de escoamento de fluidos em que esse deslocamento da partícula em que a descrição considerando o deslocamento por partículas geraria um volume elevado de dados e necessidade de tempo de observação, além da complexidade de acompanhamento de muitas partículas para descrever o escoamento, dificultando o acompanhamento de cada ponto, usa-se a descrição Euleriana.

3.3 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

As equações de Navier-Stokes são as principais equações que descrevem problemas de escoamento de fluidos e, portanto, estão implementadas nos códigos dos *softwares* utilizados neste trabalho e serão descritas brevemente aqui.

A partir da equação (3.22) de conservação do momento linear, pode-se escrever:

$$\rho \vec{g} + \text{div}(\sigma) = \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \text{div}(\vec{v} \otimes \rho \vec{v}). \quad (3.23)$$

Aplicando a regra de derivação de produto e substituindo a derivada tensorial:

$$\text{div}(\vec{v} \otimes \rho \vec{v}) = \vec{v} \text{div}(\rho \vec{v}) + \rho \vec{v} \nabla \vec{v}, \quad (3.24)$$

$$\rho \vec{g} + \text{div}(\sigma) = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} + \vec{v} \text{div}(\rho \vec{v}). \quad (3.25)$$

Reorganizando algebricamente:

$$\rho \vec{g} + \text{div}(\sigma) = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} + \vec{v} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) \right). \quad (3.26)$$

Pela conservação de massa, conforme mostrado na equação (3.8), o termo dentro dos parênteses no segundo membro da equação é anulado e, portanto:

$$\rho \vec{g} + \text{div}(\sigma) = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}. \quad (3.27)$$

Para fluidos, o tensor σ é dado por:

$$\sigma = -pI + f(D) \quad (3.28)$$

onde I é a matriz identidade e $f(D)$ é um função de taxa de deformação D que depende do tipo de fluido. Para fluidos newtonianos, ou seja, que possuem relação linear entre tensão e taxa de deformação como é o caso do ar atmosférico, tem-se:

$$f(D) = 2\mu D, \quad (3.29)$$

onde

$$D = \nabla \vec{v}^{(s)} = \frac{\nabla \vec{v}^{(T)} + \nabla \vec{v}}{2}. \quad (3.30)$$

Substituindo σ na equação (3.27):

$$\rho \vec{g} + \operatorname{div}(-pI + 2\mu D) = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}, \quad (3.31)$$

$$\rho \vec{g} - \nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \mu \nabla \operatorname{div}(\vec{v}) = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}. \quad (3.32)$$

Se o fluido for incompressível, tem-se $\operatorname{div}(\vec{v}) = 0$ e a equação de Navier-Stokes é dada por:

$$\rho \vec{g} - \nabla p + \mu \Delta \vec{v} = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}. \quad (3.33)$$

Note-se que, desprezando variações de temperatura e considerando a massa específica constante (escoamento incompressível), o problema de escoamento de fluidos contém 4 incógnitas e 4 equações: 3 componentes de velocidade e uma componente de pressão; e 3 equações de Navier-Stokes (nas 3 direções) e a equação de conservação de massa.

3.4 TURBULÊNCIA

Na segunda metade do século XIX, após experimentos com fluidos escoando em condutos forçados, o físico britânico Osborne Reynolds (1842-1912) distinguiu 2 tipos diferentes de escoamento: laminar e o turbulento.

No escoamento laminar, como alude o próprio termo, o fluido movimenta-se de forma ordenada, semelhante a lâminas sobrepostas constituídas de partículas com trajetórias bem definidas e que não rompem as lâminas adjacentes. Naturalmente, este tipo de escoamento implica em uma modelagem mais simples e previsível.

Em contraste ao laminar, o escoamento turbulento é caracterizado pelo movimento caótico de suas partículas e por bruscas variações na velocidade transversal à direção principal do fluxo. Em essência, a turbulência é caracterizada por flutuações temporais e espaciais no campo de escoamento. É intuitivo inferir que o escoamento turbulento apresenta considerável dificuldade para se estabelecer um modelo matemático preciso.

Os escoamentos de fluidos tornam-se turbulentos quando os efeitos inerciais (massa específica, velocidade e condições de contorno) tornam-se muito mais significativos do que os da viscosidade. Assim, fluidos mais viscosos apresentam um caráter mais “estável”, oferecendo maior resistência ao movimento caótico das partículas e naturalmente aproximando-se de um escoamento laminar. Matematicamente, esta relação entre forças inerciais e efeitos da viscosidade é expressa pelo número de Reynolds Re :

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (3.34)$$

onde

ρ : massa específica

v : velocidade

μ : a viscosidade dinâmica

l : o comprimento característico do escoamento; no caso de um escoamento em tubo circular, será igual ao diâmetro da seção.

Naturalmente, não há uma linha definitiva que diferencia o que pode ser considerado um escoamento laminar ou turbulento, sendo inevitável a existência de uma zona que apresenta características dos dois tipos de forma alternada e/ou simultânea. Esta zona é chamada de transição. A Figura 3.3 mostra um experimento que elucidava esta questão ao inserir um fluido colorido em um escoamento:

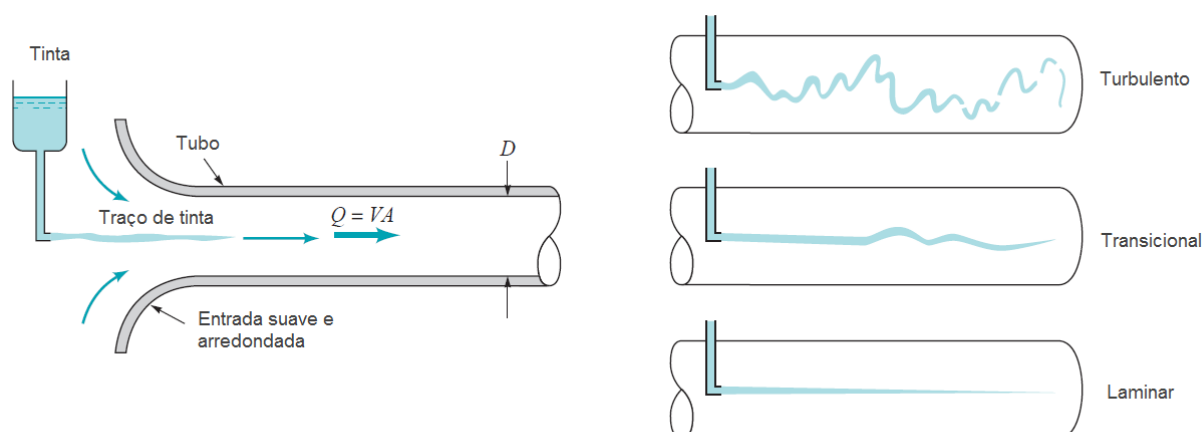


Figura 3.3 – Experimento realizado por Reynolds para avaliar a turbulência no escoamento. Fonte: Munson et al. (2009) (adaptado).

Tendo em vista que a turbulência é um fenômeno caótico, a utilização de um modelo de análise determinístico torna-se impraticável, fazendo-se necessária a adoção de abordagens estatísticas (ou probabilística). Também é importante afirmar que a turbulência é uma característica do escoamento e não da natureza específica do fluido, o que torna a análise ainda mais complexa.

A adoção de um modelo de turbulência adequado a escoamentos com obstáculos constitui ainda um dos principais desafios no desenvolvimento da Engenharia do Vento Computacional. Fenômenos como desprendimento de vórtices, recirculação, separação e recolamento fazem com que o tensor taxa de deformação do fluido tenha alterações espaciais abruptas e torne-se altamente anisotrópico, o que implica diretamente no tensor

de tensões de Reynolds, que é obtido a partir do tensor taxa de deformação (BRAUN, 2007).

A análise de autores como Braun (2007), Murakami (1997), Stathopoulos (1997), Piccoli (2009), Gabbi (2013), Awruch, Braun e Greco (2015) mostra que, tradicionalmente, os modelos de turbulência $\kappa - \epsilon$ e LES (*Large Eddy Simulation* - Simulação de Grandes Escalas) tem sido os mais usuais na modelagem de problemas de Engenharia do Vento.

São os modelos de turbulência que viabilizam a solução de problemas na EVC. Através desses modelos, é possível simular fenômenos aerodinâmicos em todas as escalas e reproduzir o comportamento do vento real sem utilizar um número de elementos excessivamente elevado que inviabilize a solução (SANGALLI, 2009).

De acordo com (BRAUN, 2007), o modelo $\kappa - \epsilon$ é teoricamente baseado na aproximação de Boussinesq e no conceito de viscosidade turbulenta; além disso, o método utiliza um sistema de equações em que se inclui o transporte de energia cinética de turbulência κ e a dissipação viscosa ϵ (de turbulência ou de energia cinética associada à turbulência) além da relação Prandtl-Kolmogorov para a viscosidade turbulenta, como mostrado a seguir:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \nu_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + \nu_t / \sigma_\kappa) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j}] + P_\kappa - \epsilon, \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nu_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + \nu_t / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} P_\kappa - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{\kappa}, \quad (3.36)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon}, \quad (3.37)$$

onde

$\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon, P_\kappa, C_{\epsilon 1}$ e $C_{\epsilon 2}$: constantes do modelo

ν : viscosidade cinemática molecular

ν_t : viscosidade turbulenta

Apesar da popularidade do modelo $\kappa - \epsilon$, especialmente em simulações industriais como aponta Gabbi (2013), Murakami (1997) afirma que este modelo enfrenta muitas dificuldades quando no escoamento em torno de corpos rombudos. De acordo com Braun (2007), este modelo é bastante apropriado para problemas aeronáuticos, onde o escoamento é relativamente regular e sem separação. O mesmo não ocorre na interação do vento com estruturas civis, onde há abundância de zonas de recirculação, vórtices e variações bruscas na direção das linhas de corrente devido a altos gradientes de pressão.

Apesar de vários aprimoramentos feitos no modelo $\kappa - \epsilon$ feitos especialmente na década de 90, sua aplicação na Engenharia do Vento ainda enfrenta muitas restrições (BRAUN, 2007; MURAKAMI, 1997).

Stathopoulos (1997) é taxativo ao dizer que o modelo $\kappa-\epsilon$ não é capaz de representar a formação de vórtices em uma aresta viva, justamente devido às intensas distorções nas linhas de corrente nesta região da estrutura.

O modelo de turbulência LES tem sido aplicado na EVC como uma alternativa ao tradicional modelo $\kappa-\epsilon$. Murakami (1997) afirma ser claro que o modelo LES conduz a resultados melhores do que o $\kappa-\epsilon$, apesar de possuir um custo computacional mais elevado. Semelhantemente, Piccoli (2009) menciona o elevado esforço computacional e afirma que o modelo LES é mais universal (no sentido em que aplica-se a diversos tipos de escoamento) e conduz a resultados mais próximos daqueles obtidos experimentalmente.

Os modelos LES são baseados no conceito de cascata de energia, que modela o escoamento turbulento como uma superposição de vórtices, o que é adequado para altos números de Reynolds. Os vórtices grandes retiram energia do escoamento principal e transferem-na para vórtices de uma escala menor, que por sua vez transportam a energia para vórtices de uma escala menor subsequente de forma sucessiva até chegar em uma escala pequena o suficiente onde a energia possa ser absorvida pelas forças viscosas do fluido (BRAUN, 2007). Em função do princípio que representa, o modelo de *Large Eddy Simulation* poderia ser traduzido de forma mais apropriada como Simulação de Grandes Vórtices (que constitui, inclusive, uma tradução literal) ao invés de Simulação de Grandes Escalas, como é apresentado tipicamente na literatura em português.

As grandes escalas no modelo são resolvidas através das equações de Navier-Stokes, enquanto as escalas menores do que as da ordem de grandeza dos elementos da malha devem ser resolvidos por um modelo de submalha. Braun (2007) afirma ser viável adotar modelos de turbulência mais universais para as pequenas escalas, já que nelas a turbulência tende a ser mais homogênea e isotrópica. O modelo de submalha tipicamente adequado para problemas de EVC é o modelo de Smagorinsky, conforme Piccoli (2009), Awruch, Braun e Greco (2015) e Braun (2007).

Para implementação matemática do modelo LES, é primeiro feita uma filtragem dos campos de velocidade e pressão do escoamento decompondo-os em uma parcela referente às grandes escalas e outra referente às pequenas:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i, \quad (3.38)$$

$$P = \bar{P} + P', \quad (3.39)$$

onde v_i indica a velocidade na direção i e P indica a pressão; o símbolo barra representa as grandes escalas e o apóstrofo representa as pequenas.

Aplicando esta decomposição às equações do problema de fluidos e desprezando os termos de submalha, tem-se:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i \bar{v}_j}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} \delta_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right\} = \frac{1}{\rho} \bar{X}_i, \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \rho c^2 \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad (3.41)$$

onde δ_{ij} são as componentes do delta de Kronecker, λ é a viscosidade volumétrica e X_i são as componentes das forças de campo.

Conforme proposto por [Braun \(2007\)](#), o termo advectivo pode ser aproximado por:

$$v_i \bar{v}_j = (\bar{v}_i \bar{v}_j + v'_i v'_j) \quad (3.42)$$

que, substituído nas equações de conservação do problema de fluidos, conduz a:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\delta_{ij}}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \bar{\tau}_{ij}^{SGS} \right\} = \frac{\bar{X}_i}{\rho}, \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \rho c^2 \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad (3.44)$$

sendo $\bar{\tau}_{ij}^{SGS}$ as componentes do tensor de tensões de submalha na equação de conservação de momento, que é expresso por:

$$\bar{\tau}_{ij}^{SGS} = \rho v_i \bar{v}_j. \quad (3.45)$$

Considerando o modelo de submalha de Smagorinsky, a viscosidade turbulenta μ_t é dada por:

$$\mu_t = \rho (C_s \bar{\Delta})^2 |S|, \quad (3.46)$$

$$|S| = (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}}, \quad (3.47)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right), \quad (3.48)$$

onde C_S é a constante de Smagorinsky, com valores entre 0,1 e 0,25 (MURAKAMI, 1997), $\bar{\Delta}$ é a dimensão característica do filtro de escalas e \bar{S}_{ij} são as componentes do tensor taxa de deformação.

4 MÉTODO

Para analisar os efeitos do vento nas edificações considerando a influência da vizinhança, serão realizados ensaios computacionais que simulam o problema físico real. Para isso, será utilizado o módulo Fluid Flow (Fluent) do *software* comercial Ansys Workbench.

O programa de elementos finitos Ansys Workbench pertence a empresa ANSYS Inc. que é sediada nos Estados Unidos e conhecida por desenvolver programas de simulação de engenharia assistida por computador (Computer-aided engineering, CAE) nas áreas de análise estrutural, fluidodinâmica computacional (Computational fluid dynamics, CFD), termodinâmica, eletromagnetismo, acústica, dentre outros. A escolha deste software se deu por ser amplamente difundido e respeitado entre os profissionais e pesquisadores na área de engenharia e também pelo conhecimento prévio que o autor possui desta ferramenta por tê-la utilizado em trabalhos anteriores.

Além disso, um fator determinante na escolha foi a facilidade de acesso à uma licença gratuita, visto que o ANSYS, Inc. disponibiliza uma versão educacional do programa em seu sítio eletrônico (<http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>), o que viabilizou a execução dos ensaios.

O Ansys Workbench é um *software* multifísico que integra diversos plugins para os diferentes tipos de simulações. Para a modelagem do fluido, este trabalho utilizou o plugin Fluid Flow (Fluent). O programa também inclui dois *softwares* CAD (desenho assistido por computador), o DesignModeler e o SpaceClaim, e um *software* para geração de malha, o Mechanical.

Os ensaios foram realizados em um dos computadores do Laboratório de Mecânica Computacional (LAMEC) da Universidade Estadual de Feira de Santana. O equipamento utilizado possui processador Intel(R) Core(TM) i7 3.40 GHz, Windows Seven, 24 Gb de RAM e GPU NVIDIA GeForce GT730. O poder de processamento disponível não foi o ideal, tornando algumas análises lentas, mas não impediu o desenvolvimento satisfatório do trabalho.

De acordo com Maliska (2004), a solução de problemas de engenharia possui, de uma forma geral, três ferramentas disponíveis:

1. Métodos analíticos;

2. Modelagem e simulação computacional; e
3. Experimentos físicos em laboratório.

As soluções analíticas são limitadas a casos muitos simples, tendo sua aplicação bastante restrita. Por outro lado, os experimentos físicos possuem também suas limitações (no caso dos túneis de vento, discutidas na seção 2.5) sendo a principal delas o alto custo dos ensaios. A abordagem deste trabalho, portanto, consiste em, através do *software* mencionado, analisar o escoamento do vento em torno de estruturas por meio de simulação computacional.

Maliska (2004) alerta para dois erros possíveis de se incorrer na aplicação de soluções numéricas: o primeiro são os erros numéricos propriamente ditos, resultantes da solução inadequada do modelo matemático; e o segundo são os erros de natureza física, quando o modelo matemático, embora resolvido do forma correta, não representa corretamente o fenômeno real. Para evitar o primeiro erro, deve-se fazer a validação numérica, comparando os resultados com outras soluções já conhecidamente corretas e, para evitar o segundo, deve-se fazer a validação física, que exige também a comparação dos resultados com dados balizadores, além da análise do aspecto qualitativo da solução tendo em vista os fenômenos esperados pela física do problema.

A primeira etapa da modelagem consistiu, portanto, em ensaios de validação para garantir acurácia do modelo implementado no *software*. Para isso, foram replicados ensaios realizados por outros autores e já publicados na literatura técnica para balizamento do resultados obtidos com o Ansys. Os ensaios foram escolhidos em grau crescente de complexidade, desde escoamentos bidimensionais em torno de um cilindro até edificações rombudas tridimensionais com efeito de vizinhança. Os detalhes da modelagem e resultados de cada um destes ensaios estão descritos no capítulo 5.

Além de garantir a acurácia da modelagem utilizada, o processo de validação contribui para ratificar a possibilidade de se utilizar ferramentas da EVC em estruturas reais ao apresentar resultados coerentes com o esperado pela literatura; assim, a obtenção de resultados semelhantes através de métodos distintos solidifica a confiabilidade nos métodos numérico-computacionais

Na segunda etapa foram realizados ensaios novos nos quais o trabalho analisa a influência de edifícios vizinhos em determinada estrutura. Para isso, a estrutura proposta é primeiro ensaiada em sua condições isolada tanto no modelo aerodinâmico, como no modelo aeroelásticos. Feito isso, são propostas diferentes condições de vizinhança nas quais a mesma estrutura é avaliada. Os detalhes da modelagem e resultados de cada um destes ensaios estão descritos no capítulo 6.

Através dos ensaios com novas configurações de vizinhança propostas por esse trabalho, contribui-se com o banco de dados disponível na literatura da EVC sobre influência

de edificações vizinhas nas pressões de vento, tendo em vista as muitas possibilidades de variação de vizinhança e a conseqüente necessidade de novos estudos nesse sentido. Apesar do grande interesse recente na EVC, [Thordal, Bennetsen e Koss \(2019\)](#) afirmam ser ainda necessários extensos estudos na EVC, tendo em vista seu caráter relativamente jovem.

A modelagem dos ensaios apresentados nos capítulos subsequentes é baseada nas equações expostas no capítulo 3, que são implementadas no código do Fluid Flow (Fluent). O software resolve o problema de escoamento de vento através das equações de Navier-Stokes e da equação de conservação da massa de forma numérica pelo método dos volumes finitos. Em todos os casos tridimensionais, utiliza-se o modelo de turbulência LES com o modelo de submalha de Smagorinsky-Lily, o que torna a resolução do problema computacionalmente viável.

5 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

5.1 CILINDRO 2D $Re = 40$

O primeiro exemplo estudado foi o de um cilindro de 1,0 metro de diâmetro submetido ao escoamento laminar transiente bidimensional de um fluido viscoso com número de Reynolds igual a 40. A Figura 5.1 mostra a geometria do problema e sua respectiva malha.

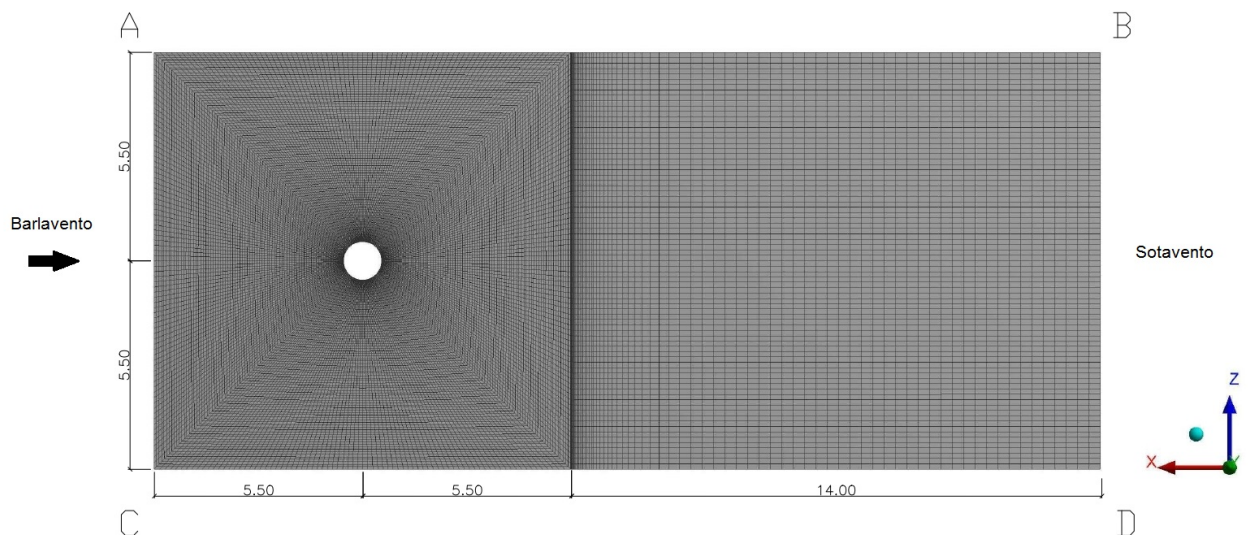


Figura 5.1 – Domínio do fluido em torno do cilindro 2D. Dimensões em metros

A face AC foi definida como a entrada do fluido com velocidade uniforme e a face BD foi definida como a saída com pressão relativa nula, de modo a não interferir com a esteira do escoamento. As faces AB e CD foram definidas como paredes com condição de contorno de deslizamento livre (cisalhamento nulo). Esta condição, embora não seja real, tem como objetivo reduzir a influência das paredes e simular a estrutura em um local sem obstáculos, como seria o caso de construção real em local aberto. A superfície do cilindro foi modelada como uma parede rígida com condição de não deslizamento, o que impõe uma velocidade tangencial nula em todo o seu perímetro, condição esta que reflete bem o comportamento real do escoamento no contorno.

A geometria foi definida como elemento de superfície (condição de simetria ao

longo de Y) e a malha de elementos de volumes finitos utilizada contém 30.257 nós, 29.870 elementos, sendo mais refinada em torno do cilindro com elementos da ordem de 1,0 cm. A geração da malha foi feita de forma distinta em duas áreas, porém de forma contínua (não havendo barreiras entre estas), como pode ser verificado na Figura 5.1, para garantir um refinamento sucessivamente maior nas regiões mais próximas da estrutura, onde ocorre a formação de vórtices e, eventualmente, a separação da camada limite. Na região mais distante da esteira, os vórtices que eventualmente se formam possuem dimensões maiores e não exigem um refinamento tão apurado. A malha foi devidamente verificada e atendeu ao propósito de validação do ensaio.

A Tabela 5.1 apresenta as propriedades do escoamento utilizado na simulação. Os dados físicos, geométricos e a organização da malha deste problema foram replicados de Braun (2007), sendo que a malha utilizada pelo autor contou com 13.980 nós e 6.800 elementos, com dimensões também da ordem de 1,0 cm junto à superfície do cilindro.

Tabela 5.1 – Propriedades do escoamento - $Re = 40$

Massa específica	1,0 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	0,25 Ns/m ²
Velocidade de entrada	10,0 m/s
Dimensão característica (diâmetro)	1,0 m
Passo de tempo	1,8 × 10 ⁻³ s

Para validação do modelo, foram calculados os coeficientes de pressão C_p no perímetro do cilindro pela equação (5.1) e comparados por aqueles obtidos por Braun (2007), que por sua vez, comparou seus resultados com Wanderley e Levi (2002). Também foram considerados para comparação os coeficientes de pressão previstos na NBR 6123 para uma edificação cilíndrica. Porém, é imprescindível apontar que a norma restringe a aplicação destes coeficientes a escoamentos com número de Reynolds superior a $4,2 \times 10^5$, bem diferente do número em questão. Além disso, o texto normativo modela o vento como uma ação estática, diferente da simulação dinâmica realizada neste ensaio. Não obstante, os valores são considerados e devem ser avaliados com cautela.

$$C_p = \frac{P}{q} \quad (5.1)$$

onde

P : pressão em cada ponto do perímetro

q : sobrepessão calculada pela equação (2.14) com $v_k = 10,0 \text{ m/s}$

Braun (2007) ensaiou o escoamento sobre o cilindro desenvolvendo um código numérico-computacional implementado através do Método dos Elementos Finitos. O autor utilizou dois métodos para a discretização temporal do escoamento: o método explícito de 2 passos e o método explícito-iterativo, que, neste caso, levaram a resultados

aproximadamente iguais. Wanderley e Levi (2002) também utilizaram um método numérico-computacional, o esquema implícito Beam-Warming, porém resolvido pelo Método das Diferenças Finitas.

A Figura 5.2 apresenta os resultados dos coeficientes de pressão. O gráfico é dado em função do ângulo em relação ao eixo horizontal X com o ponto zero no ponto de estagnação a barlavento. Apesar de a análise do problema ser transiente, o mesmo converge para a solução estacionária que é reproduzida aqui. A análise foi feita por 18,0 segundos, mas a solução estacionária já foi obtida com aproximadamente 4,0 segundos após o início do escoamento.

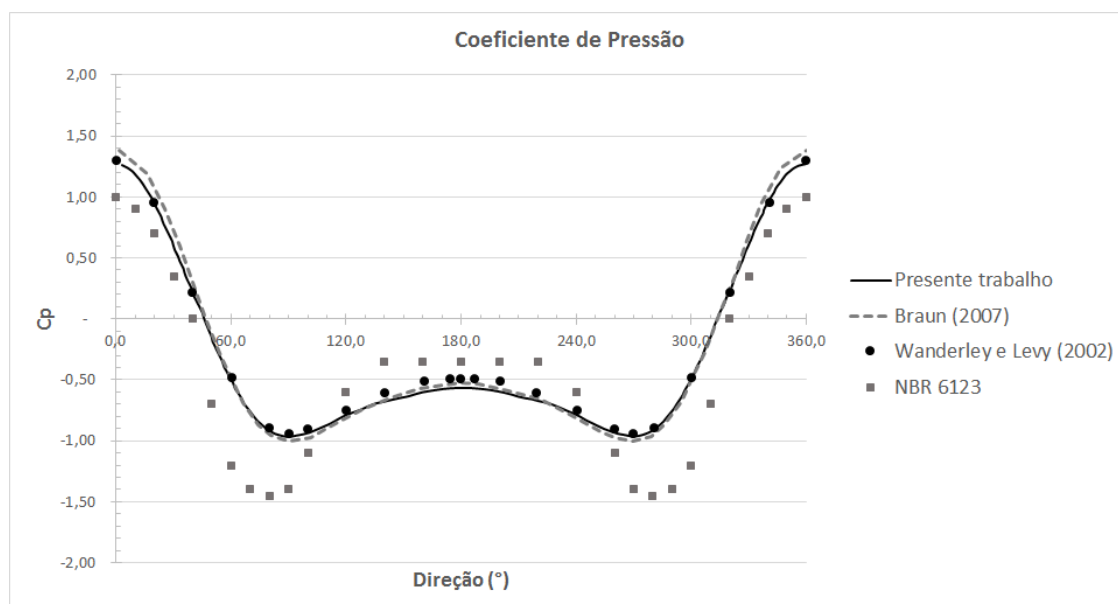


Figura 5.2 – Coeficientes de pressão em torno do cilindro com escoamento $Re = 40$

A análise do gráfico de coeficientes de pressão mostra boa concordância dos resultados do presente trabalho com aqueles de Braun (2007) e Wanderley e Levi (2002). É válido observar que os três resultados mencionados foram obtidos por métodos diferentes, o que ratifica a precisão das ferramentas da EVC. Os coeficientes obtidos da norma apresentam alguma divergência com os demais nas regiões de maior sucção, entre 50° e 100° , o que é explicado pela já mencionada diferença no número de Reynolds; ainda assim, percebe-se que a ordem de grandeza e a forma da curva dos coeficientes da norma mantém relativa semelhança com os demais resultados.

A Figura 5.3 mostra o campo de pressão obtido através do Ansys e as Figuras 5.4 e 5.5 mostram as linhas de corrente do domínio total e com zoom no entorno do cilindro, respectivamente, obtidas na análise. O campo de pressão neste caso (e, conseqüentemente, os coeficientes de pressão) converge para uma solução estacionária por causa do baixo número de Reynolds e superfície suave do cilindro, o que torna o escoamento mais simples e previsível.

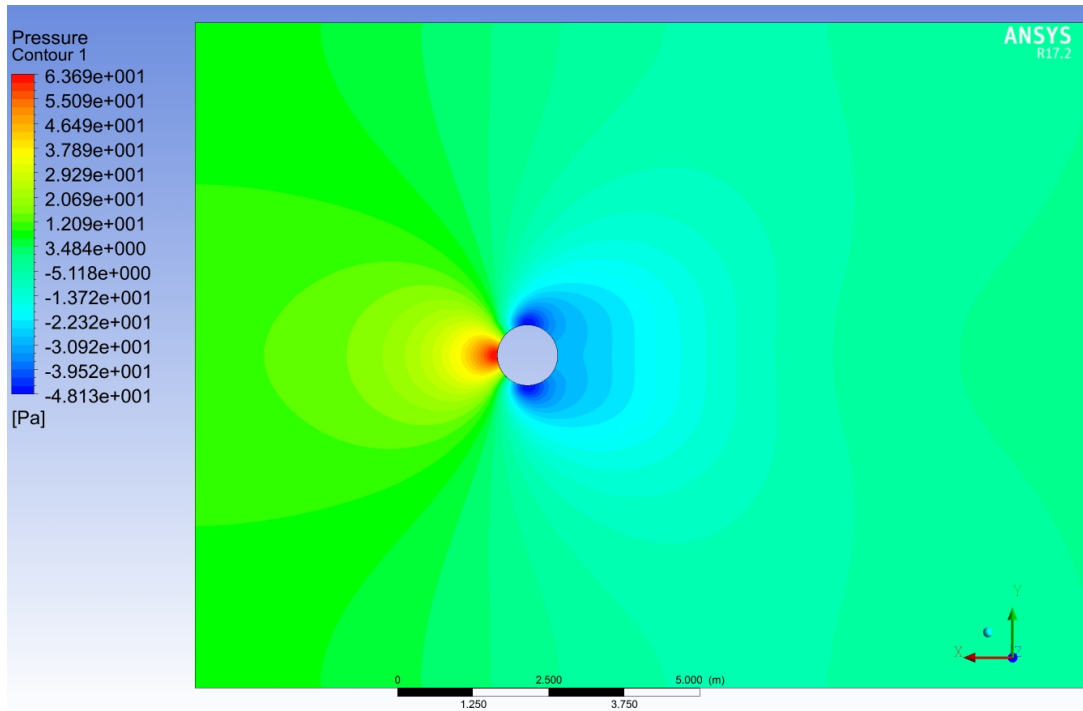


Figura 5.3 – Campo de pressão em torno do cilindro durante resposta estacionária

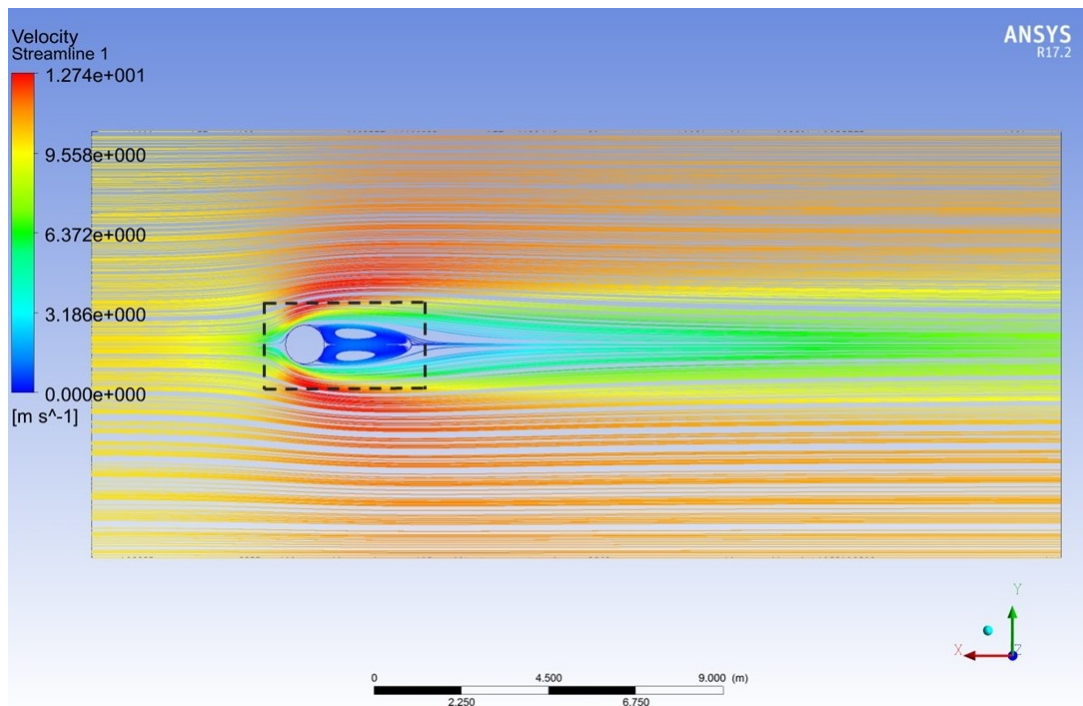


Figura 5.4 – Linhas de corrente em torno do cilindro durante resposta estacionária

Através do campo de pressão e das linhas de corrente, percebe-se a formação de dois vórtices estáveis e simétricos na região à sotavento do cilindro, constituindo uma esteira permanente, que só é possível devido ao baixo número de Reynolds, relacionado à viscosidade relativamente alta do fluido analisado. Um aumento do número de Reynolds

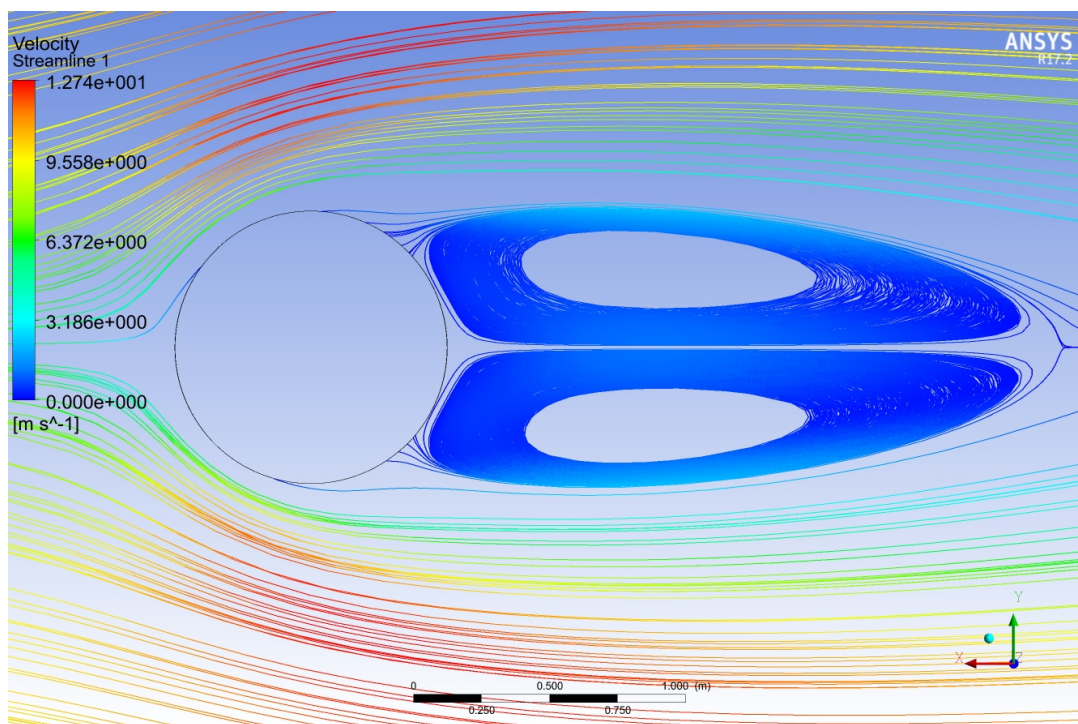


Figura 5.5 – Linhas de corrente com zoom na região indicada na figura anterior

(através do aumento da velocidade ou diminuição da viscosidade, por exemplo) eventualmente comprometeria a estabilidade e simetria dos dois vórtices, fazendo-os se separarem da superfície do cilindro; se o número de Reynolds fosse suficientemente menor, seria verificada aderência do escoamento à estrutura, sem a formação da região de recirculação.

5.2 CILINDRO 2D $Re = 10^3$

Também foi ensaiado o mesmo caso do cilindro anterior, porém com número de Reynolds igual a 10^3 . A geometria, malha e condições de contorno utilizadas foram as mesmas da Figura 5.1, alterando-se apenas a viscosidade do fluido, conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Propriedades do escoamento - $Re = 10^3$

Massa específica	1,0 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	0,01 Ns/m ²
Velocidade de entrada	10,0 m/s
Dimensão característica (diâmetro)	1,0 m
Passo de tempo	1,8 × 10 ⁻³ s

Neste caso, a solução é transiente, sem convergência em uma resposta estacionária. A análise foi feita por 18,0 segundos, sendo que a solução plenamente desenvolvida foi atingida com cerca de 6,0 segundos. Os coeficientes de pressão foram calculados pela

equação (5.1), mas agora tomados como valores médios ao longo do tempo no escoamento já desenvolvido. Assim como no caso anterior, os coeficientes de pressão foram comparados com os resultados de Braun (2007) e da NBR 6123. A Figura 5.6 apresenta estes resultados. Note-se, que neste caso, os dois métodos utilizados por Braun (2007) conduziram a resultados diferentes e foram reproduzidos no gráfico comparativo.

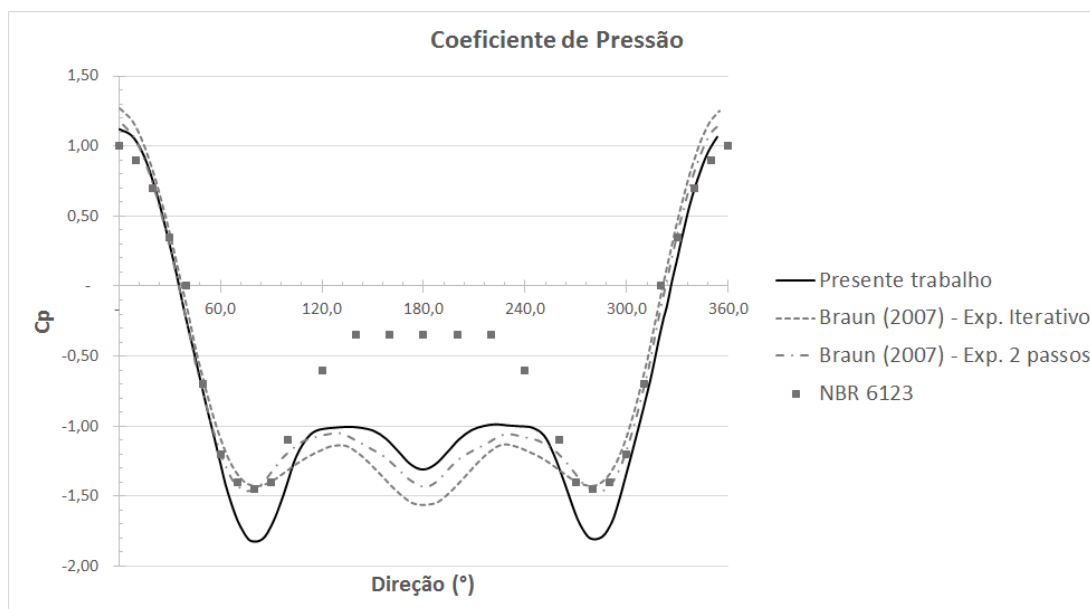


Figura 5.6 – Coeficientes de pressão em torno do cilindro com escoamento $Re = 10^3$

A análise dos coeficientes de pressão mostra um pico de diferença de 17% entre os valores do presente trabalho e aqueles obtidos por Braun (2007) na região de maior sucção, em aproximadamente 75° , o que resulta dos diferentes procedimentos numéricos adotados; nas demais regiões, é verificada boa concordância entre os coeficientes. No caso da NBR 6123, novamente verificou-se discordâncias consideráveis, mas agora na região entre 110° e 250° ; como no caso anterior, a divergência é explicada pela grande diferença no número de Reynolds do presente trabalho para aquele considerado na norma.

Também foram obtidos o campos de pressão e as linhas de corrente em torno do cilindro, como mostram as Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente, em um dado instante do escoamento desenvolvido.

Como previsto anteriormente, devido ao número de Reynolds elevado, as Figuras 5.7 e 5.8 mostram a formação de vórtices de von Kármán, que são desprendidos alternadamente excitando a estrutura na direção transversal ao escoamento do vento. Em estruturas reais como torres cilíndricas, chaminés e cabos, esta excitação tende a provocar oscilações laterais (em relação ao escoamento) que podem provocar grandes deslocamentos e até danos à edificação.

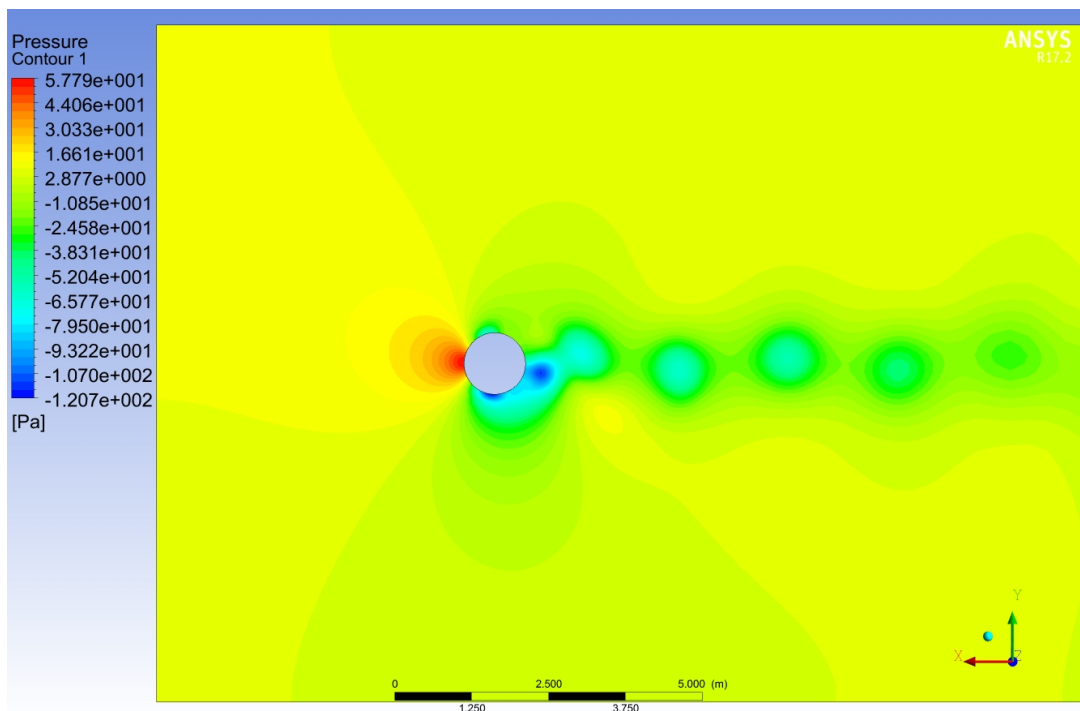


Figura 5.7 – Campo de pressão instantâneo em torno do cilindro

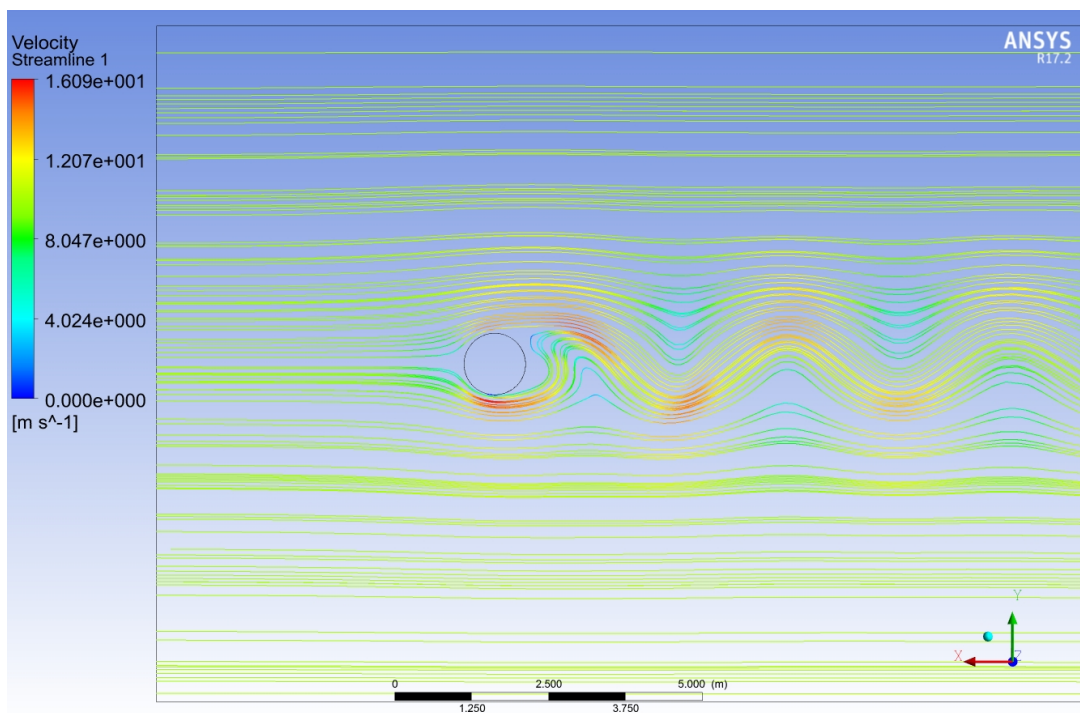


Figura 5.8 – Linhas de corrente em torno do cilindro num dado instante

5.3 VIGA ENTRE DOIS CONDUTOS

O caso de dois condutos de escoamento forçado separados por uma viga submetida às pressões exercidas pelo fluido foi analisado utilizando interação fluido-estrutura *one way* de forma estática. A Figura 5.9 mostra o domínio do fluido e sua respectiva malha de volumes finitos, que conteve 520.091 nós e 457.000 elementos e mostrou-se bastante refinada, mas, como foi aplicada a um ensaio estático, não ofereceu custo computacional significativo.

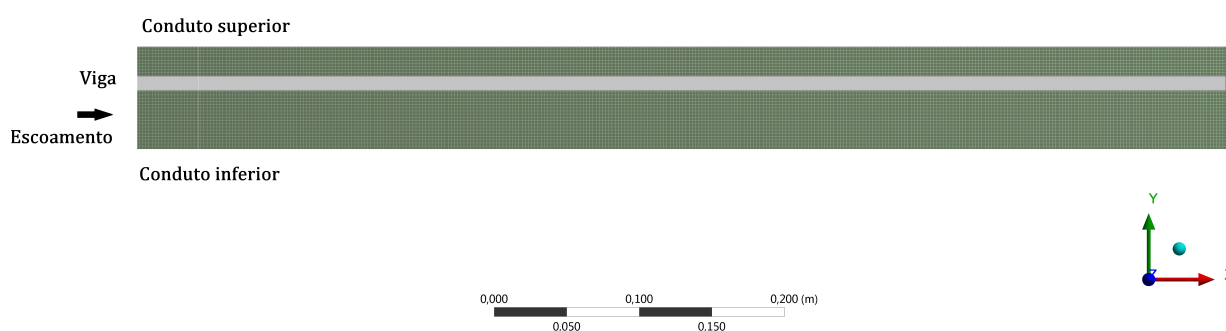


Figura 5.9 – Domínio do fluido em torno da viga

O conduto superior possui 2,0 cm de altura, o inferior 4,0 cm de altura e a viga (indicada em cinza) possui 75,0 cm de comprimento, como mostra Figura 5.9. As faces à esquerda foram definidas como entrada do fluido com velocidade uniforme igual a 0,008 m/s e a face à direita foi definida como saída com pressão relativa nula. As demais faces no plano XY foram todos modeladas com condição de contorno de não deslizamento, portanto, com velocidade tangencial nula. A análise foi implementada utilizando elementos tridimensionais, com 1,0 cm de espessura, mas impondo-se uma condição de simetria ao longo de Z.

A análise foi feita de forma estática com os parâmetros do escoamento laminar apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Propriedades do escoamento - Viga entre dois condutos

Massa específica	997,0 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	8,899 × 10 ⁻⁴ Ns/m ²
Velocidade de entrada	0,008 m/s

A Figura 5.10 mostra o campo de velocidade em torno da viga e a Figura 5.11 apresenta o perfil de velocidade na direção do escoamento nos condutos superior e inferior. Os perfis constituem uma distribuição de velocidades aproximadamente parabólica, como previsto pela Lei da Viscosidade de Newton.

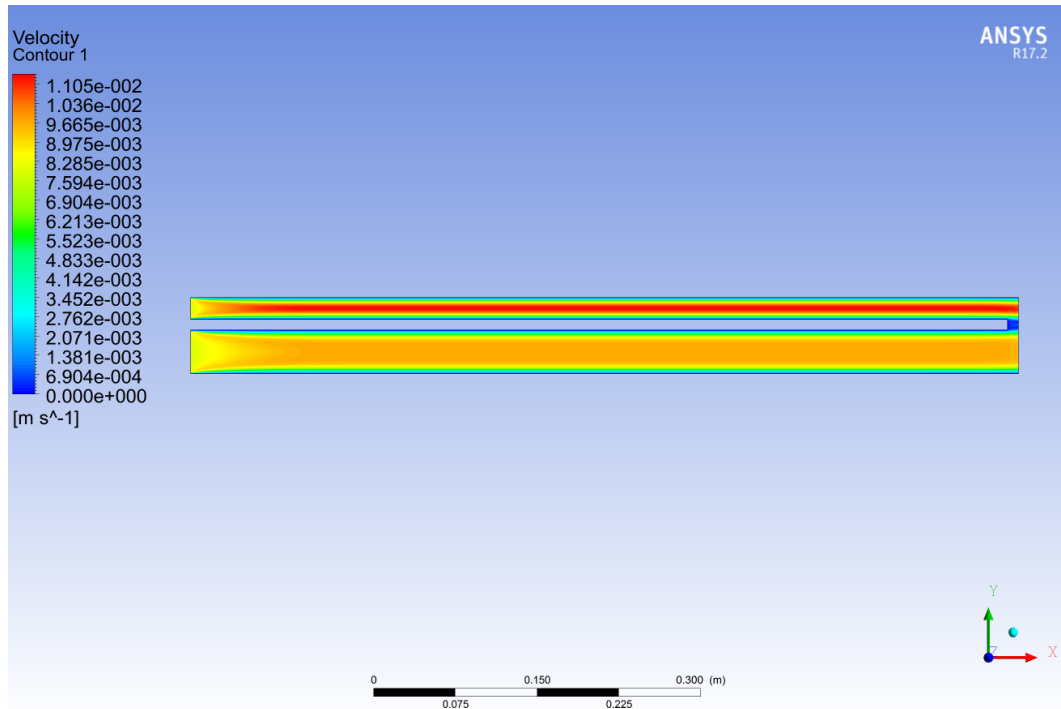


Figura 5.10 – Campo de velocidade em torno da viga

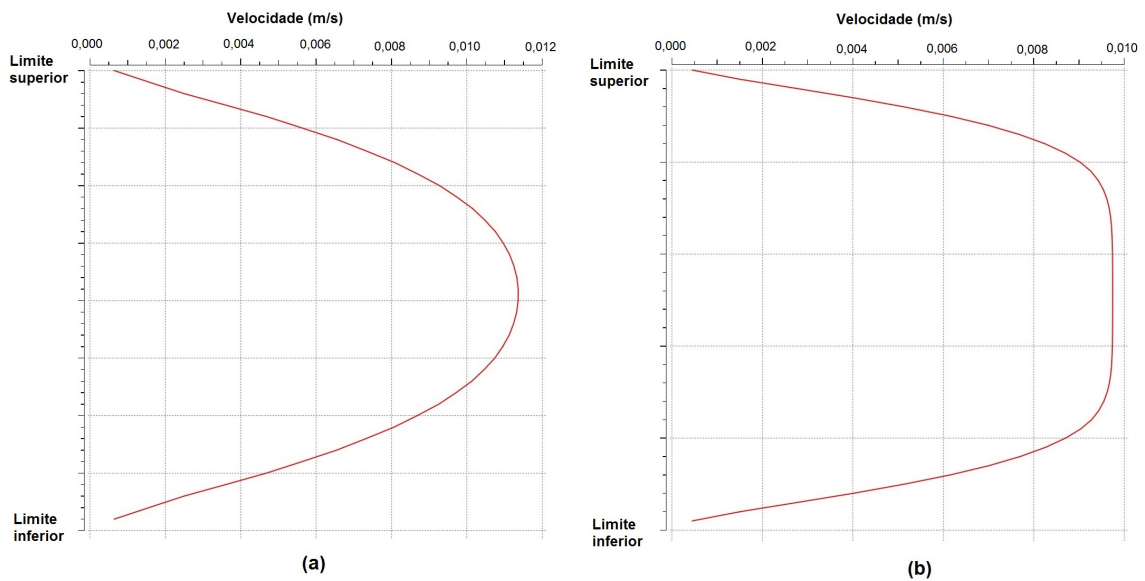


Figura 5.11 – Perfil de velocidade no (a) conduto superior e (b) conduto inferior

A Figura 5.12 mostra o campo de pressão em torno da viga. Como pode-se perceber, a geometria dos condutos faz surgir um gradiente de pressão que, quando transferido para a viga, tende a deformá-la para baixo.

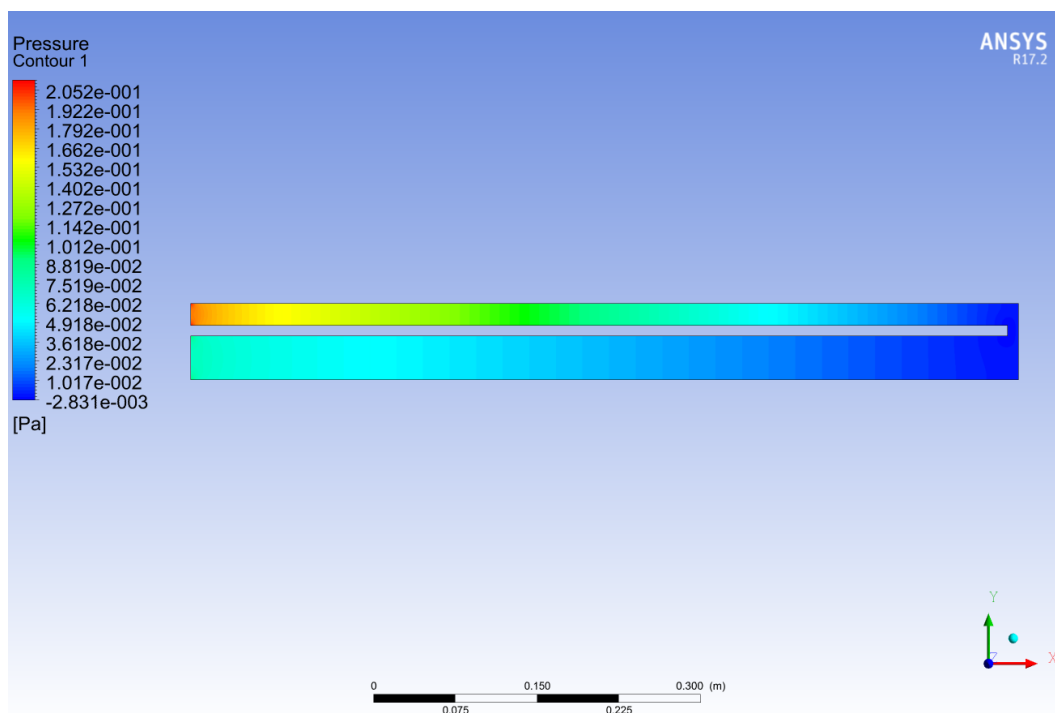


Figura 5.12 – Campo de pressão em torno da viga

Assim, foi feita a análise de interação fluido-estrutura *one way*. As pressões obtidas na simulação do fluido foram importadas para o plugin Static Structural, também dentro do Ansys Workbench, onde foi feita a análise de deformação da viga. A Tabela 5.4 mostra os parâmetros da estrutura.

Tabela 5.4 – Propriedades da viga

Módulo de elasticidade	$2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0,3
Espessura	1,0 cm
Comprimento	75,0 cm

A Figura 5.13 apresenta as pressões transferidas do fluido para a viga no processo de interação entre os domínios.

A viga foi engastada em sua face na extremidade esquerda e foram calculadas suas deformações ao longo do seu comprimento, considerando-a como um elemento de elasticidade tridimensional. Os deslocamentos foram comparados com Menter et al. (2006), que analisaram o mesmo problema através do *software* Fluid Flow (CFX), também da plataforma Ansys Workbench, e que também validou seus resultados com a solução analítica do problema, desenvolvida por Wang (1999). A Figura 5.14 mostra os resultados obtidos nesta análise.

Os deslocamentos obtidos apresentam boa concordância, com uma diferença máxima na extremidade da viga de 5% entre o presente trabalho e o de Menter et al. (2006). Embora

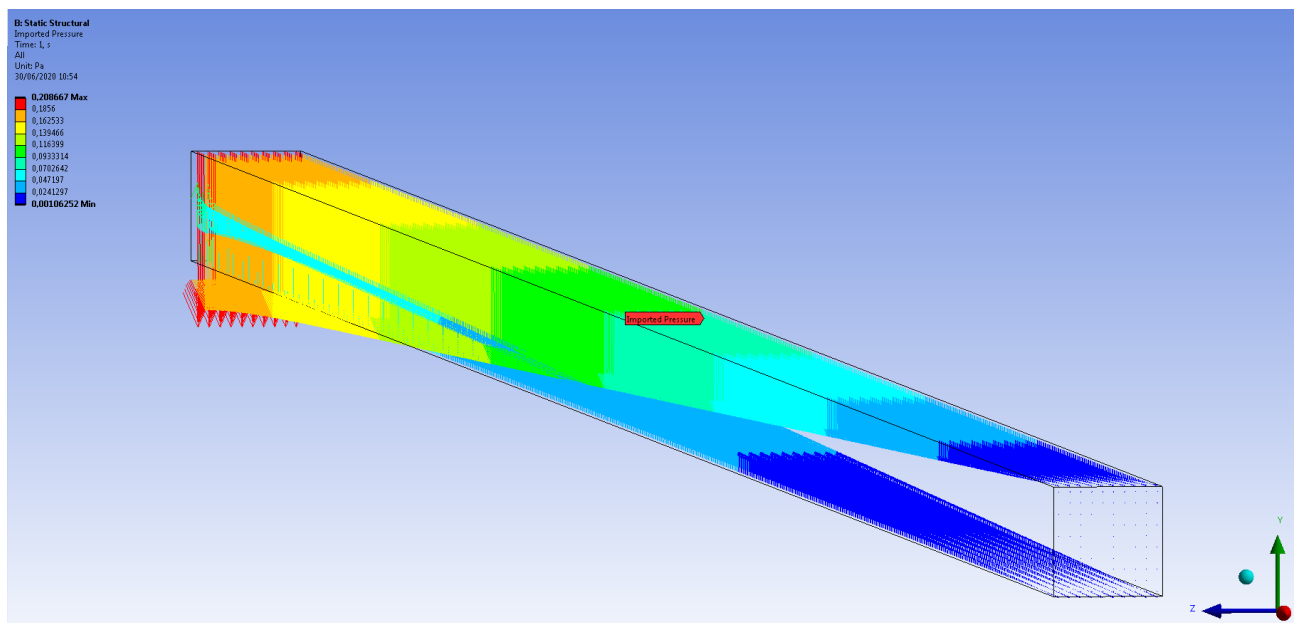


Figura 5.13 – Pressões aplicadas na viga pela ação do fluido. Modelo em perspectiva

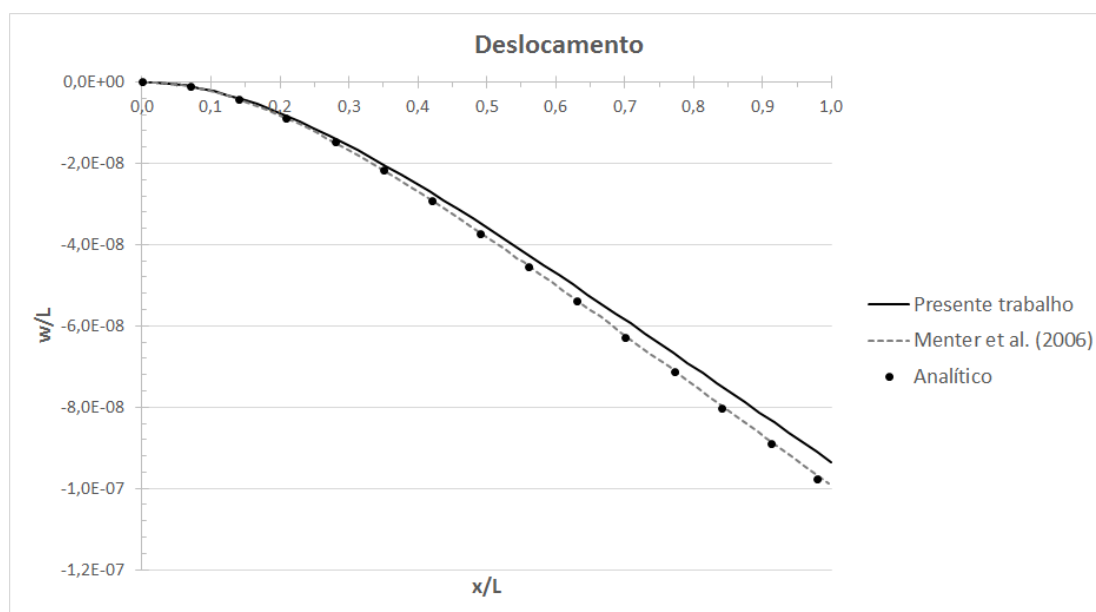


Figura 5.14 – Deslocamentos ao longo do comprimento da viga

Menter et al. (2006) não apresentem em seu trabalho o elemento que usaram para modelar a viga, pode-se inferir, a julgar pela concordância quase perfeita com o resultado analítico obtido para uma viga elástica unidimensional, que os autores usaram também um modelo linear, diferente do modelo de elasticidade implementado neste trabalho. Esta consideração na modelagem da viga explica a diferença verificada, mas não compromete a validação do ensaio.

5.4 EDIFÍCIO ALTO ISOLADO

Para validar o método utilizado neste trabalho aplicado a um caso tridimensional, foi replicada a análise transiente de um edifício vertical isolado realizada por Braun (2007). O autor utilizou o código implementado em sua tese de doutorado e validou seus resultados com Akins, Peterka e Cermak (1977), que primeiro ensaiaram um protótipo do modelo reduzido no túnel de vento do Laboratório de Dinâmica dos Fluidos e Difusão da Universidade do Estado do Colorado (EUA). A Figura 5.15 apresenta a geometria do edifício e do domínio do fluido:

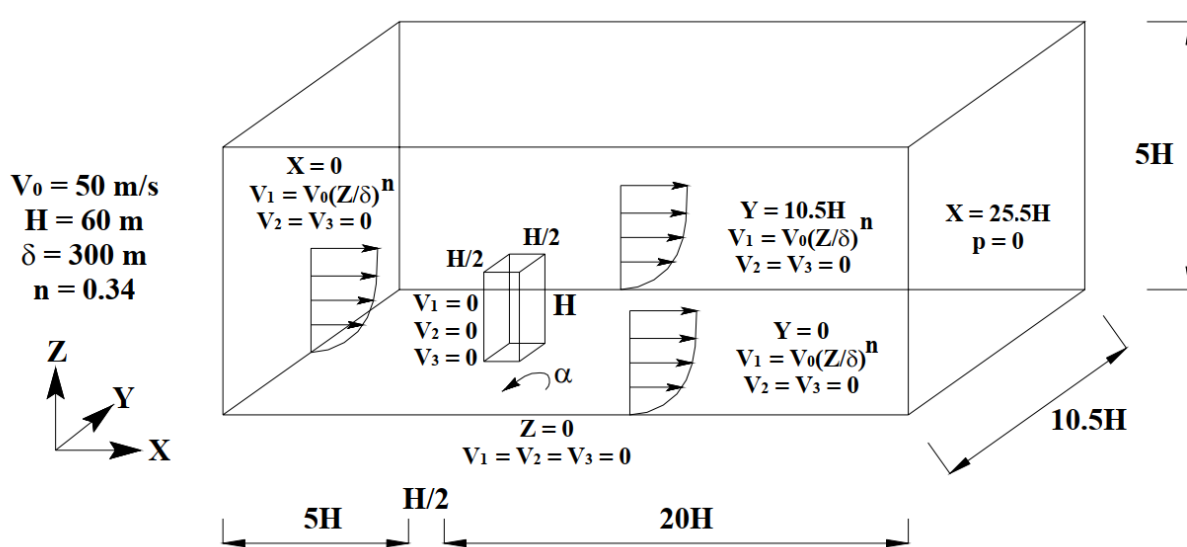


Figura 5.15 – Características geométricas do escoamento. Fonte: Braun (2007) (adaptado)

Como verifica-se na Figura 5.15, o edifício possui seção retangular com esbelteza igual a 2 (dimensão vertical/menor dimensão horizontal). A face à esquerda do domínio do fluido consiste na entrada do escoamento e a face à direita em uma saída livre com pressão relativa nula. Os limites laterais e superior do domínio do fluido foram modelados como condições de contorno com livre deslizamento, o que simula a situação do edifício em um local aberto, como de fato acontece na edificação real. O limite inferior (solo) e as paredes do edifício foram modeladas como faces de deslizamento nulo, onde a velocidade tangencial do fluido no contato é nula.

O vento na entrada foi modelado pela lei de potência já apresentada anteriormente na equação (2.1). Substituindo-se os valores de referência, o vento em função da altura neste ensaio é dado pela equação (5.2):

$$v_{entrada}(z) = 50 \cdot \left(\frac{z}{300}\right)^{0,34} \quad (5.2)$$

Para entrada das velocidades no Fluid Flow (Fluent), o perfil de velocidades foi escalonado, como mostra a Figura 5.16, que apresenta o gráfico do perfil de vento natural e simulado.

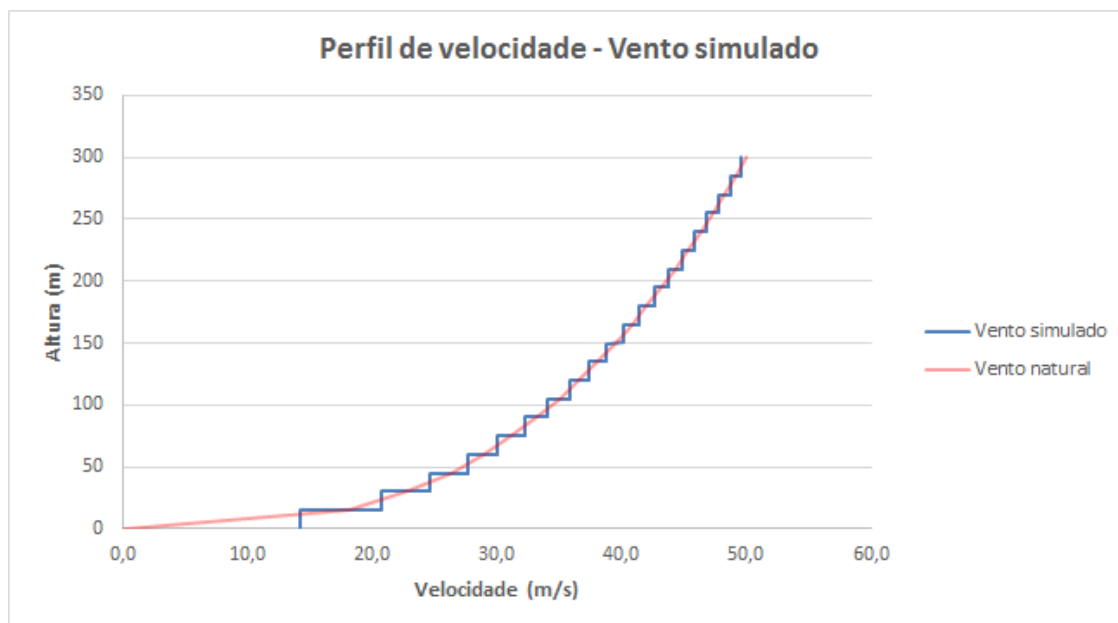


Figura 5.16 – Perfil do vento na entrada

A malha de elementos finitos utilizada teve 42.139 nós e 231.274 elementos e está apresentada na Figura 5.17. Após alguns testes realizados, verificou-se possível diminuir o volume de controle utilizado por Braun (2007) sem prejuízo dos resultados da análise. Ao invés de utilizar 1.530 m na direção x (conforme Figura 5.15), utilizou-se 930 m, o que tornou a análise mais rápida.

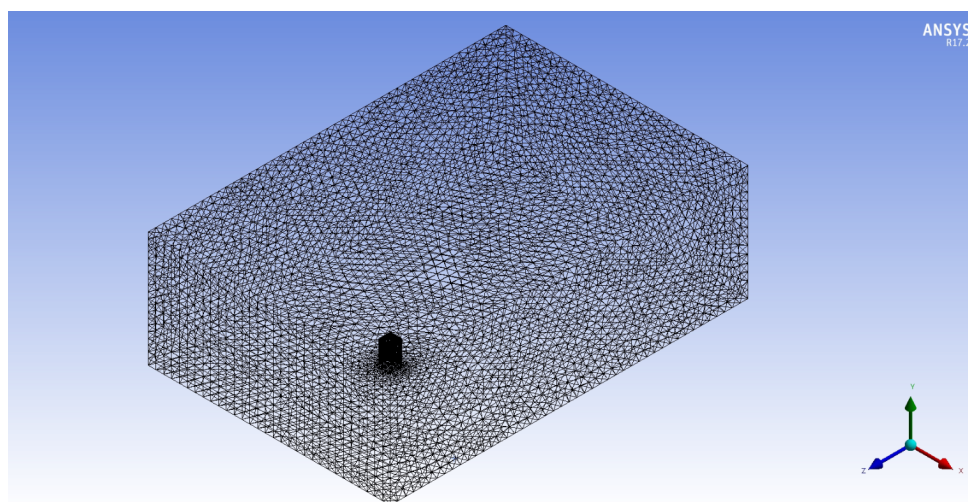


Figura 5.17 – Malha do edifício isolado

A Tabela 5.5 apresenta as propriedades do escoamento simulado replicadas de Braun (2007) e Akins, Peterka e Cermak (1977). Para modelagem da turbulência, utilizou-se o modelo LES e o modelo de escala da submalha Smagorinsky-Lily com $C_s = 0,1$.

Tabela 5.5 – Propriedades do escoamento - Edifício isolado

Massa específica	1,25 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	6,96 × 10 ⁻³ Ns/m ²
Velocidade característica	27,56 m/s
Dimensão característica (lado do edifício)	30,0 m
Passo de tempo	5 × 10 ⁻³ s

Os resultados obtidos foram comparados em termos de coeficientes de força e momento dados pelas equações a seguir, que são decorrentes da equação (2.16) deduzida a partir da equação de Bernoulli. Segue-se também a referência da Figura 5.18 utilizada por Braun (2007).

$$CF_x = \frac{F_x}{q.HW} \quad (5.3)$$

$$CF_y = \frac{F_y}{q.HL} \quad (5.4)$$

$$CF_z = \frac{F_z}{q.WL} \quad (5.5)$$

$$CM_x = \frac{M_x}{q.H^2L} \quad (5.6)$$

$$CM_y = \frac{M_y}{q.H^2W} \quad (5.7)$$

$$CM_z = \frac{M_z}{q.HLW} \quad (5.8)$$

onde

F_i : força resultante na direção i

M_i : momento resultante na direção i

q : sobrepessão dada pela eq. (2.14)

H, W e L : dimensões dadas na Figura 5.18

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos neste trabalho e aqueles utilizados para validação. Na comparação, também foram incluídos os coeficientes de força obtidos pela NBR 6123, embora, como já afirmado, a norma estabeleça coeficientes com base na

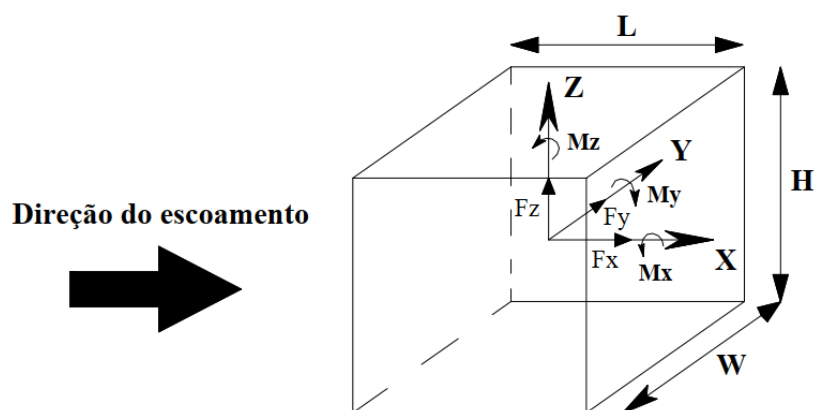


Figura 5.18 – Convenção para determinação dos coeficientes. Fonte: Braun (2007) (adaptado)

ação estática do vento. Os coeficientes de momento não são dados pela norma, portanto, só foram considerados coeficientes de força. Os índices dos coeficientes (x, y e z) estão de acordo com os eixos de referência dados na Figura 5.15.

Tabela 5.6 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício isolado

	P. trabalho	Braun (2007)	Akins, Peterka e Cermak (1977)	NBR 6123
CF_x	1,435	1,407	1,457	1,4
CF_y	0,047	0,012	0,009	0,0
CF_z	1,178	1,340	1,266	0,8
CM_x	0,018	0,000	0,000	NA
CM_y	0,824	0,874	0,829	NA
CM_z	0,011	0,024	0,000	NA

Os coeficientes calculados mostram boa concordância com os resultados dos demais autores. Na comparação, grandes diferenças relativas são verificadas nos coeficientes que possuem valor nulo ou próximo de nulo, isto é, CF_y , CM_x e CM_z ; por possuírem valores absolutos baixos, esses coeficientes são mais afetados por resíduos e erros numéricos inerentes aos processos iterativos. Analisando os erros em termos absolutos, verifica-se que estes não comprometem a validade dos ensaios. Os demais coeficientes, CF_x , CF_z e CM_y , mostraram-se satisfatórios na comparação com os demais autores apresentando apenas diferenças não significativas.

Os coeficientes da norma na direção do escoamento (CF_x) e na direção transversal ao mesmo (CF_y) mostraram-se coerentes com os demais resultados, porém divergências consideráveis, em torno de 50%, foram identificadas no coeficiente de força vertical (CF_z). Considerando que a norma calcula a ação estática equivalente à ação dinâmica do vento (como de fato acontece nos ensaios numéricos e em túnel de vento), diferenças nos resultados poderiam ser esperadas. Não obstante, a magnitude da divergência e seu valor inferior ao

obtido pelos demais métodos evidencia a limitação da norma e a necessidade de estudos mais aprofundados.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram os campos de pressão obtidos em planos distintos (vertical e horizontal, respectivamente). As Figuras 5.21 e 5.22 mostram as linhas de corrente.

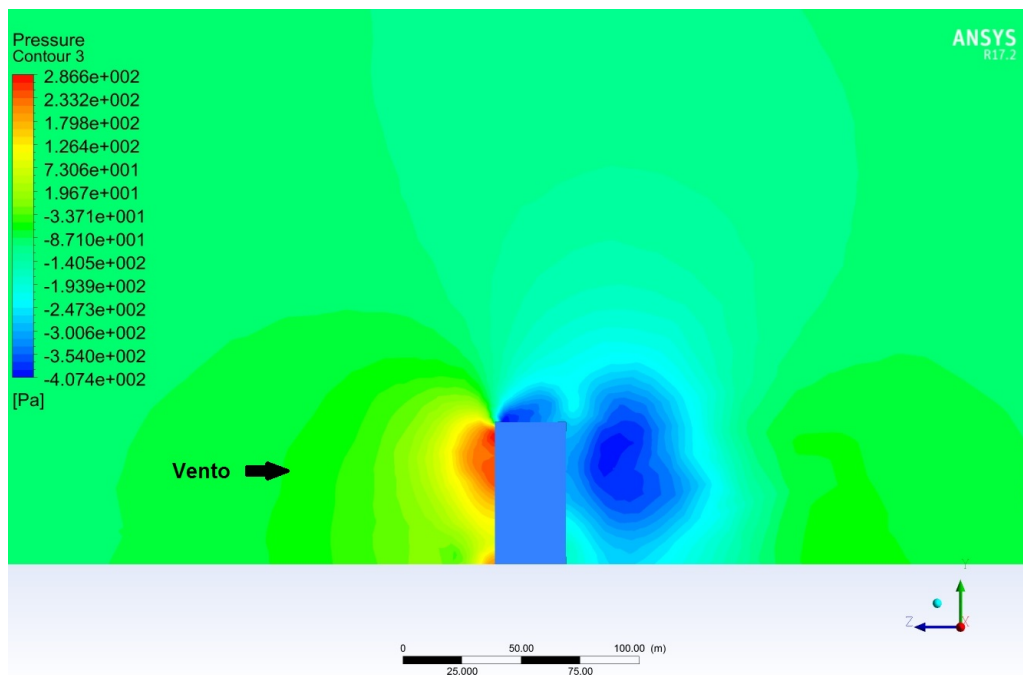


Figura 5.19 – Campo de pressão instantâneo - Plano vertical de simetria

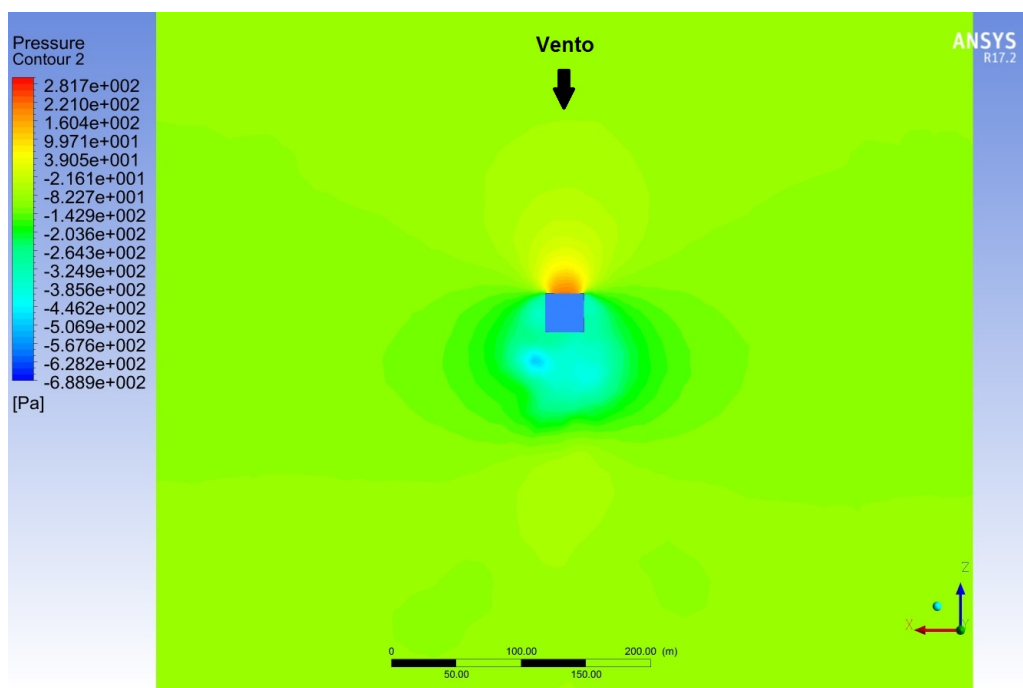


Figura 5.20 – Campo de pressão instantâneo - Plano horizontal a 30,0 m do solo

Ao analisar o campo de pressão no plano vertical, verifica-se que a sobrepressão mais intensa ocorre no topo da fachada a barlavento da edificação, onde a velocidade do vento é maior, e também que há um acréscimo local de pressão na base da edificação devido a deflexão vertical do vento, conforme esperado pela literatura e exposto na seção 2.2. Na cobertura da edificação (face horizontal no topo do prisma, equivalente à laje de cobertura), pode ser vista a região de separação da camada de fluido na aresta viva a barlavento, que gera uma região de recirculação de baixa pressão (conforme linhas de corrente na Figura 5.21). Na esteira, também está presente uma zona de baixa pressão, como é esperado para este tipo de escoamento.

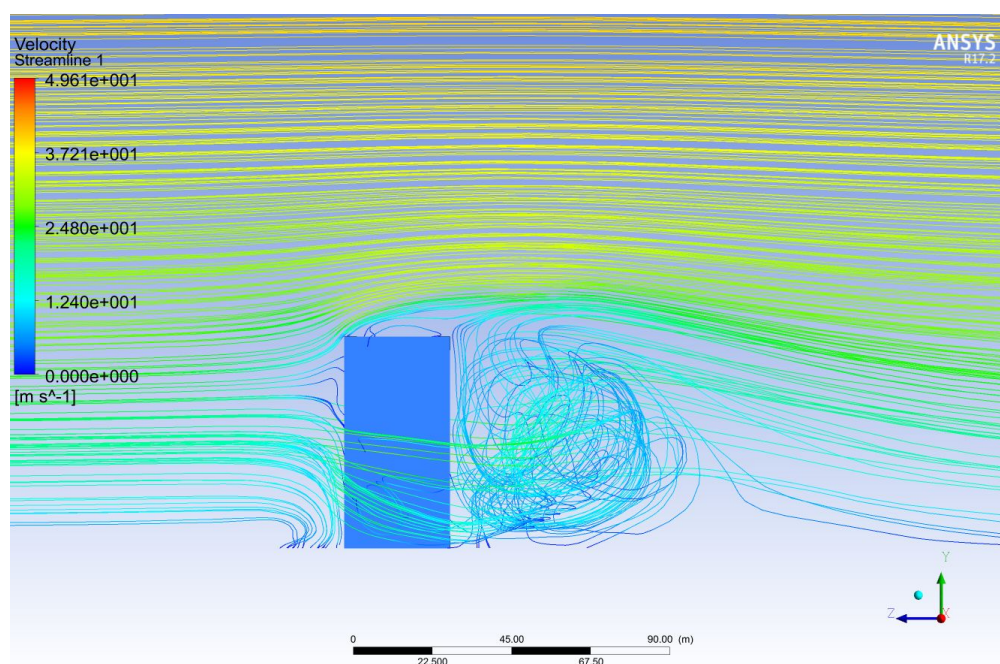


Figura 5.21 – Linhas de corrente instantâneas - Plano vertical de simetria

Analisando o campo de pressão através do plano horizontal, também é possível ver as sobrepressões mais intensas na fachada frontal e regiões de sucção a sotavento. Neste caso, a formação e desprendimento de vórtices são verificados na esteira do prisma, embora não sejam tão claros, uniformes e periódicos como no caso bidimensional (seção 5.2). Visto que a simulação é tridimensional, um corte feito exatamente na horizontal do campo de pressão não é capaz de representar os vórtices espaciais, mas seu efeito pode ser percebido nas sucções indicadas a sotavento da edificação.

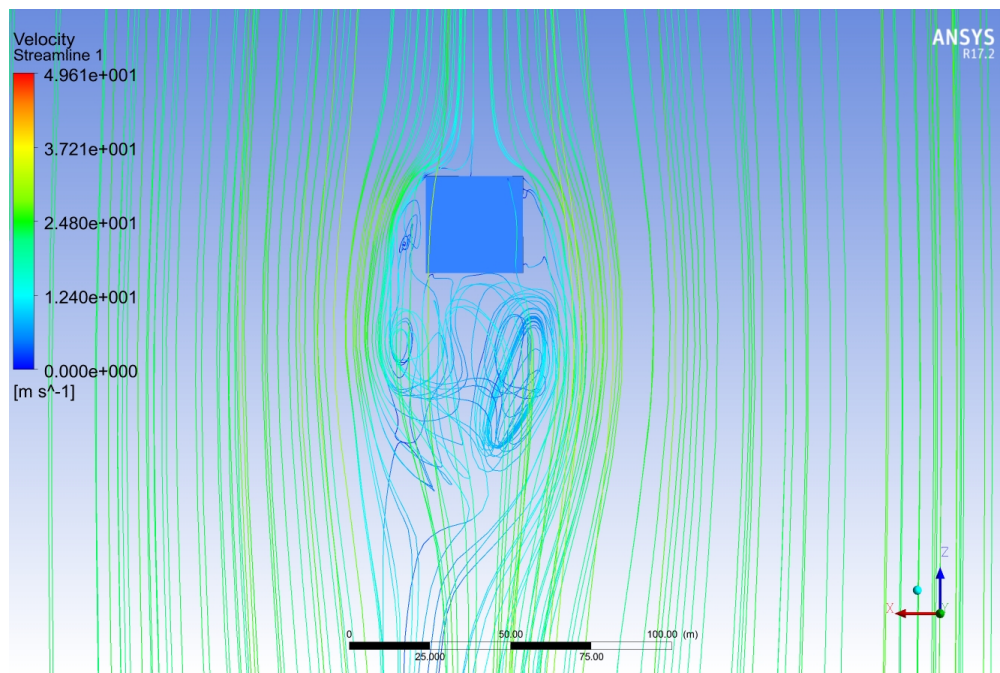


Figura 5.22 – Linhas de corrente - Plano horizontal a 30,0 m do solo

5.5 EDIFÍCIO ALTO COM VIZINHANÇA

Neste exemplo foi realizada a simulação transiente de um edifício vertical sob a influência de um edifício vizinho a barlavento, possuindo ambos a mesma geometria. A Figura 5.23 apresenta a disposição dos dois edifícios e suas respectivas dimensões em milímetros (sendo o modelo analisado indicado pela hachura).

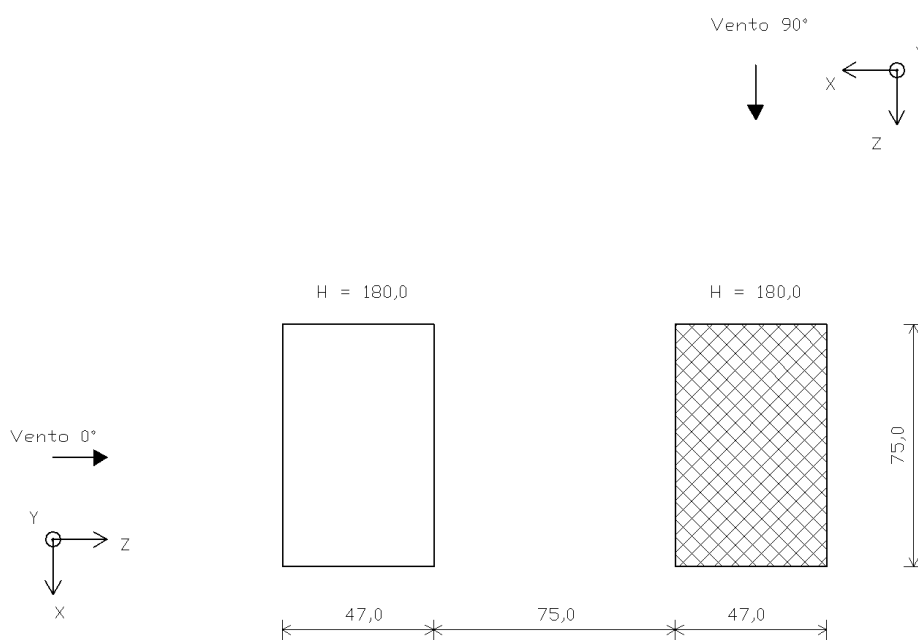


Figura 5.23 – Disposição dos edifícios

O problema modelado e analisado aqui foi realizado por [Fontes \(2003\)](#), que determinou os coeficientes de arrasto através de ensaios no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann na UFRGS. A estrutura simulada reproduz em escala 3/1000 um edifício real localizado na Avenida Paulista na cidade São Paulo-SP com dimensões 25,15m x 15,15m de base e altura de 60,0 m, que foi primeiro estudado também por [Riera et al. \(1994\)](#).

O túnel de vento onde o ensaio foi realizado possui dimensões 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento) e constitui um circuito fechado. O volume de controle definido no Ansys reproduziu a seção transversal do túnel. A escolha de utilizar as dimensões do túnel de vento foi feita tendo o objetivo de validação, portanto, a intenção neste caso foi reproduzir o ensaio de laboratório, não necessariamente a edificação em sua condição real. Inclusive, esta limitação nas dimensões do domínio do fluido é uma das possíveis fontes de erro nos experimentos físicos em túnel de vento, visto que as paredes físicas do equipamento não reproduzem a situação real da edificação localizada em ambiente aberto. A malha de volumes finitos utilizada está apresentada na Figura 5.24 e possui 91.252 nós e 502.234 elementos.

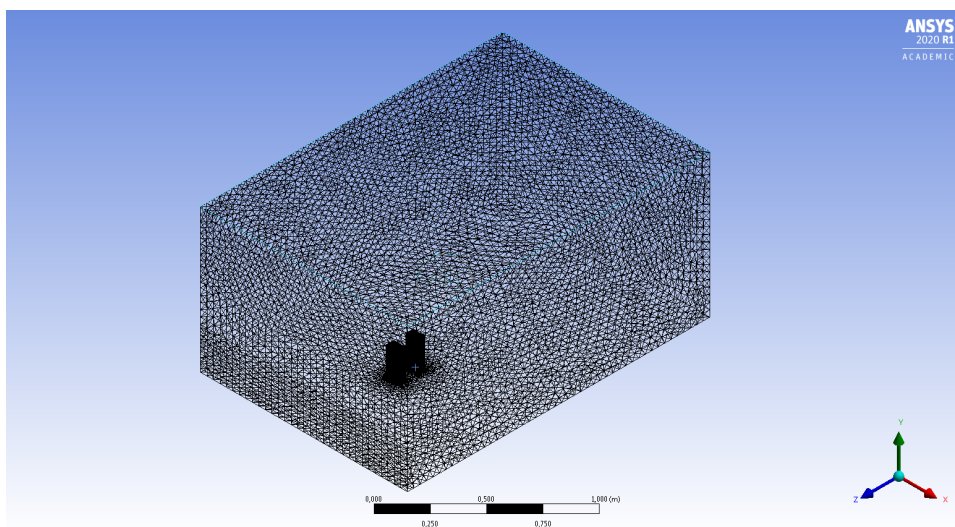


Figura 5.24 – Malha do edifício com vizinhança

Novamente, o vento na entrada foi modelado pela lei de potência definida na equação (2.1), cujo perfil também é desenvolvido no túnel de vento através de acessórios convenientemente posicionados. Substituindo-se os valores de referência, o vento em função da altura neste ensaio é dado pela equação (5.9):

$$v_{entrada}(z) = 38.\left(\frac{z}{0,45}\right)^{0,34} \quad (5.9)$$

Assim como no exemplo anterior, a entrada das velocidades no Fluid Flow (Fluent) teve o perfil escalonado, como mostra a Figura 5.25, que apresenta o gráfico do perfil de vento natural e simulado.

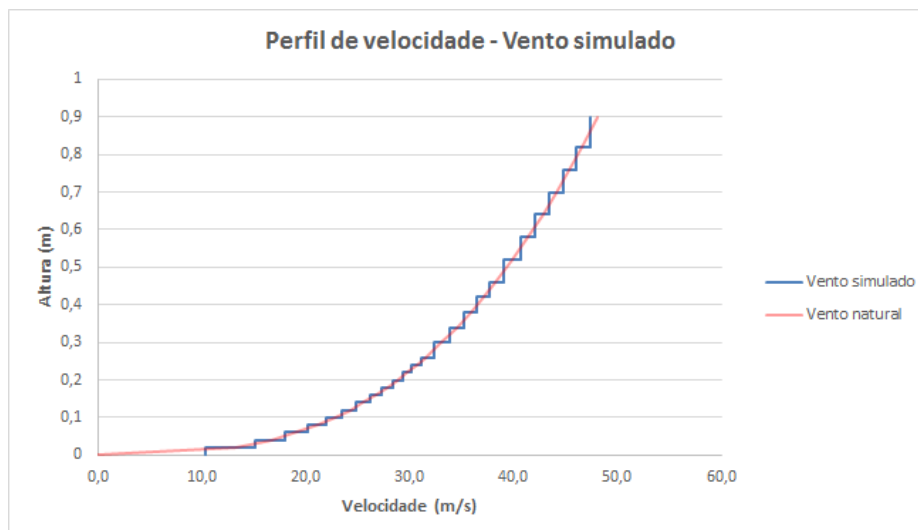


Figura 5.25 – Perfil do vento na entrada

A Tabela 5.7 apresenta as propriedades do escoamento modelado que reproduzem as mesmas condições de Fontes (2003) em túnel de vento. Para modelagem da turbulência, utilizou-se, novamente, o modelo LES e o modelo de escala da submalha Smagorinsky-Lily com $C_S = 0,1$. O referido autor utilizou ar atmosférico em CNPT e uma velocidade básica de entrada igual 38,0 m/s.

Tabela 5.7 – Propriedades do escoamento - Edifício com vizinhança

Massa específica	1,225 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	1,7894 × 10 ⁻⁴ Ns/m ²
Velocidade característica (topo do edifício)	27,82 m/s
Passo de tempo	5 × 10 ⁻³ s

As simulações realizadas duraram 26,0 segundos para o vento a 0° e 15,0 segundos para o vento a 90° e os resultados obtidos foram comparados em termos de coeficientes de força médios na direção do escoamento. A Tabela 5.8 apresenta a comparação dos resultados obtidos neste trabalho através do Ansys com aqueles obtidos experimentalmente por Fontes (2003) para incidência do vento nas direções indicadas na Figura 5.23.

Tabela 5.8 – Coeficientes médios de força na direção do escoamento - Edifício com vizinhança

	Presente trabalho	Fontes (2003)
0°	-0,061	-0,06
90°	0,822	0,67

Visto que Fontes (2003) publicou somente os coeficientes de força na direção do escoamento, também chamados de coeficientes de arrasto, só foi possível comparar estes resultados. Não obstante, todos os coeficientes de força e momento médios foram calculados

pelas equações de (5.3) a (5.8) e estão apresentados na Tabela 5.9; os índices dos coeficientes (x, y e z) estão de acordo com os eixos de referência dados na Figura 5.23, sendo z a direção do escoamento principal.

Tabela 5.9 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança

	0°	90°
CF_z	-0,061	0,822
CF_y	0,329	0,438
CF_x	0,022	0,057
CM_y	0,008	0,047
CM_z	0,003	0,046
CM_x	0,046	-0,443

A comparação dos coeficientes de força na direção do escoamento mostra uma concordância exata para incidência do vento a 0° (considerando-se duas casas decimais) e uma diferença de 22% para incidência do vento a 90° que, apesar de ser uma divergência não desprezível, mantém os dois valores na mesma ordem de grandeza e mostra uma concordância razoável. Como esperado, o coeficiente para vento a 0° foi negativo, resultado da sucção na fachada a barlavento devido à zona de baixa pressão na esteira do edifício vizinho, enquanto o coeficiente para vento a 90° foi positivo devido ao impacto direto do escoamento de ar sem obstáculos que gerou sobrepressão a barlavento.

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam os campos de pressão instantâneos ao final da análise (26, 0s) para o vento incidindo a 0°, e as Figuras 5.28 e 5.29 apresentam as linhas de corrente para a mesma situação.

No plano horizontal pode-se verificar, novamente, a formação de uma zona de baixa pressão a sotavento do modelo onde vórtices desprendem-se das arestas vivas da estrutura. Na região entre as duas estruturas, percebe-se também uma zona de sucção, porém sem os típicos vórtices bem definidos de forma alternada devido ao pequeno espaçamento entre as edificações, o que constitui um escoamento deslizante, conforme previsto por Cook (1990) (ver Figura 5.30). No plano vertical, também nota-se o comportamento esperado; é possível identificar a deflexão vertical do vento no edifício vizinho, a separação da camada limite no topo da mesma edificação e também a esteira do modelo semelhante àquela prevista por Cook (1985) na Figura 2.3.

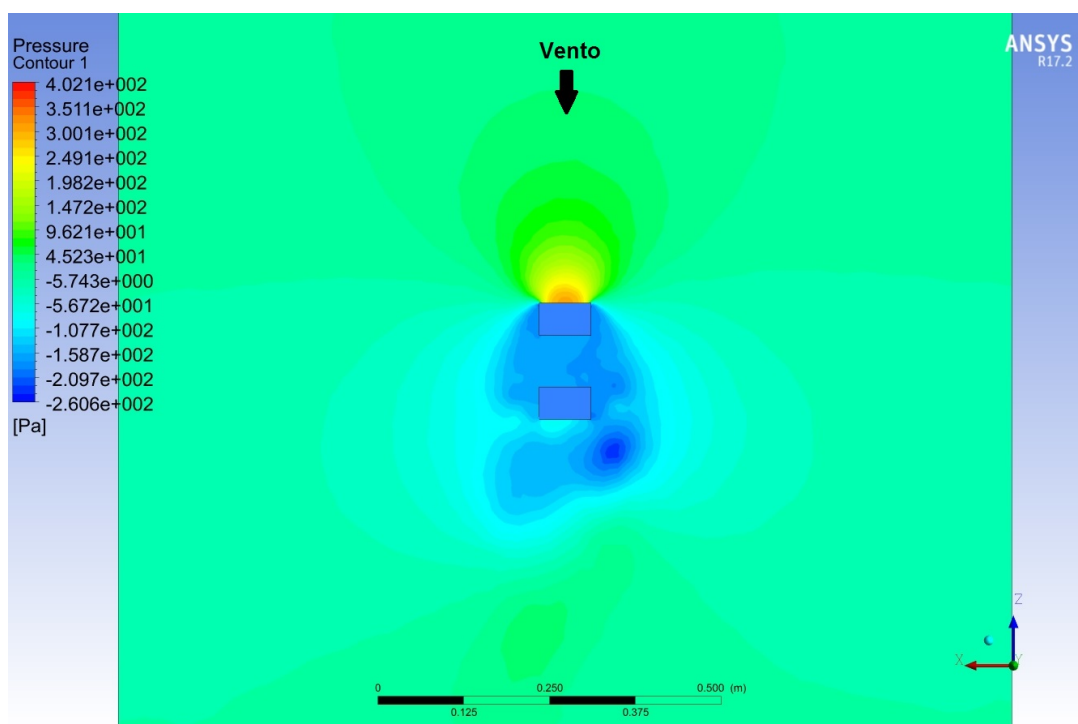


Figura 5.26 – Campo de pressão - Vento a 0° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo (metade da altura dos edifícios)

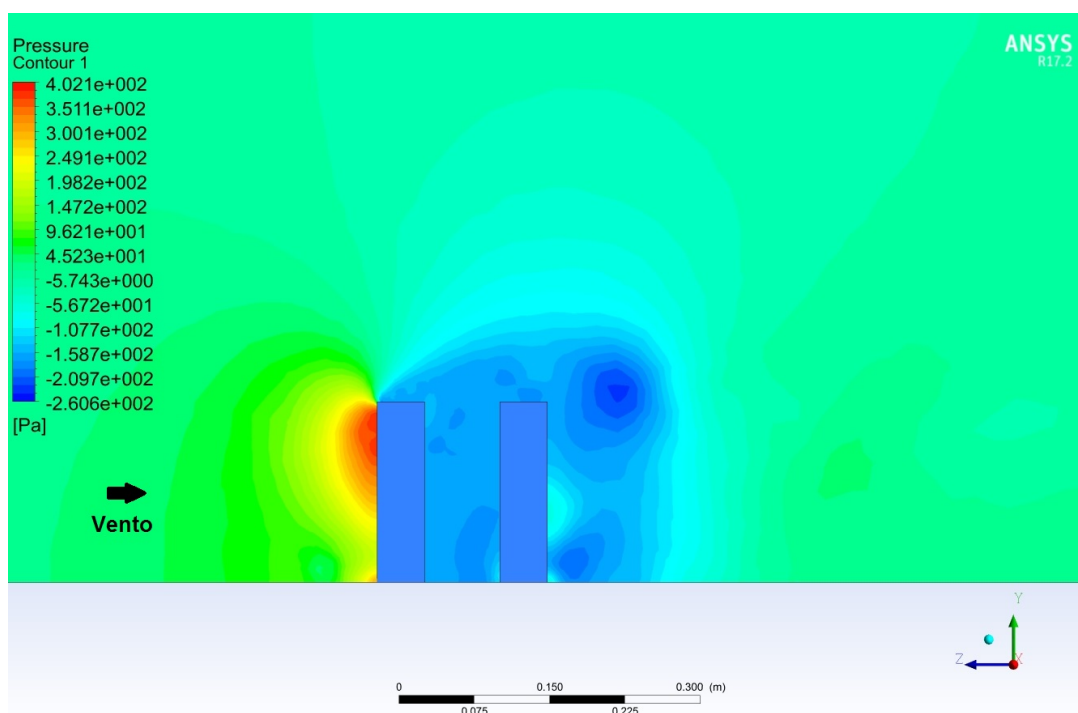


Figura 5.27 – Campo de pressão - Vento a 0° - Plano vertical de simetria

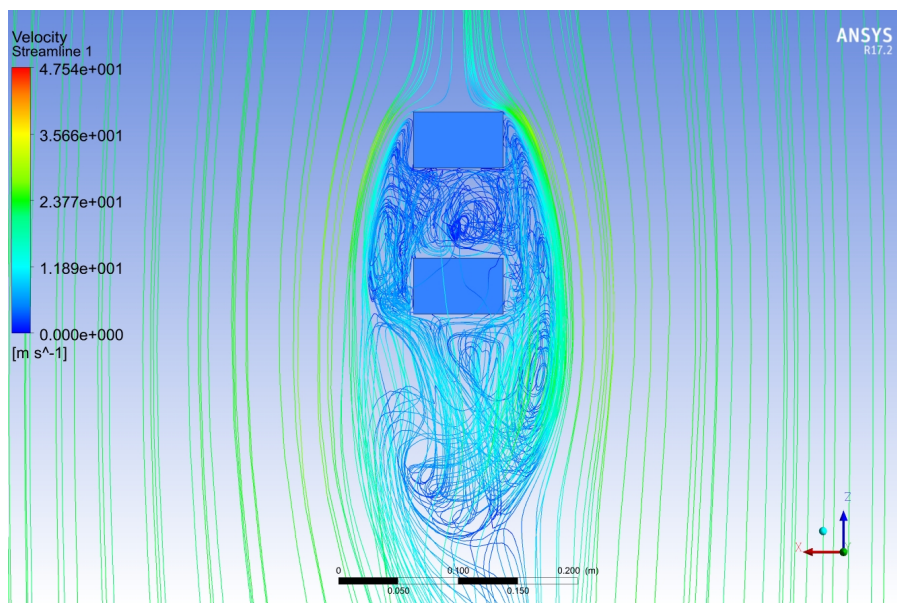


Figura 5.28 – Linhas de corrente - Vento a 0° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo (metade da altura dos edifícios)

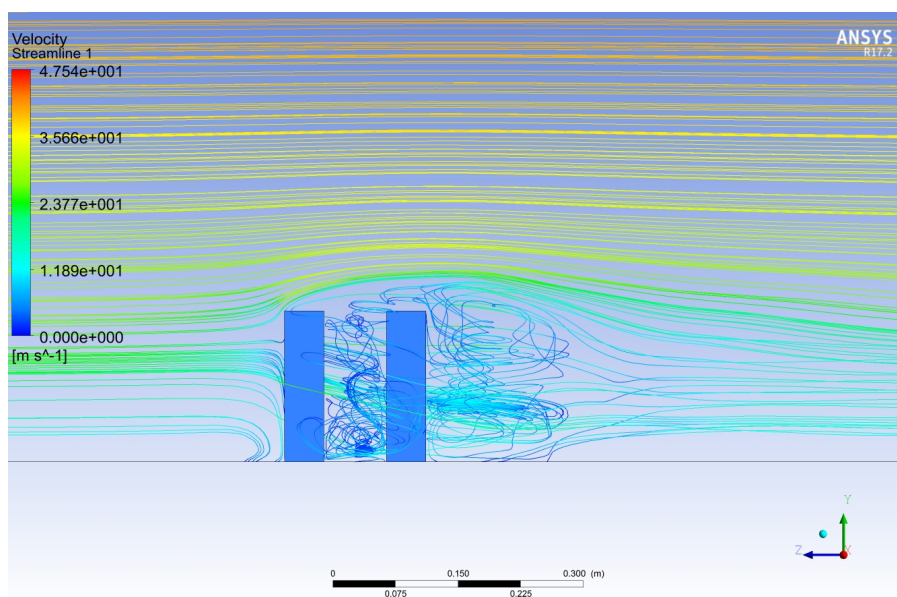


Figura 5.29 – Linhas de corrente - Vento a 0° - Plano vertical de simetria

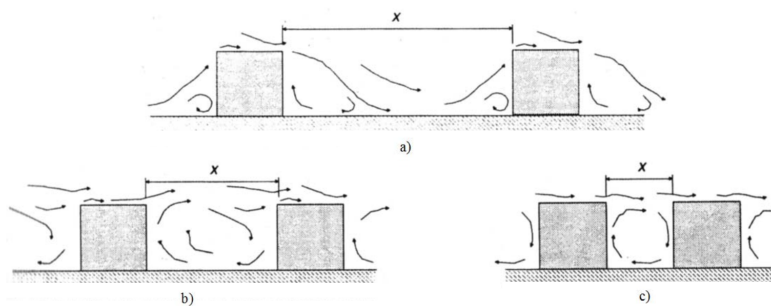


Figura 5.30 – (a) Escoamento de corpo isolado, (b) interferência na esteira e (c) escoamento deslizando. Fonte: Cook (1990) (adaptado)

As Figuras 5.31 e 5.32 apresentam os campos de pressão instantâneos para o vento incidindo a 90° e as Figuras 5.33 e 5.34 apresentam as linhas de corrente para a mesma situação.

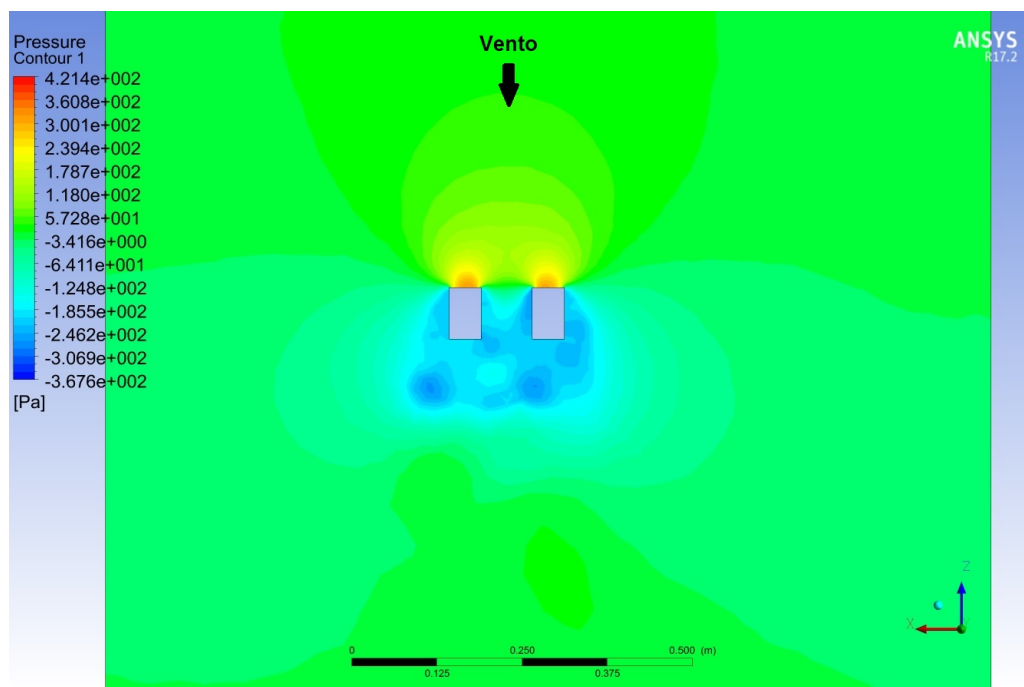


Figura 5.31 – Campo de pressão - Vento a 90° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo

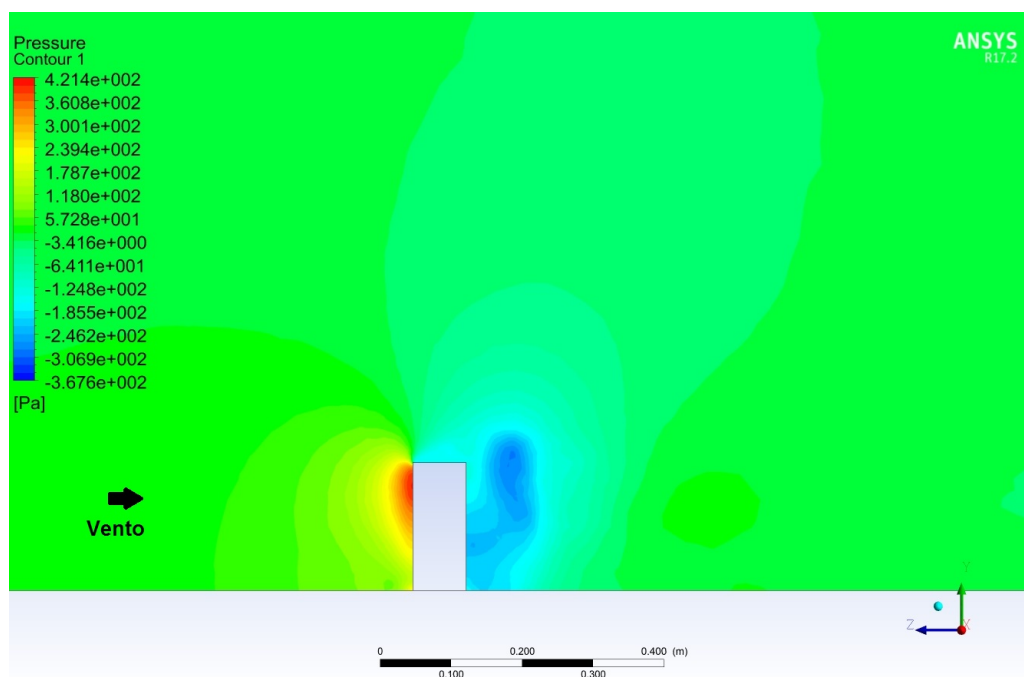


Figura 5.32 – Campo de pressão - Vento a 90° - Plano vertical passando pelo eixo do modelo

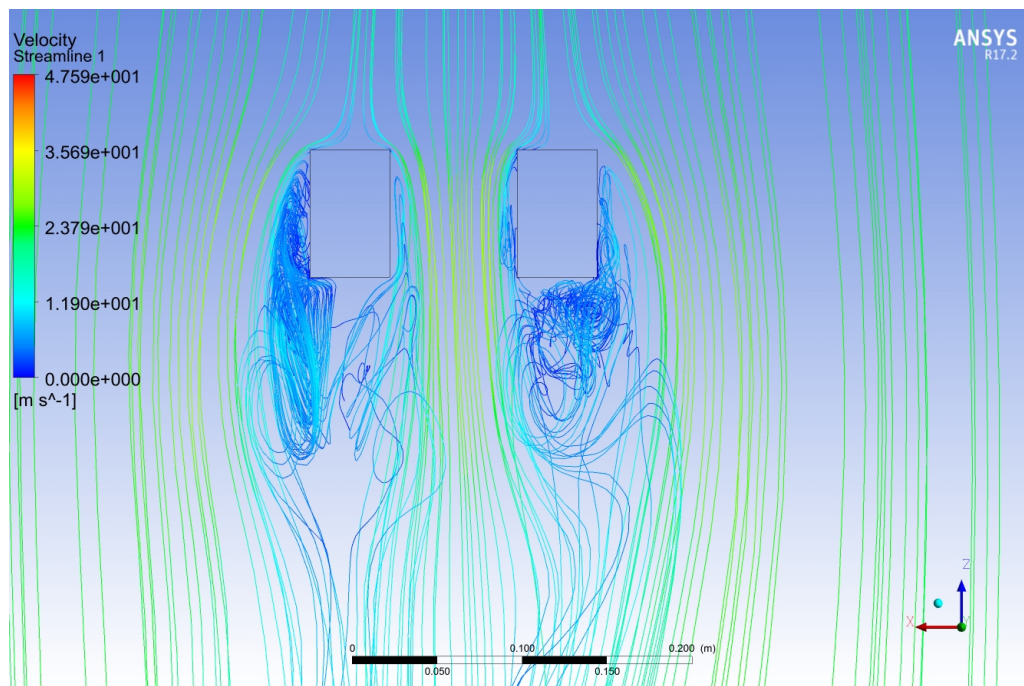


Figura 5.33 – Linhas de corrente - Vento a 90° - Plano horizontal a 90,0 mm do solo

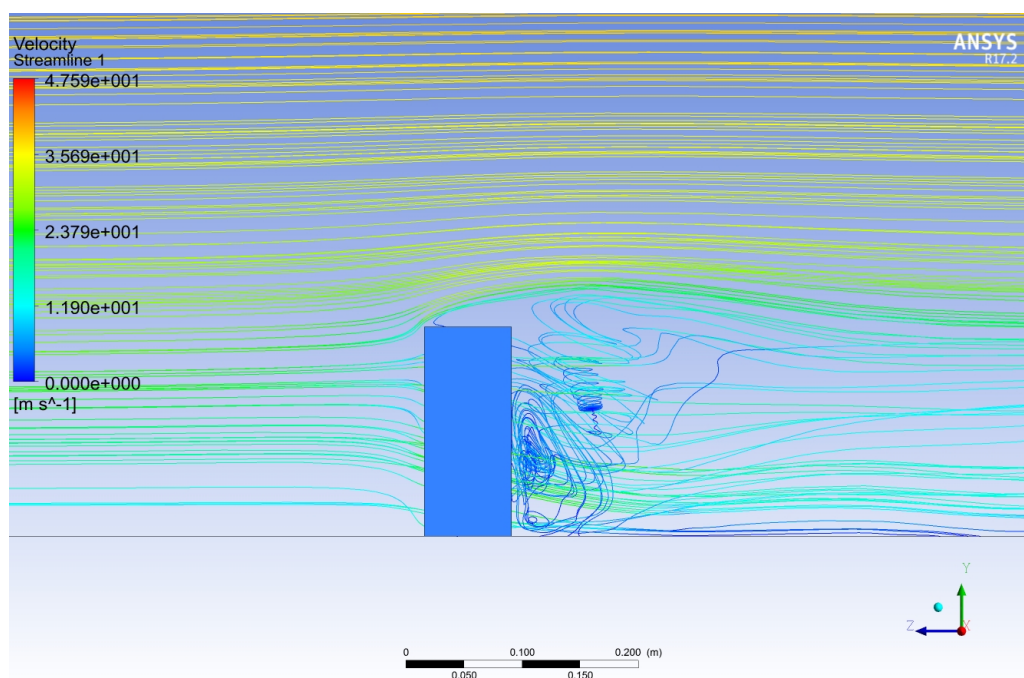


Figura 5.34 – Linhas de corrente - Vento a 90° - Plano vertical passando pelo eixo do modelo

No caso do vento incidindo a 90°, tanto o plano horizontal quanto o vertical mostram que a interferência da edificação vizinha no edifício modelo é menos significativa. O aspecto do campo de pressão e das linhas de corrente também mostram-se qualitativamente coerentes com o esperado ao mostrar os fenômenos da deflexão vertical do vento, separação e recirculação no topo do modelo, sobrepessão na fachada a barlavento especialmente na

região superior e formação de vórtices na esteira onde predominam altas sucções. É válido notar, por exemplo, na Figura 5.33 que a esteira das duas edificações não é simétrica. Sendo o problema transiente e as edificações rombudas, os vórtices desprendidos nas arestas e o aspecto do escoamento a sotavento das estruturas sofre perturbações rápidas e intensas devido à alta turbulência do escoamento e seu caráter caótico que produz este resultado.

6 ENSAIOS E RESULTADOS

6.1 EDIFÍCIO ISOLADO

Um edifício prismático de dimensões 15,0m x 10,0m x 60,0m, conforme apresentado na Figura 6.1, foi simulado de forma isolada para posteriormente ser submetido a efeitos de vizinhança. As dimensões do edifício foram adotadas mantendo-se as proporções do *CAARC Standard Tall Building*, já apresentado anteriormente na Figura 2.20. As medidas implicam em um índice de esbeltez igual a 6, que constitui um tipo de edificação usualmente sensível a efeitos aerodinâmicos.

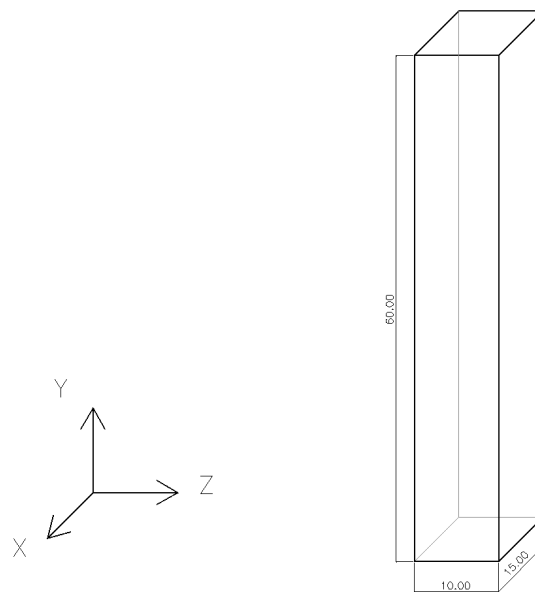


Figura 6.1 – Dimensões do edifício analisado

O volume de controle considerado na análise está representado na Figura 6.2, onde também estão indicados os eixos coordenados do problema e a face de entrada do vento (à esquerda na imagem). As dimensões da seção transversal do domínio do fluido foram adotadas com proporções semelhantes à outros trabalhos da EVC (AWRUCH; BRAUN; GRECO, 2015; BRAUN, 2007). De acordo com Bênia (2013), a razão entre a área de bloqueio e a seção de escoamento, devido a presença dos modelos, não deve ser superior a 5% em ensaios em túnel de vento, ou, caso o limite seja ultrapassado, deve-se recorrer a correções dos resultados. No exemplo em questão, a área de bloqueio é inferior a 0,5%,

então, considerando-se o limite de 5% como um parâmetro balizador, infere-se que a seção adotada mostra-se bastante razoável.

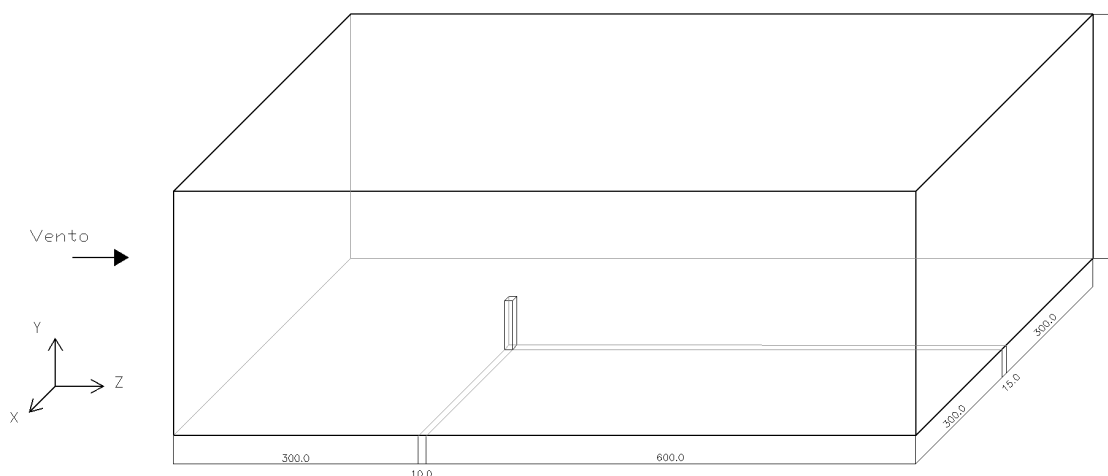


Figura 6.2 – Volume de controle da análise

As faces laterais e superior do volume de controle foram consideradas como paredes de deslizamento livre, simulando a condição da estrutura em local aberto. As faces inferior (solo) e as paredes do modelo foram consideradas como faces de não deslizamento, onde a velocidade tangencial no contato é nula.

A malha de volumes finitos utilizada está apresentada na Figura 6.3 e possui 89.736 nós e 501.084 elementos.

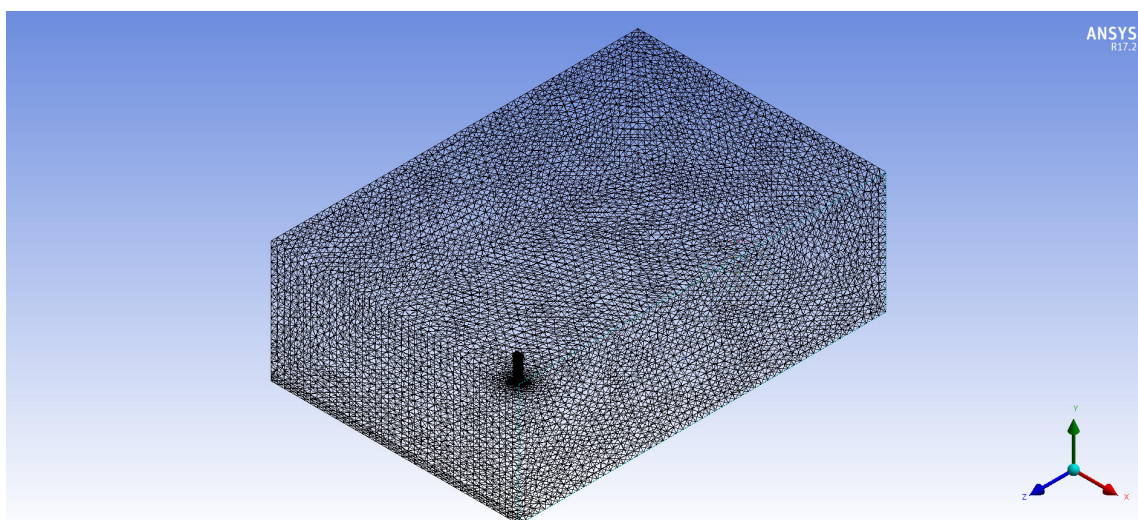


Figura 6.3 – Malha do edifício isolado

Novamente foi utilizada a lei de potência para velocidade do vento na entrada, com uma velocidade básica de 30,0 m/s, conforme a equação (6.1). A Figura 6.4 mostra o perfil de vento escalonado que foi simulado no Fluid Flow (Fluent) e o vento natural.

$$v_{entrada}(z) = 30. \left(\frac{z}{60}\right)^{0,34} \quad (6.1)$$

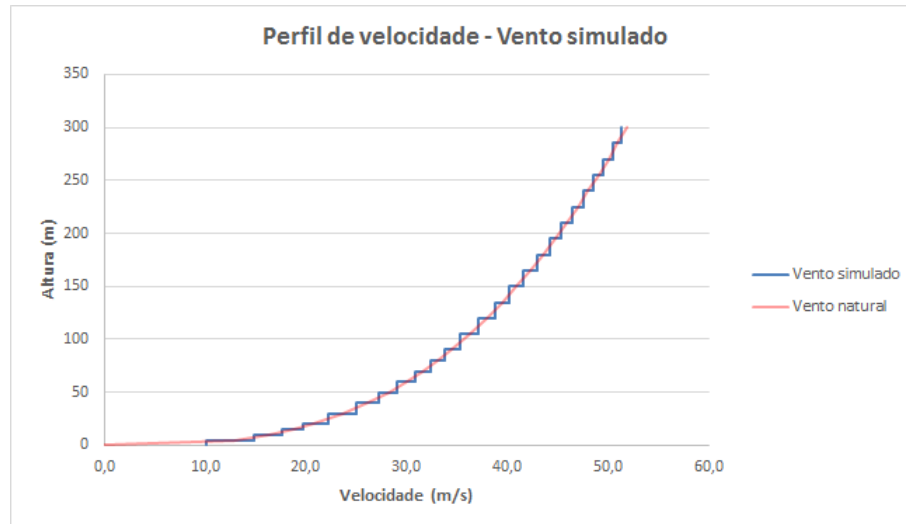


Figura 6.4 – Perfil de vento na entrada

A Tabela 6.1 apresenta as propriedades do escoamento de ar em condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Como nos casos anteriores, o problema foi solucionado em regime transiente para as equações de Navier-Stokes e para o modelo LES de turbulência com o modelo de escala da submalha Smagorinsky-Lily com $C_S = 0,1$.

Tabela 6.1 – Propriedades do escoamento - Edifício isolado

Massa específica	$1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$
Viscosidade dinâmica	$1,7894 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
Velocidade característica	$30,0 \text{ m}/\text{s}$
Passo de tempo	$5 \times 10^{-3} \text{ s}$

A simulação do escoamento sobre o edifício isolado foi feita tanto no modelo aerodinâmico (análise *one way*), quanto no modelo aeroelástico (análise *two way*), para fins de comparação dos resultados. Na análise *two way* foi utilizado, além do plugin Fluid Flow (Fluent), o plugin Transient Structural, que simulou o comportamento estrutural, e o System Coupling, que fez o acoplamento dos módulos de estrutura e fluido. Para modelagem mecânica do edifício foram utilizados os parâmetros da Tabela 6.2. Para adoção de propriedades mecânicas com ordem de grandeza coerente com o problema, foi adotado um módulo de elasticidade equivalente ao utilizado por Bênia (2013) nos ensaios aeroelásticos.

A Tabela 6.3 apresenta os coeficientes médios de força e momento obtidos nas duas análises, além dos coeficientes de força previstos pela NBR 6123. Os índices dos coeficientes (x, y e z) são dados de acordo com os eixos de referência da Figura 6.2.

Tabela 6.2 – Propriedades mecânicas do modelo estrutural

Módulo de elasticidade	$3 \times 10^6 Pa$
Coefficiente de Poisson	0,20
Massa específica	$2,30 ton/m^3$
Coefficiente de amortecimento	0,10

Tabela 6.3 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício isolado

	One way	Two way	NBR 6123
CF_z	0,881	0,957	1,1
CF_y	0,452	0,357	0,7
CF_x	0,002	0,052	0,0
CM_y	0,005	0,071	NA
CM_z	0,009	0,236	NA
CM_x	-0,485	-0,509	NA

Como pode-se verificar pela Tabela 6.3, a maior parte dos coeficientes de força e momento obtidos pelas duas análises tiveram diferenças pouco expressivas em termos absolutos. O coeficiente de arrasto (força na direção do escoamento, neste caso, CF_z) mostrou uma divergência de aproximadamente 8%. A maior diferença relevante verificou-se no coeficiente CM_z , que expressa a deformação da estrutura na direção transversal ao escoamento (flexão em torno do eixo de escoamento z). Esta diferença justifica-se pelo acoplamento do movimento transversal da estrutura com o desprendimento de vórtices nas arestas laterais do edifício. Embora a diferença nestes resultados deva ser mais relevante em estruturas mais flexíveis que, conseqüentemente, implicam em maior perturbação no campo de pressão do escoamento e cálculo dos coeficientes, não provocou diferença tão significativa no modelo aqui estudado, tendo em vista uma divergência absoluta máxima de 0,2.

Pela diferença no procedimento numérico entre os dois tipos de simulação, sabe-se que a análise *one way* é computacionalmente mais leve e rápida do que a *two way*. Em testes realizados, verificou-se que a simulação *two way* leva mais do que 15 vezes o tempo necessário para a simulação *one way* do ensaio com todos os parâmetros (malha, *time step*, tempo de análise etc.) mantidos constantes. No ensaio em questão, por exemplo, o tempo de processamento computacional da análise *two way* foi de aproximadamente 80 horas (utilizando o computador descrito na seção 4). A partir destas considerações, optou-se por prosseguir os ensaios e análises com o modelo aerodinâmico ao invés do aeroelástico.

Na comparação dos coeficientes de força da NBR 6123 com os da análise *one way*, foi verificado que o coeficiente na direção do escoamento (CF_z) apresentou uma diferença de 22% e o coeficiente na direção transversal ao escoamento (CF_x) foi igual ao da simulação numérica até a segunda casa decimal; assim como na simulação da seção 5.4, a maior diferença encontrada foi no coeficiente de força vertical (CF_y), onde a divergência foi de

55%.

A simulação foi realizada durante 50,0 segundos. As Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam o campo de pressão instantâneo ao final da análise referente a simulação do modelo aerodinâmico, e as Figuras 6.8 e 6.9 mostram as linhas de corrente do mesmo modelo.

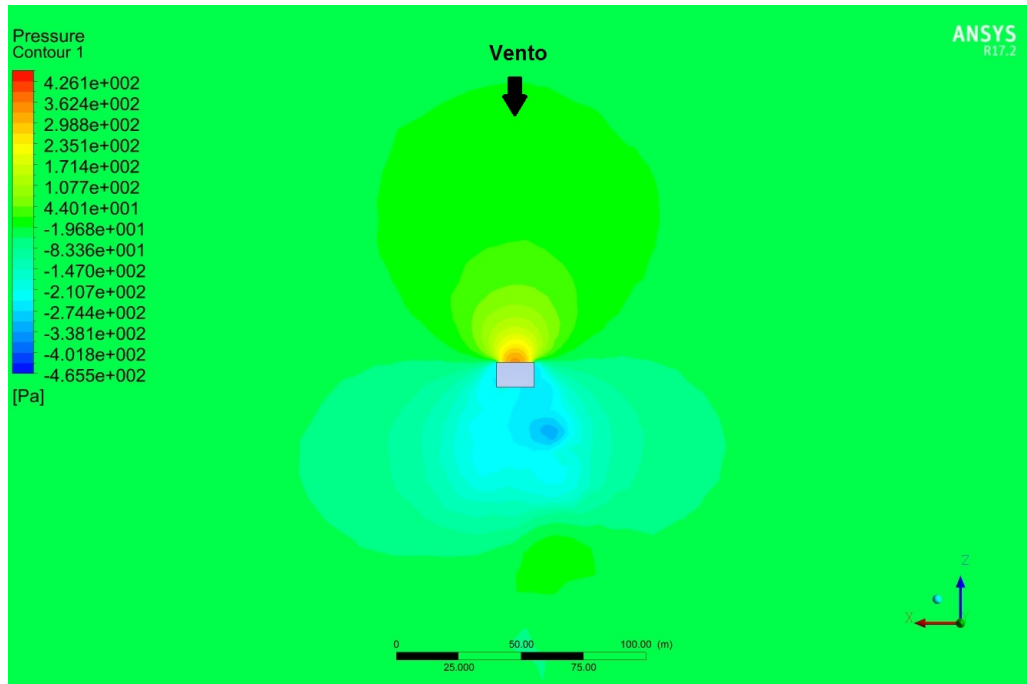


Figura 6.5 – Modelo aerodinâmico - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

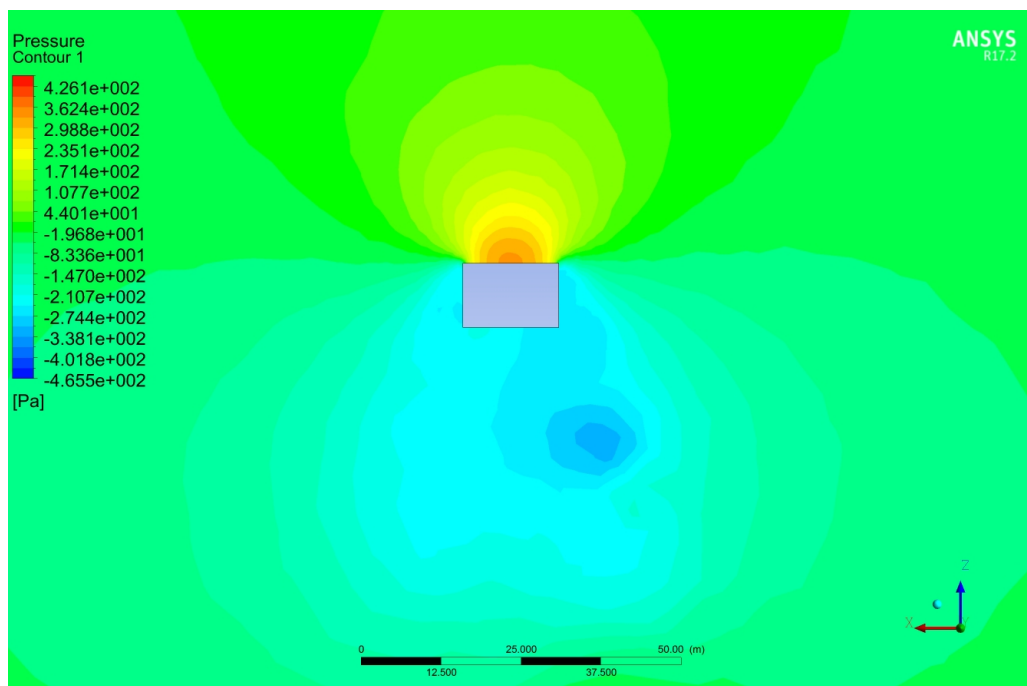


Figura 6.6 – Modelo aerodinâmico - Zoom no campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

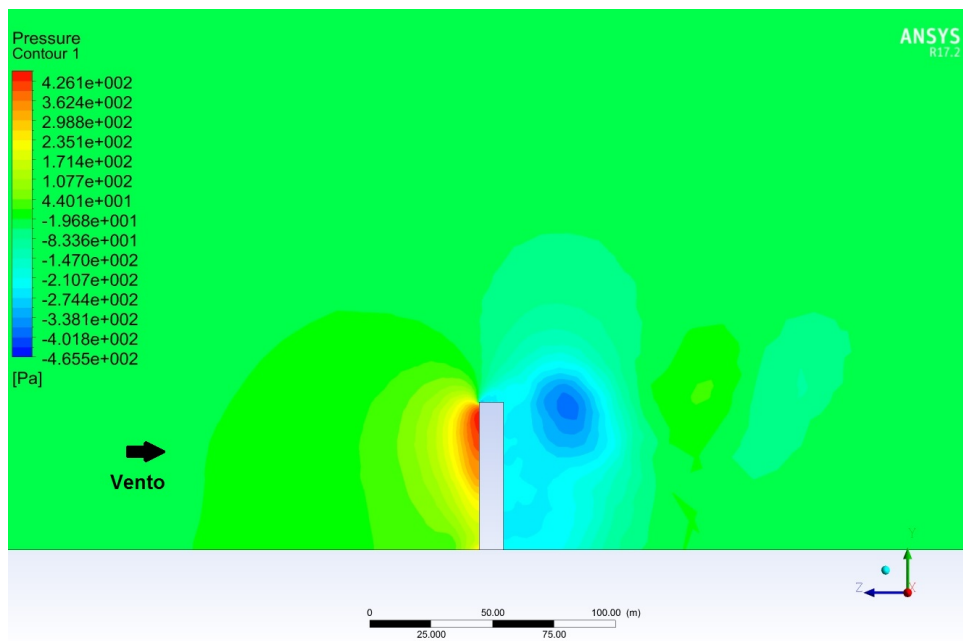


Figura 6.7 – Modelo aerodinâmico - Campo de pressão em plano vertical de simetria

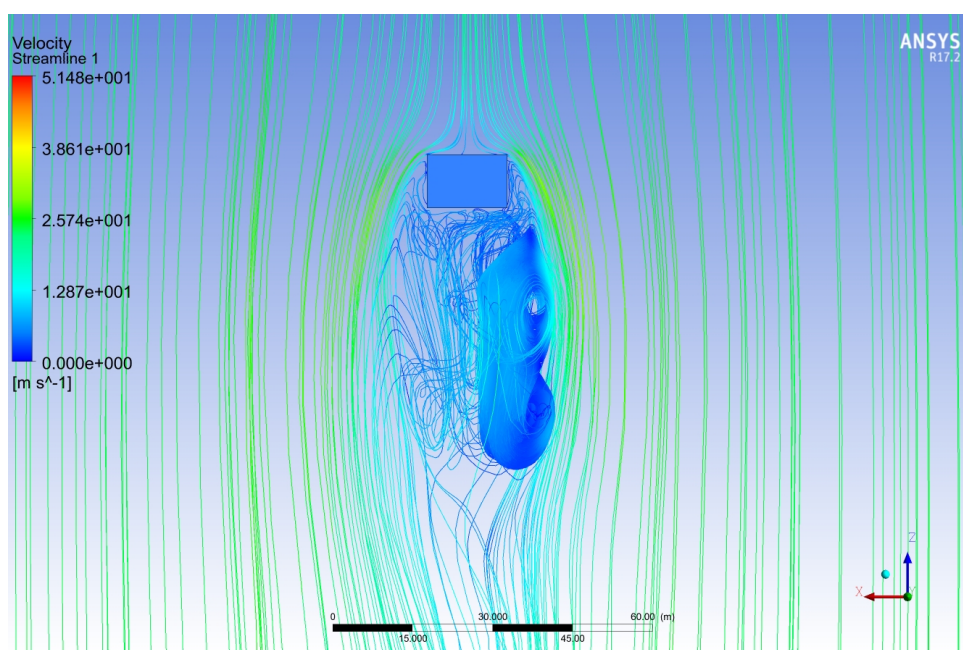


Figura 6.8 – Modelo aerodinâmico - Linhas de corrente em plano horizontal $y=30,0m$

Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com as condições do ensaio. O maior coeficiente de força foi obtido na direção do escoamento (CF_z) provocando sobrepressão na face frontal. O coeficiente de força lateral (CF_x) e o momentos que geram torção (CM_y) e flexão no sentido transversal (CM_z) foram desprezíveis, o que está em consonância com a condição e simetria do escoamento.

A análise do campo de pressão através do plano horizontal mostra a formação de vórtices nas regiões de baixa pressão a sotavento do edifício, o que é justificado pela

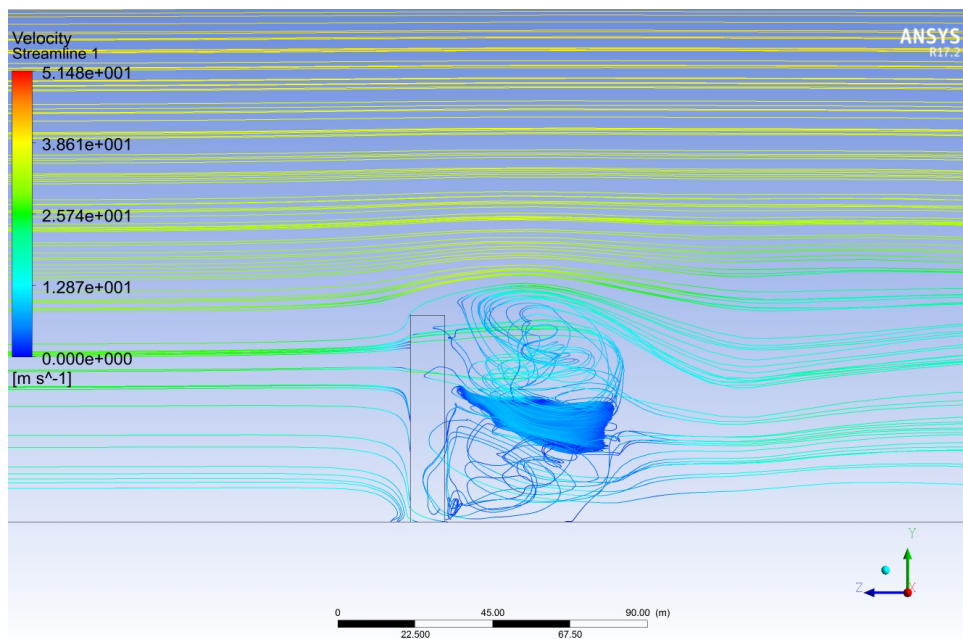


Figura 6.9 – Modelo aerodinâmico - Linhas de corrente em plano vertical de simetria

turbulência verificada nas arestas vivas da estrutura. Como a simulação é feita em três dimensões, o efeito dos vórtices tridimensionais na pressão no entorno da estrutura não é tão clara em um plano horizontal; através das linhas de corrente, é possível ver a separação da camada limite nas arestas da fachada frontal e a zona de recirculação na esteira da edificação.

No plano vertical, verifica-se que a sobrepressão mais intensa é identificada no topo da edificação, onde a velocidade do vento é mais alta e, de forma semelhante, as sucções mais intensas também ocorrem na região mais alta da esteira da estrutura. Pelas linhas de corrente é possível observar o fenômeno da deflexão vertical do vento na fachada a barlavento, que faz surgir uma sobrepressão na base do edifício ligeiramente maior do que na região imediatamente superior, e a formação dos turbilhões na esteira, inclusive, na direção vertical, conforme previsto, novamente por [Cook \(1985\)](#). As Figuras 6.10 e 6.11 mostram em perspectiva tridimensional as linhas do corrente do plano vertical e horizontal, respectivamente.

Considerando o processo de validação realizado através dos modelos apresentados na seção 5 e os resultados qualitativamente coerentes com o esperado pelos conhecimentos da Engenharia do Vento, o ensaio foi considerado satisfatório para ser analisado com efeitos de vizinhança.

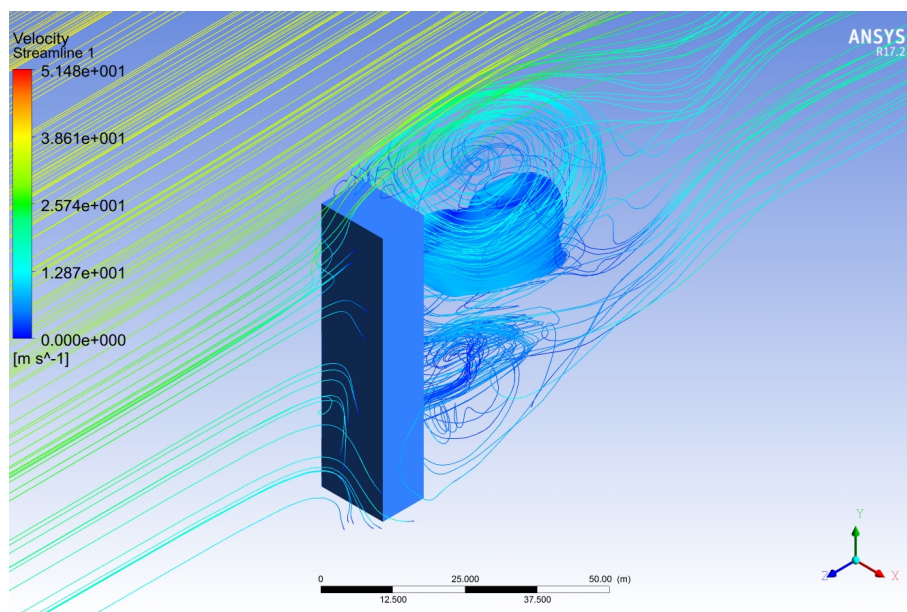


Figura 6.10 – Modelo aerodinâmico - Perspectiva tridimensional das linhas de corrente em plano vertical de simetria

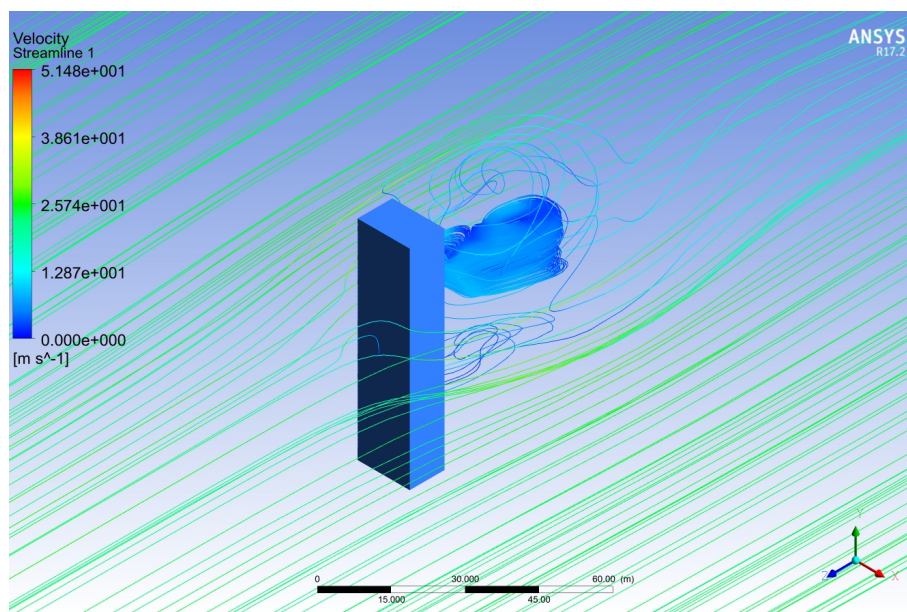


Figura 6.11 – Modelo aerodinâmico - Perspectiva tridimensional das linhas de corrente em plano horizontal $y=30,0\text{m}$

6.2 EDIFÍCIO COM VIZINHANÇA

Após feita a análise do edifício isolado, a mesma estrutura (Figura 6.1) foi simulada em 9 diferentes configurações de vizinhança, apresentadas nas Figuras de 6.12 a 6.20.

Configuração IA



Figura 6.12 – Configuração de vizinhança IA. Dimensões em metros

Configuração IB

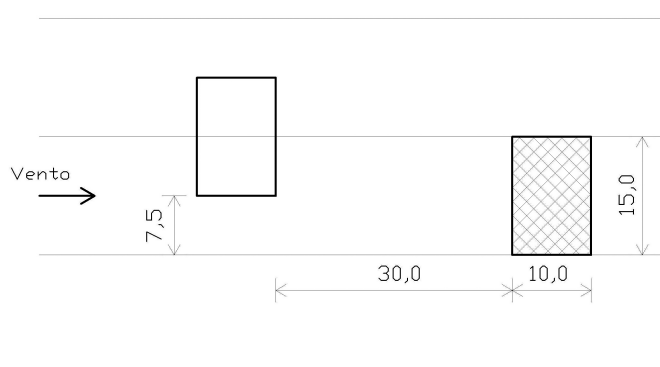


Figura 6.13 – Configuração de vizinhança IB. Dimensões em metros

Configuração IC

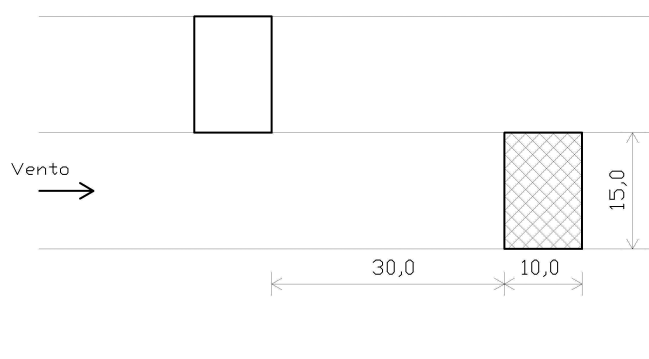


Figura 6.14 – Configuração de vizinhança IC. Dimensões em metros

Configuração IIA

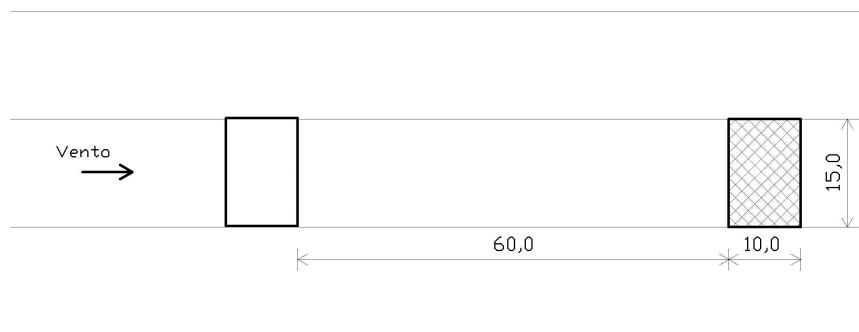


Figura 6.15 – Configuração de vizinhança IIA. Dimensões em metros

Configuração IIB

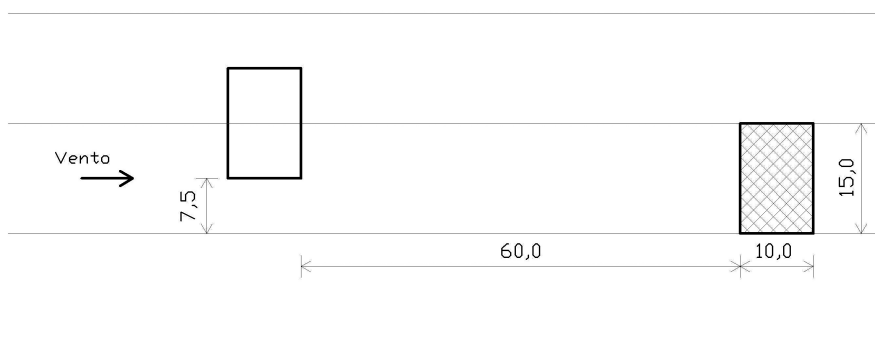


Figura 6.16 – Configuração de vizinhança IIB. Dimensões em metros

Configuração IIC

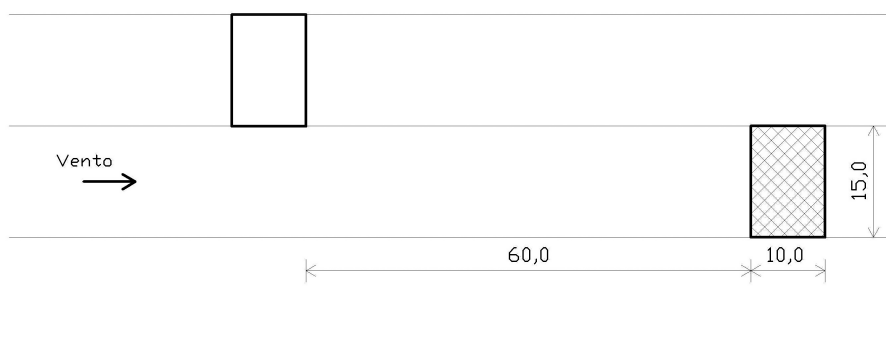


Figura 6.17 – Configuração de vizinhança IIC. Dimensões em metros

Configuração IIIA

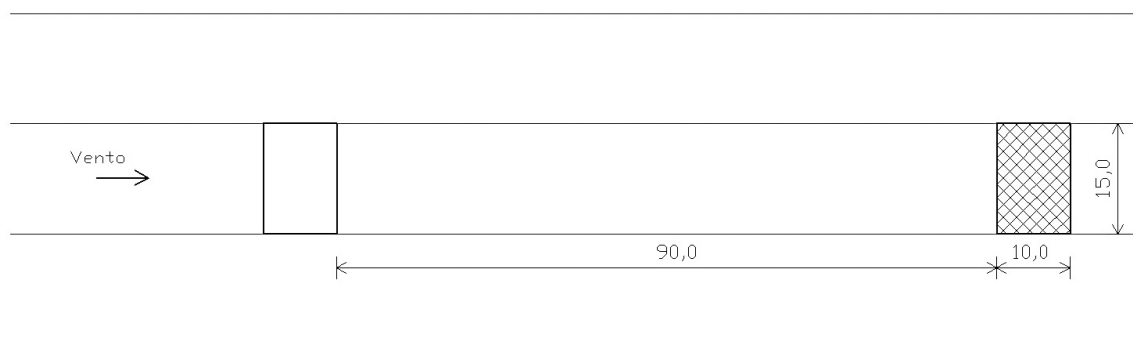


Figura 6.18 – Configuração de vizinhança IIIA. Dimensões em metros

Configuração IIIB

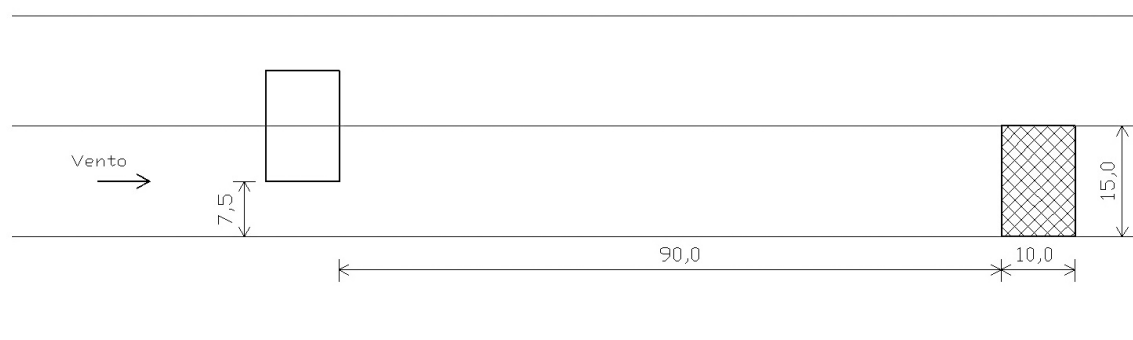


Figura 6.19 – Configuração de vizinhança IIIB. Dimensões em metros

Configuração IIIC

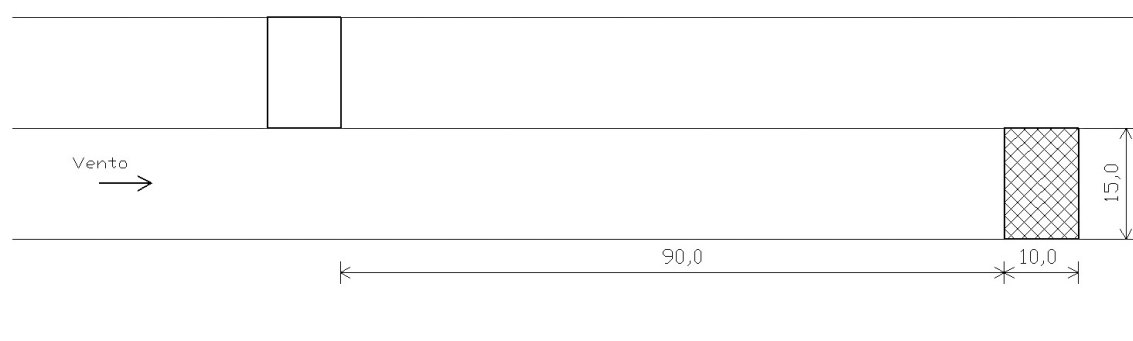


Figura 6.20 – Configuração de vizinhança IIIC. Dimensões em metros

Nas análises com vizinhança foram utilizados o mesmo volume de controle (Figura 6.2), perfil de vento na entrada (Figura 6.4) e propriedades do escoamento (Tabela 6.1) da seção 6.1.

A malha de volumes finitos utilizada, apresentada na Figura 6.21 referente à configuração IA, possui 112.558 nós e 626.623 elementos.

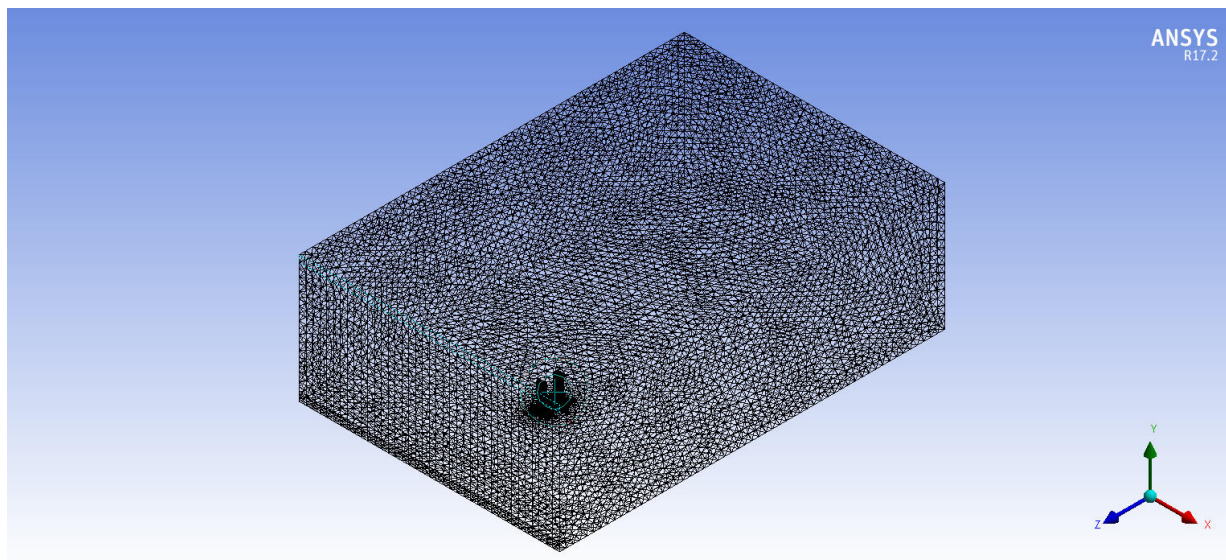


Figura 6.21 – Malha do edifício com vizinhança

Naturalmente, a malha foi diferente em cada configuração de vizinhança devido a diferença de geometria em cada caso, mas todas tiveram os mesmos parâmetros de entrada e foram semelhantes a da Figura 6.21 (que refere-se à configuração IA). Por causa da semelhança, as figuras das malhas dos outros casos foram suprimidas deste texto.

Os coeficientes médios de força e momento obtidos nas diferentes configurações de vizinhança estão apresentados nas Tabelas de 6.4 a 6.12 e os campos de pressão nas Figuras de 6.22 a 6.39.

Tabela 6.4 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IA

	Configuração IA
CF_z	-0,112
CF_y	0,344
CF_x	-0,104
CM_y	0,003
CM_z	-0,047
CM_x	0,076

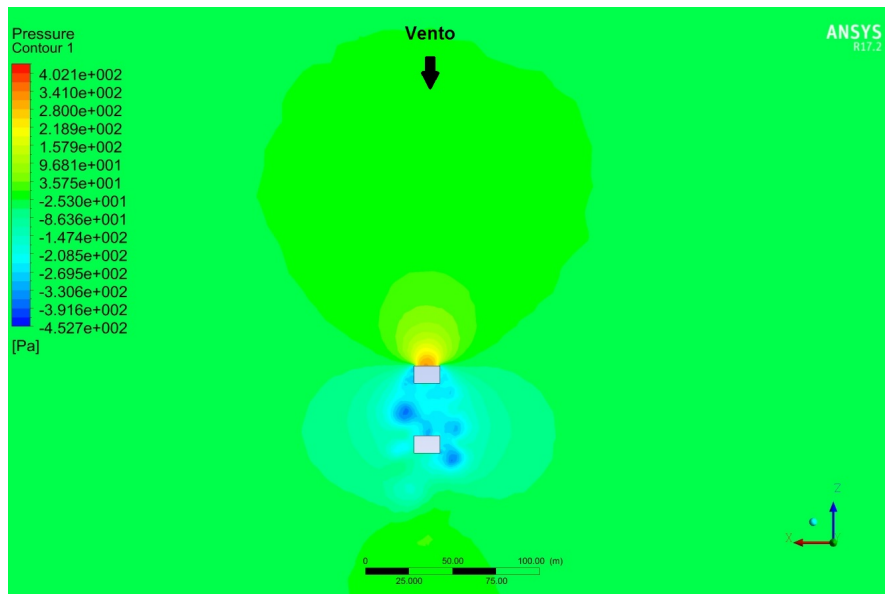


Figura 6.22 – Configuração IA - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

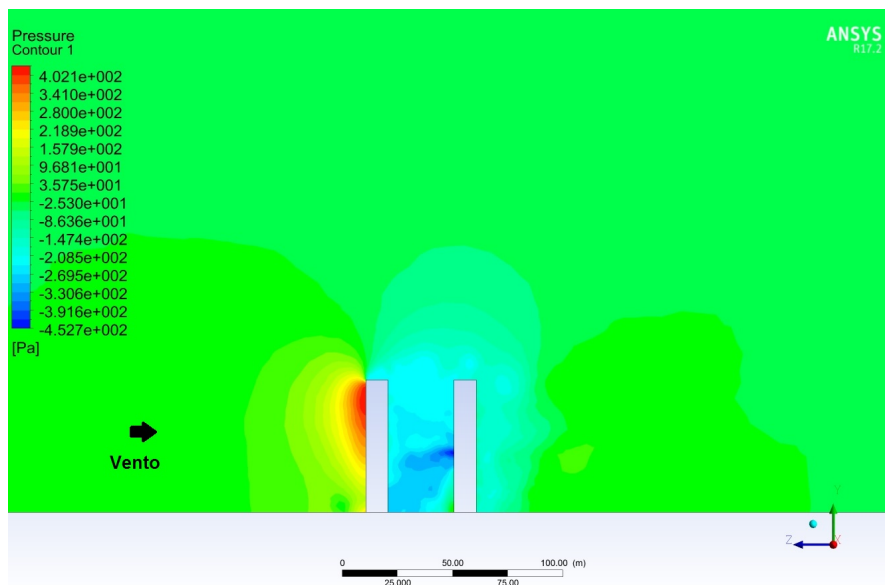


Figura 6.23 – Configuração IA - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.5 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IB

	Configuração IB
CF_z	-0,041
CF_y	0,382
CF_x	-0,257
CM_y	0,033
CM_z	-0,119
CM_x	0,053

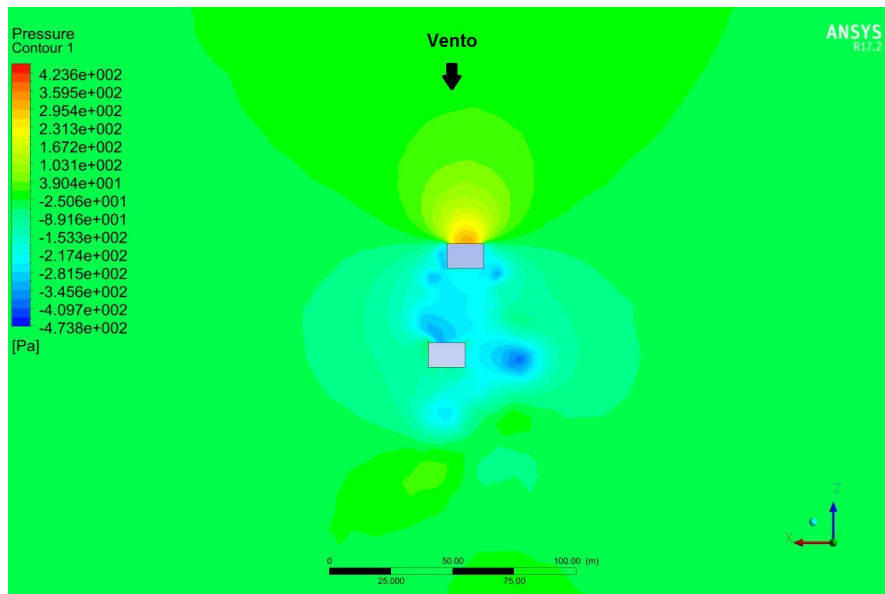


Figura 6.24 – Configuração IB - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

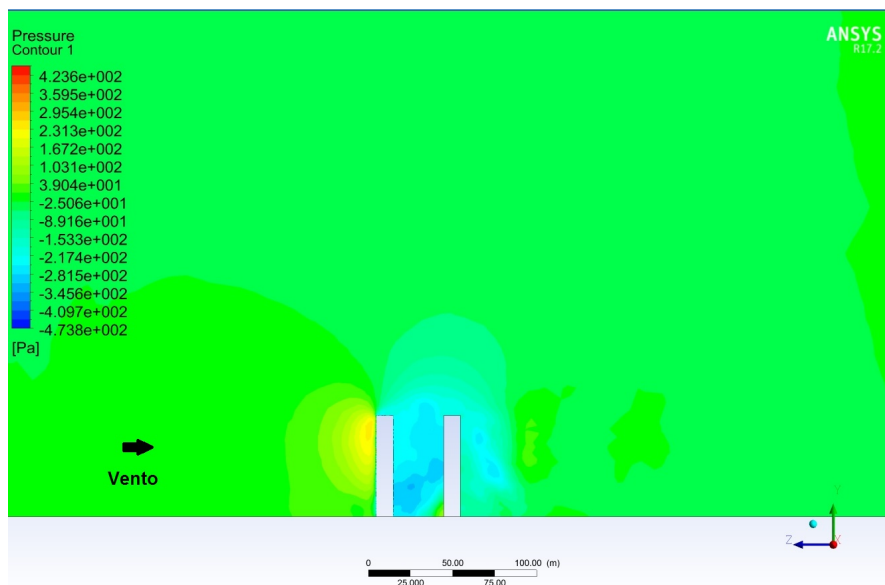


Figura 6.25 – Configuração IB - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.6 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IC

	Configuração IC
CF_z	0,654
CF_y	0,467
CF_x	-0,122
CM_y	0,099
CM_z	-0,061
CM_x	-0,355

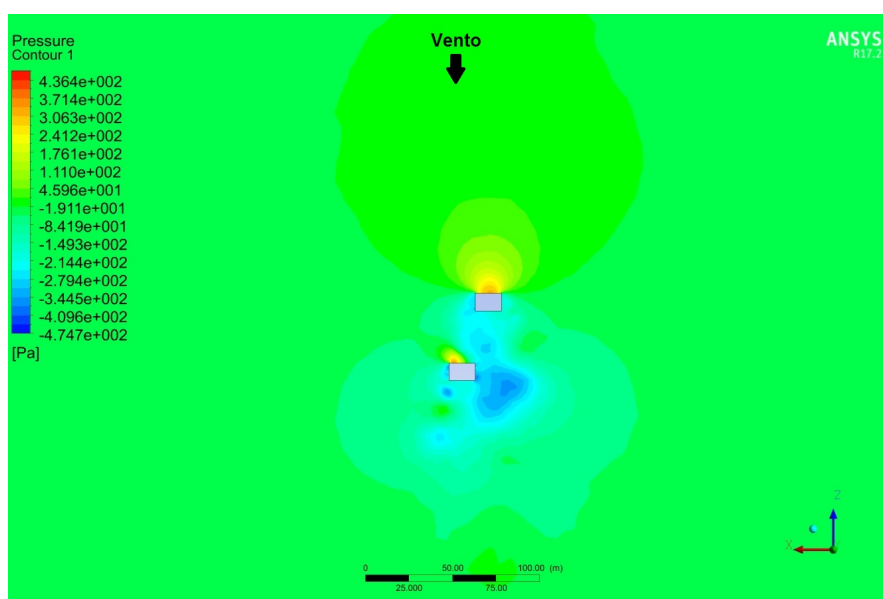


Figura 6.26 – Configuração IC - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

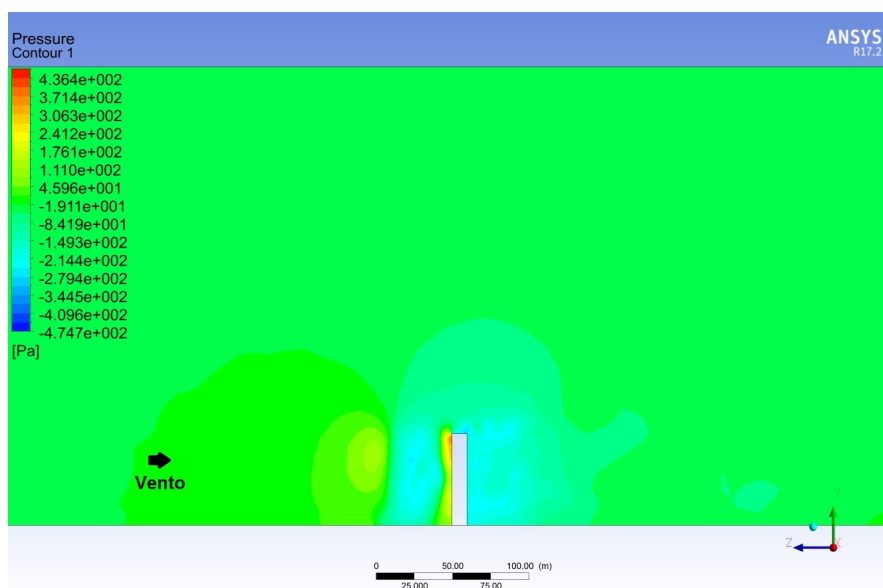


Figura 6.27 – Configuração IC - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.7 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIA

	Configuração IIA
CF_z	-0,038
CF_y	0,407
CF_x	0,160
CM_y	-0,019
CM_z	0,111
CM_x	0,031

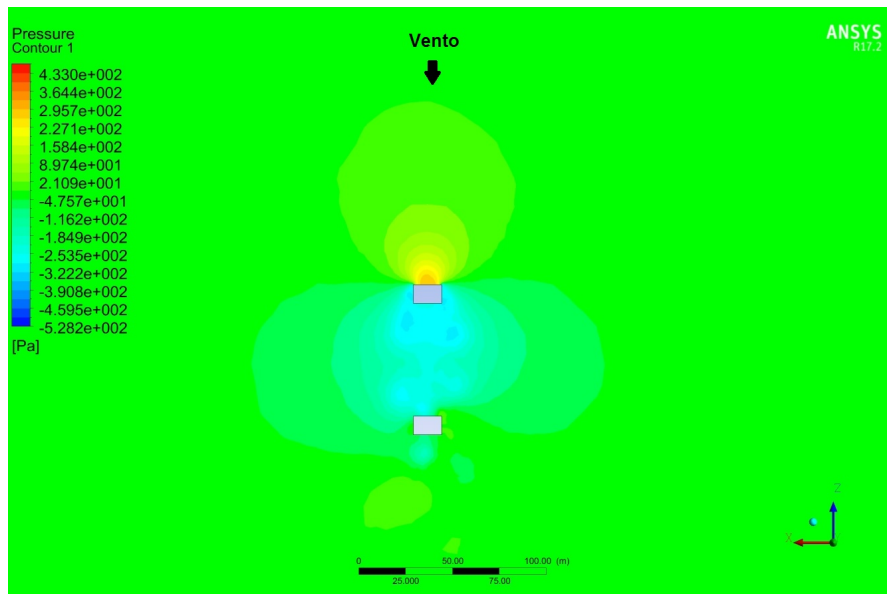


Figura 6.28 – Configuração IIA - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

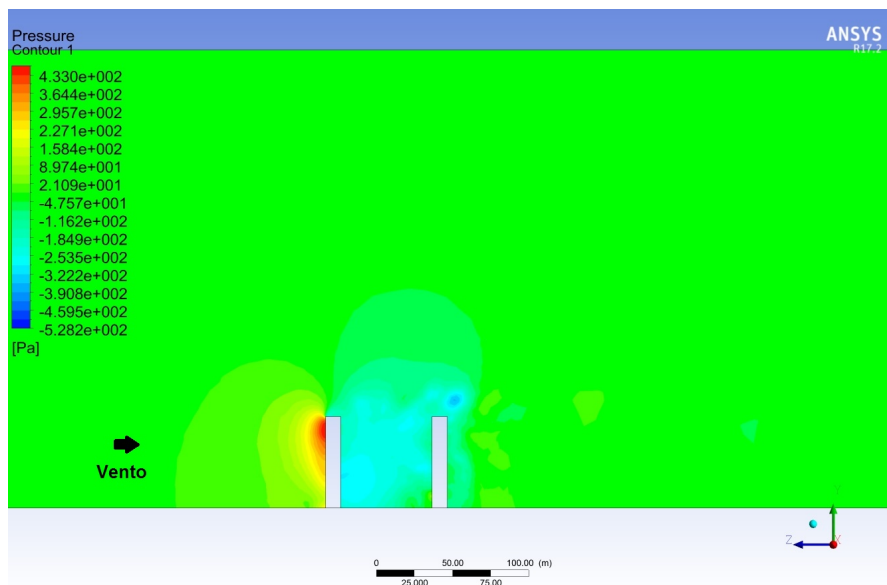


Figura 6.29 – Configuração IIA - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.8 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIB

	Configuração IIB
CF_z	0,325
CF_y	0,076
CF_x	-0,533
CM_y	0,042
CM_z	-0,265
CM_x	-0,145

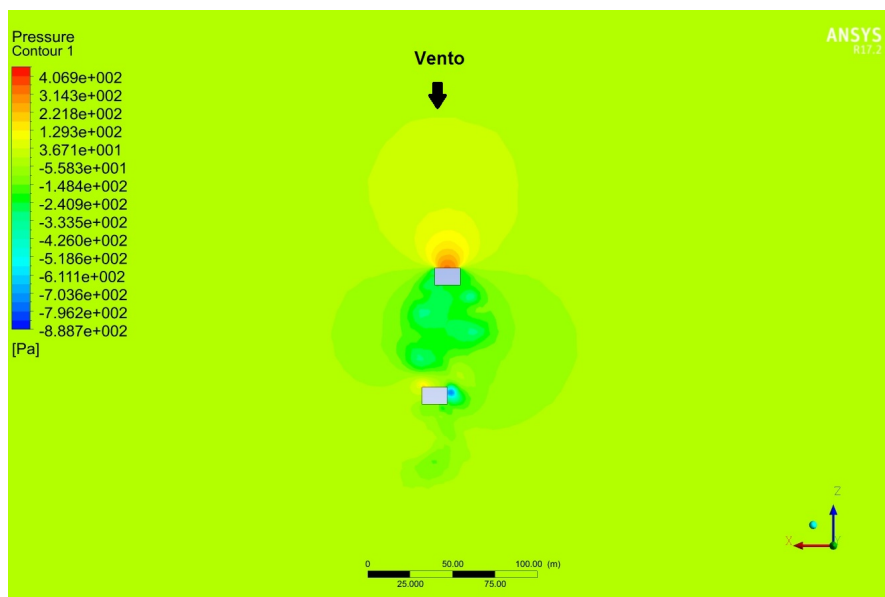


Figura 6.30 – Configuração IIB - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

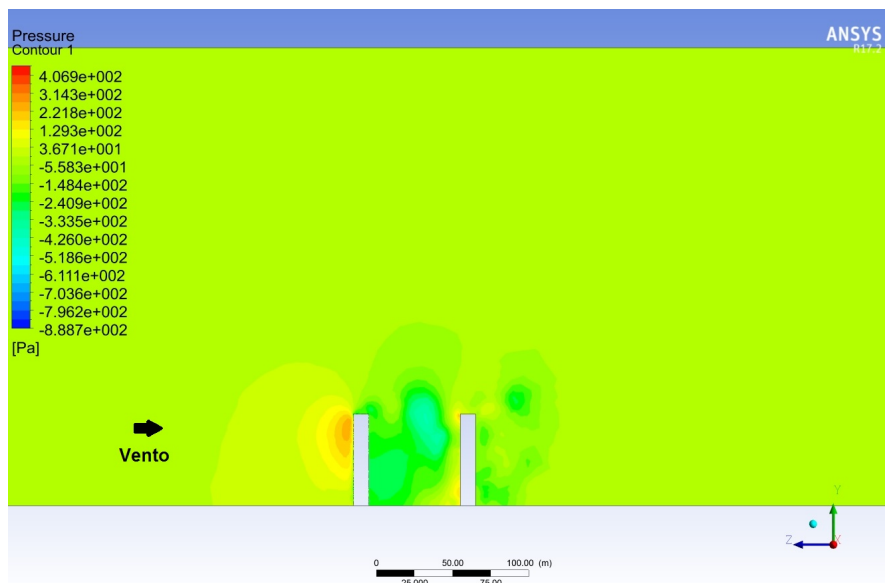


Figura 6.31 – Configuração IIB - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.9 – Coeficientes de força e momento - Edifício com vizinhança IIC

	Configuração IIC
CF_z	0,575
CF_y	0,560
CF_x	0,027
CM_y	0,088
CM_z	0,024
CM_x	-0,274

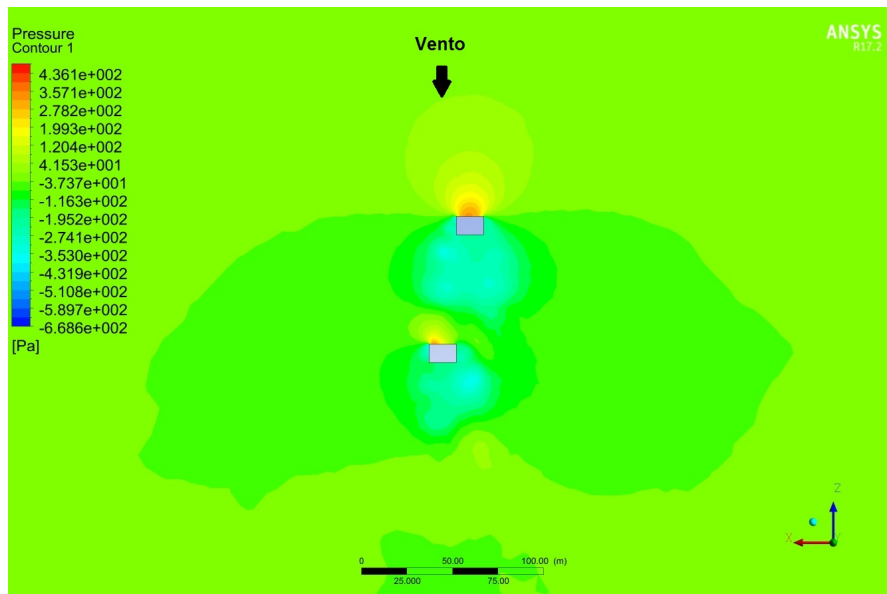


Figura 6.32 – Configuração IIC - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

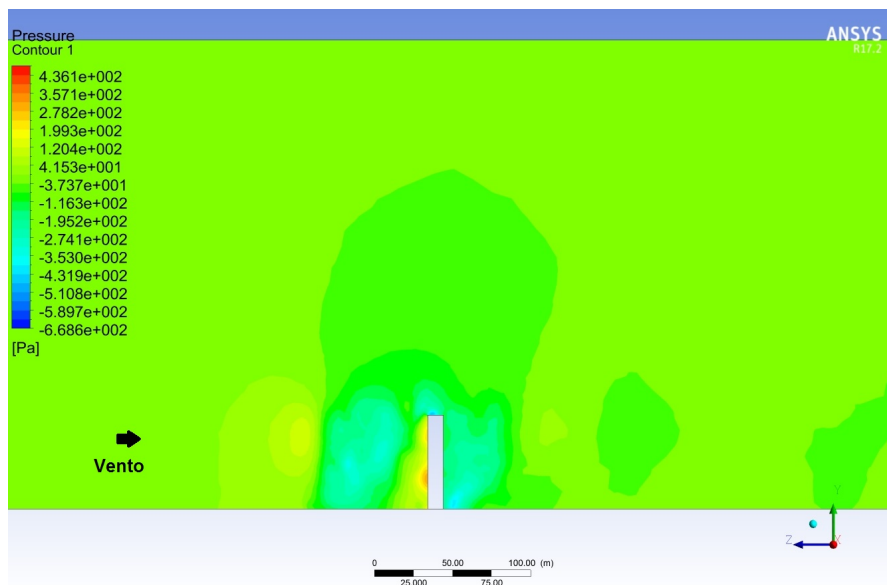


Figura 6.33 – Configuração IIC - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.10 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIIA

	Configuração IIIA
CF_z	0,603
CF_y	0,745
CF_x	-0,174
CM_y	0,007
CM_z	-0,172
CM_x	-0,394

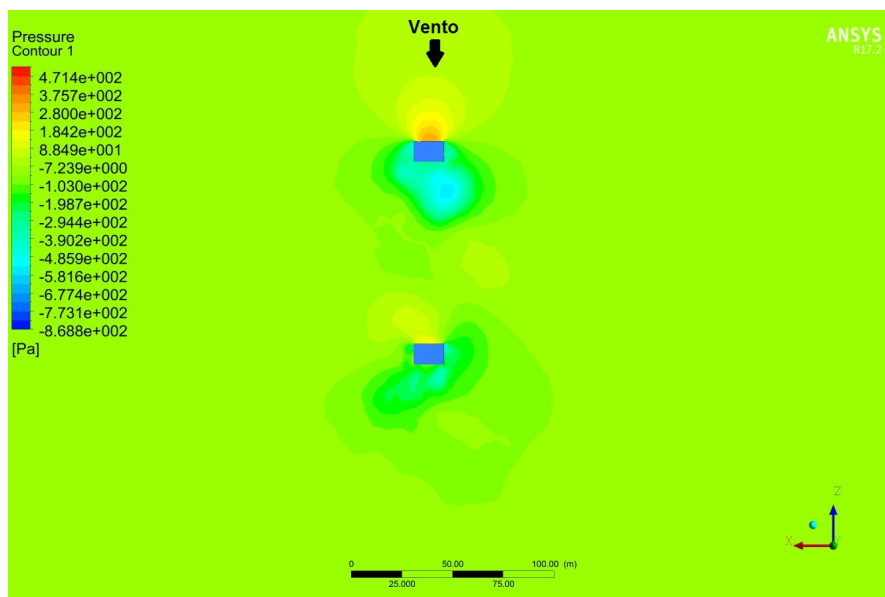


Figura 6.34 – Configuração IIIA - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

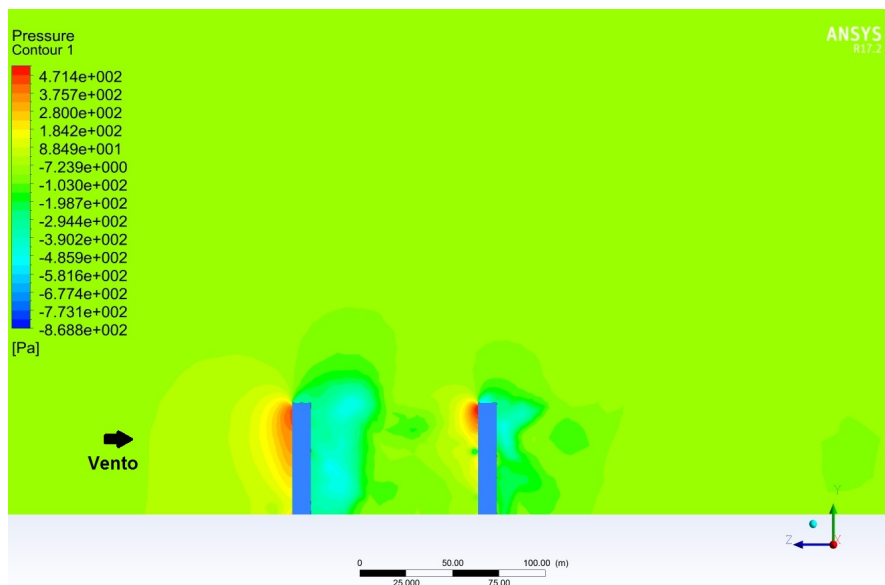


Figura 6.35 – Configuração IIIA - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.11 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIIB

	Configuração IIIB
CF_z	0,359
CF_y	0,420
CF_x	0,057
CM_y	0,023
CM_z	-0,015
CM_x	-0,153

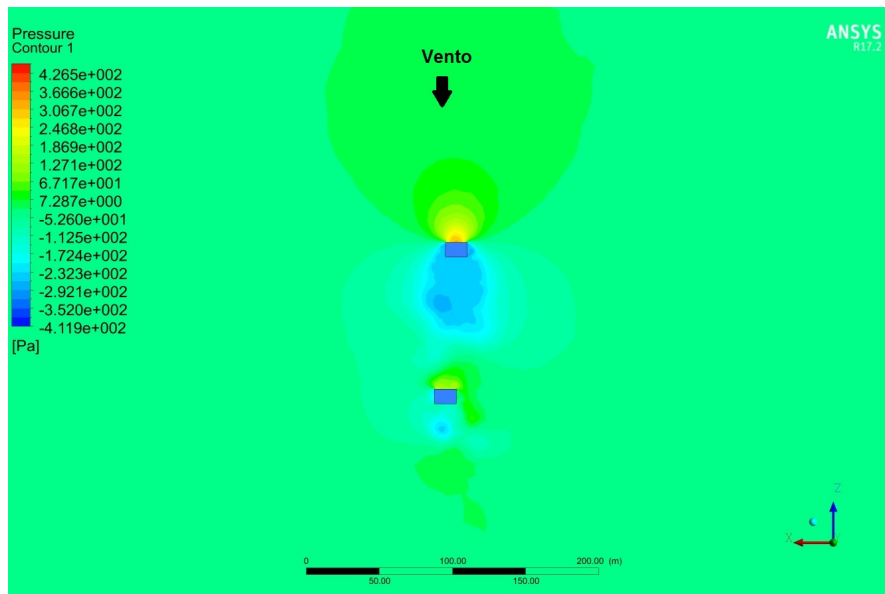


Figura 6.36 – Configuração IIIB - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

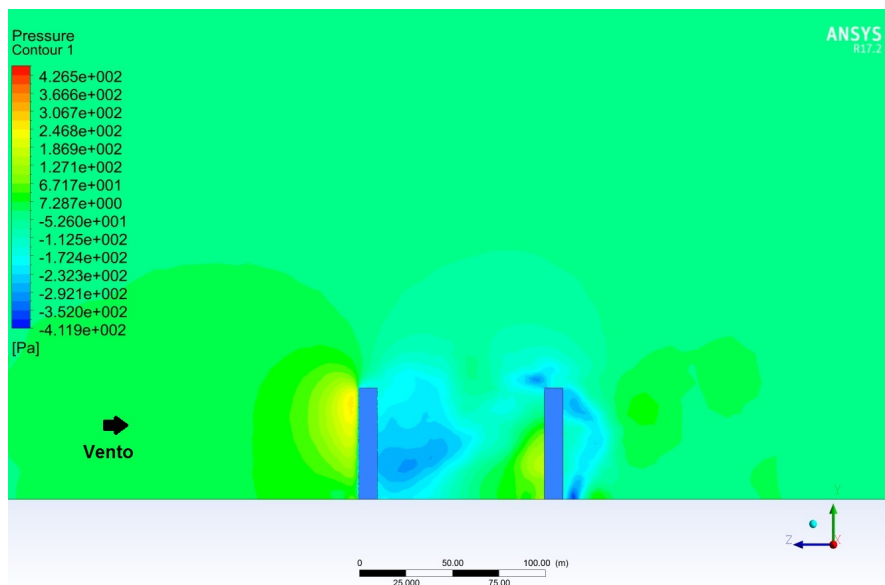


Figura 6.37 – Configuração IIIB - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Tabela 6.12 – Coeficientes médios de força e momento - Edifício com vizinhança IIC

	Configuração IIC
CF_z	0,541
CF_y	0,377
CF_x	0,011
CM_y	0,053
CM_z	-0,005
CM_x	-0,271

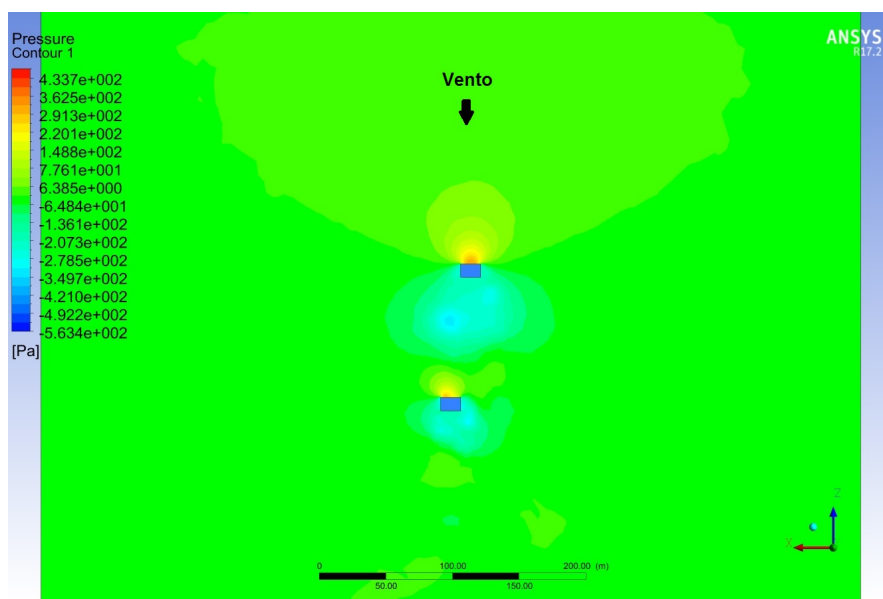


Figura 6.38 – Configuração IIC - Campo de pressão em plano horizontal $y=30,0m$

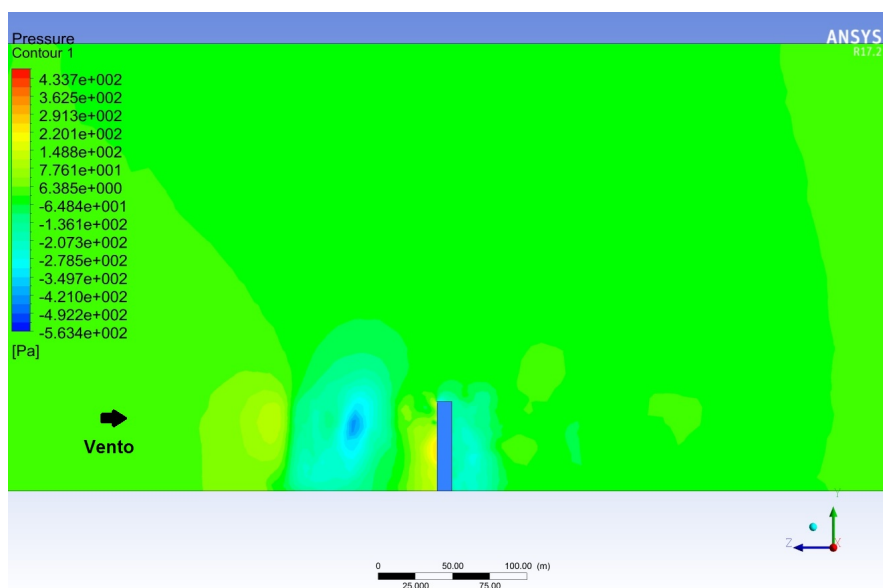


Figura 6.39 – Configuração IIC - Campo de pressão em plano vertical no eixo do modelo

Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a disposição qualitativa dos edifícios. As configurações IA, IB e IIA apresentaram coeficientes negativos na direção do escoamento (CF_z), que representam a sucção na face frontal do modelo. Esta sucção é resultante da zona de baixa pressão gerada pelo edifício vizinho colocado a barlavento. Nas configurações IC, IIB, IIC, IIIA, IIIB e IIIC a zona de baixa pressão a sotavento do edifício vizinho não esteve próxima o suficiente do edifício modelo para provocar sucção; nestas condições, verificou-se apenas uma diminuição na intensidade da sobrepressão.

Como esperado, as configurações de vizinhança B apresentaram coeficientes de torção (CM_y) maiores do que nas configurações de vizinhança A para os mesmos espaçamentos (I, II e III). De forma semelhante, as configurações C tiveram valores de torção superiores à configuração B, também considerando os mesmos afastamentos entre as estruturas. Este aumento decorre do desalinhamento entre os edifícios e é justificado pela excentricidade na aplicação da carga de vento no modelo nestas condições (ver Figura 2.4).

A análise do campo de pressão através dos planos horizontais mostra, em todos os casos, uma zona de sobrepressão concentrada na fachada frontal do edifício vizinho a barlavento, onde surgem pontos de estagnação (velocidade nula e pressão estática máxima). Nas vizinhanças IC, IIB, IIC, IIIB e IIIC verifica-se também o aparecimento de pressões positivas concentradas do lado esquerdo da fachada frontal do edifício modelo, que justificam os coeficientes de torção supracitados. Pressões positivas podem ser identificadas também na fachada a barlavento do modelo na vizinhança IIIA, onde o afastamento entre as estruturas é suficientemente grande para que o modelo não seja atingido pela sucção a sotavento da edificação vizinha.

Em todos os casos de vizinhança, tem-se o desprendimento de vórtices tridimensionais na esteira do edifício vizinho onde predominam as baixas pressões. Como já discutido anteriormente, os turbilhões surgem na separação da camada limite nas regiões próximas às arestas vivas dos edifícios e aumentam a turbulência do escoamento na região; visto que os vórtices são espaciais, sua disposição é menos clara e organizada do que nos casos planos, em que o campo de pressão apresenta um caráter mais simétrico e previsível (ver Figura 5.7).

Através dos planos verticais, o campo de pressão mostra, como nos casos anteriores, a concentração de pressões positivas na região superior da fachada frontal do edifício e a zona de separação do escoamento na cobertura do edifício gerando forças de sustentação para cima. Note-se que, nas vizinhanças A, o plano mostrado passada pelo eixo das duas estruturas, nas vizinhanças B, o plano mostrado coincide com o plano lateral do edifício vizinho e, nas vizinhanças C, o edifício vizinho não é visível.

Além das 9 configurações de vizinhança já apresentadas, outros 3 ensaios foram realizados aumentando-se o afastamento dos edifícios a partir da configuração A, como

mostram as Figuras 6.40, 6.41 e 6.42.

Configuração IVA

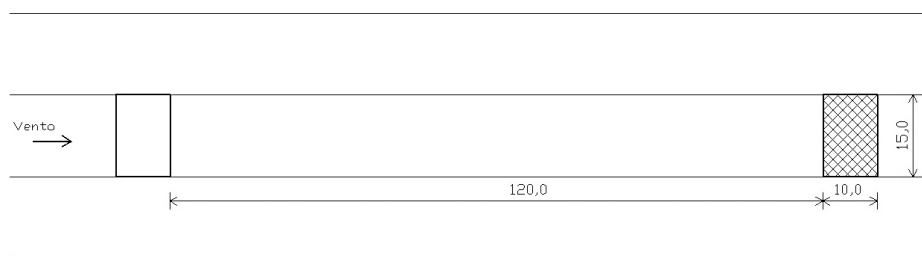


Figura 6.40 – Configuração de vizinhança IVA. Dimensões em metros

Configuração VA

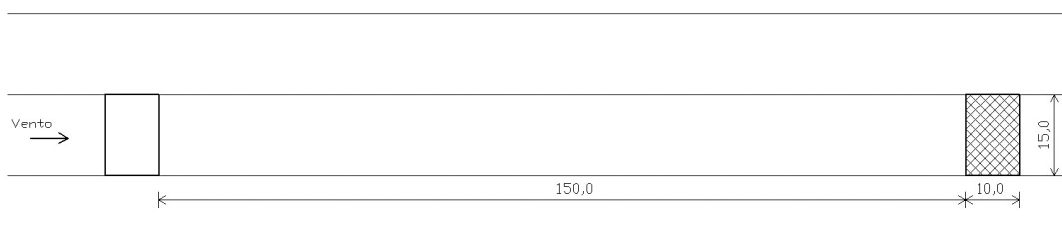


Figura 6.41 – Configuração de vizinhança VA. Dimensões em metros

Configuração VIA

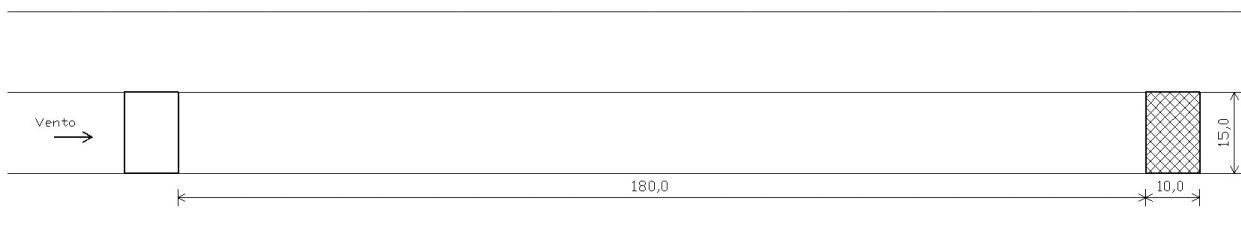


Figura 6.42 – Configuração de vizinhança VIA. Dimensões em metros

Os coeficientes médios de força e momento para as vizinhanças supracitadas são apresentados na Tabela 6.13.

Os coeficientes de força na direção do escoamento (CF_z) mostram que, quanto maior a distância entre o modelo e o edifício vizinho, mais estes valores aproximam-se daqueles obtidos para o modelo em sua condição isolada. A partir desses resultados, pode-se inferir que a distância entre o modelo e a vizinhança tende a ser inversamente proporcional à influência do entorno na força aplicada na direção do escoamento. O mesmo não pode ser afirmado para as forças nas demais direções e para os momentos, que não

Tabela 6.13 – Coeficientes médios de força e momento - Vizinhanças IVA, VA e VIA

	Ref. isolado <i>one way</i>	Config. IVA	Config. VA	Config. VIA
CF_z	0,881	0,721	0,770	0,875
CF_y	0,452	0,871	0,787	0,607
CF_x	0,002	0,239	0,301	0,236
CM_y	0,005	0,011	-0,019	0,039
CM_z	0,009	0,076	0,170	0,088
CM_x	-0,485	-0,448	-0,398	-0,439

apresentam tendência linear e, mesmo na condição de vizinhança VIA, onde o afastamento é igual a 3 vezes a altura do modelo, ainda apresentam-se coeficientes bastante distintos daqueles calculados para o modelo isolado. Em VIA, por exemplo, o coeficiente CF_x , que apresentava valor aproximadamente nulo na condição isolada, atingiu um coeficiente de 0,236; e o coeficiente CF_y teve aumento de 34% em relação ao modelo sem vizinhança.

Resultados semelhantes a estes foram encontrados por [Bênia \(2013\)](#) através de ensaios em túnel de vento. A autora afirma que a presença de um único edifício vizinho igual ao modelo, sendo colocado a barlavento, oferece efeito de proteção, em termos da força longitudinal média (no presente trabalho expresso por CF_z), e que este efeito diminui quando aumenta-se a distância entre as duas estruturas. Quanto às forças verificadas nas demais direções, os resultados são mais complexos e difíceis de serem sistematizados e resumidos em uma tendência clara e previsível de interferência, o que ratifica a complexidade presente nos fenômenos de vizinhança.

A Tabela 6.14 apresenta os fatores de vizinhanças referentes ao coeficiente de arrasto (força na direção do escoamento, isto é, CF_z) para cada uma das configurações apresentadas anteriormente.

Tabela 6.14 – Fator de Vizinhança referente a CF_z

Vizinhança	FV
IA	-0,13
IB	-0,05
IC	0,74
IIA	-0,04
IIB	0,37
IIC	0,65
IIIA	0,69
IIIB	0,41
IIIC	0,61
IVA	0,82
VA	0,87
VIA	0,99

Apesar de os coeficientes de força na direção do escoamento terem sido reduzidos em todos os casos de vizinhança quando comparados com o modelo isolado, a inversão de esforços (de sobrepressão para sucção) é um fenômeno importante que deve ser previsto na etapa de projeto da estrutura. A análise da Tabela 6.14 mostra valores negativos para FV que não são previstos pela NBR 6123 e que implicam em inversão de esforços na fachada frontal, de sobrepressão para sucção; esta mudança no sentido das ações pode inverter o sentido dos esforços na estrutura (por exemplo, nos pilares na fachada frontal e posterior), além de influenciar no dimensionamento de elementos construtivos e de vedação. Como explanado na seção 2.3, a norma prevê valores de FV entre 1,0 e 1,3 e, assim, ratifica-se insuficiência de suas prescrições para todos os casos de interferência da vizinhança.

Portanto, ratifica-se a importância dos efeitos da vizinhança no cálculo das pressões de vento sobre uma estrutura, tendo em vista o aparecimento de esforços não previstos na análise do modelo isolado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como exposto neste texto, a tendência de verticalização das edificações tem demandado uma série de estudos de ações de vento sobre as estruturas nas últimas décadas. Edifícios flexíveis, como os modernos e arrojados arranha-céus que compõem a silhueta dos grandes centros urbanos, são particularmente susceptíveis às ações aerodinâmicas. Esta tendência, associada a: limitações das normas de cálculo de pressões de vento, alto custo dos laboratórios com túneis de vento e avanços na computação, criaram o ambiente propício ao desenvolvimento da Engenharia do Vento Computacional.

Como um ramo relativamente recente dentro da engenharia, a EVC ainda encontra-se pouco difundida na academia brasileira e menos ainda no mercado da construção civil, ambiente historicamente conservador quanto à adoção de novas tecnologias, embora louváveis exceções sempre possam ser apontadas. Apesar disso, a aplicação de modelagem computacional mostra-se promissora para resolução de problemas de vento e pode suprir uma demanda crescente no Brasil, onde a disponibilidade de túneis de vento é particularmente escassa, visto que os estudos em EVC tem apresentado resultados cada vez mais sólidos e confiáveis.

O presente trabalho propôs-se a contribuir no desenvolvimento de estudos relacionados aos efeitos de vizinhança na ação do vento. Foi apresentada a contextualização do problemas de vento, os estudos recentes relacionados à interferência da vizinhança, os principais efeitos aerodinâmicos verificados em estruturas e as equações que governam os problemas de fluidos. Também foram discutidas as limitações da NBR 6123 e da utilização dos ensaios experimentais em túnel de vento.

Para garantir a acurácia do modelo numérico utilizado, foram realizados ensaios de validação balizados com resultados numérico-computacionais e experimentais (em túnel de vento) disponíveis na literatura. Os ensaios foram feitos em grau crescente de complexidade, desde simulações bidimensionais em torno de um cilindro até análises tridimensionais de um edifício com efeito de vizinhança. Os resultados obtidos nesta etapa mostraram-se bastante coerentes com aqueles calculados através de outras modelagens computacionais, túneis de vento e até, nos casos bidimensionais mais simples, relativamente próximos à norma de Vento NBR 6123. A validação do modelo utilizado no presente trabalho ratifica sua acurácia, confirma-o como uma alternativa viável para solução de problemas de vento e serviu de fundamentação para os ensaios subsequentes.

Para os ensaios definitivos propostos neste trabalho, foi adotada uma edificação vertical que foi simulada como modelo aerodinâmico (*FSI one way*) e como modelo aeroelástico (*FSI two way*). A análise dos coeficientes aerodinâmicos levou à escolha do modelo *one way*, que apresentou bons resultados e um custo computacional consideravelmente menor. Embora possa se argumentar que o modelo *two way* seja mais realista do que o *one way*, o tempo de análise do primeiro foi mais de 15 vezes superior ao do segundo, tornando-o inviável para utilização em situações que exigem grande quantidade de testes e possuem tempo e capacidade computacional limitados, sendo uma abordagem melhor apropriada por sistemas computacionais na forma de *clusters*, supercomputação e/ou computação paralela, objetos de análise recomendados para trabalhos futuros, e além do escopo da presente investigação.

A edificação proposta foi simulada em 12 configurações de vizinhança, que tiveram resultados qualitativa e quantitativamente coerentes com a disposição adotada. Os coeficientes obtidos nestas análises ratificaram a importância dos efeitos de vizinhança e a necessidade de sua consideração. Embora a maioria das configurações tenha proporcionado um efeito de proteção ao modelo analisado no que diz respeito à força aplicada na direção do escoamento, em muitos casos observou-se uma inversão dos esforços na edificação, além do aparecimento de forças e momentos nas direções transversal e vertical que não existiam de forma significativa na situação da estrutura isolada. Naturalmente, estas condições devem ser previstas nos projetos estruturais para garantir a segurança e economia dos processos de dimensionamento. Inclusive, deve-se prever situações hipotéticas futuras que ofereçam efeitos danosos na estrutura, tendo em vista possibilidade de modificação da vizinhança ao longo da vida útil da edificação.

De uma forma geral, os resultados das análises realizadas com o Fluid Flow (Fluent) no *Ansys Workbench* confirmam resultados de autores como Braun (2007), Menter et al. (2006), Akins, Peterka e Cermak (1977), Fontes (2003) e Bênia (2013), e ratificam sua validade.

Espera-se que através do avanço dos estudos em EV especialmente quanto aos efeitos de vizinhança e o crescimento da literatura cobrindo maior quantidade de casos específicos, os conhecimentos adquiridos possam ser eventualmente sistematizados em prescrições normativas, em especial na revisão da NBR 6123 ou em uma nova norma NBR complementar especificando métodos de modelagem, simulação e cálculo computacionais para avaliação de ações eólicas sobre edificações, que considerem esses efeitos de forma otimizada e facilitem sua aplicação em projetos de engenharia.

Portanto, o presente trabalho atendeu à análise proposta de evidenciar a relevância dos efeitos de interferência da vizinhança na previsão das cargas de vento em estruturas. Também ratifica-se a viabilidade da utilização de modelagens numérico-computacionais para resolução de problemas de vento como uma alternativa aos tradicionais métodos

experimentais e/ou baseados em normas.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se mencionar: o refinamento dos casos de vizinhança adotando diferentes espaçamentos entre os modelos, a variação das dimensões das edificações, a análise da influência da geometria (edificações triangulares, circulares etc.) e a avaliação do modelo aeroelástico com maior flexibilidade alterando-se sua seção transversal ou propriedades mecânicas.

Referências

AKINS, R. E.; PETERKA, J. A.; CERMAK, J. E. Mean force and moment coefficients for buildings in turbulent boundary layers. *Journal of industrial aerodynamics*, Amsterdam, n. 2, p. 195–209, 1977. Citado 4 vezes nas páginas 76, 78, 79 e 117.

ALMINHANA, G. W. A numerical study on the aerodynamic performance of building cross-sections using corner modifications. *Latin American Journal of Solids and Structures*, São Paulo, v. 7, n. 15, 2018. Citado na página 46.

AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS. *AIAA G-077-1998*: Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. Reston, 1998. Citado na página 37.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123*: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. Citado 4 vezes nas páginas xi, 22, 25 e 27.

AWRUCH, A. M.; BRAUN, A. L.; GRECO, M. Engenharia do vento computacional e suas aplicações na engenharia civil. análise aerodinâmica e aeroelástica. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, Barcelona, v. 1, n. 31, p. 55–64, 2015. Citado 9 vezes nas páginas xii, 38, 39, 43, 46, 47, 58, 59 e 91.

BAIRAGI, A. K.; DALUI, S. K. Aerodynamic effects on setback tall building using cfd simulation. *2nd ICADVC*, Durgapur, n. 2, p. 381–388, 2018. Citado na página 46.

BILLAH, K. Y.; SCANLAN, R. H. Resonance, Tacoma narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks. *American Association of Physics Teachers*, San Diego, v. 2, n. 59, p. 118–124, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 21.

BLESSMANN, J. Buffeting effects on neighbouring tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 18, p. 105–110, 1985. ISSN 0167-6105. Citado 4 vezes nas páginas xi, 20, 29 e 30.

BLESSMANN, J. *Acidentes Causados pelo Vento*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1986. (Série Engenharia Estrutural, 2). Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 7.

BLESSMANN, J. Neighbouring wind effects on two tall buildings. *Journal of wind and industrial aerodynamics*, Porto Alegre, v. 41-44, p. 1041–1052, 1992. ISSN 0167-6105. Citado 5 vezes nas páginas xi, 4, 26, 30 e 31.

BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1995. Citado na página 17.

BLESSMANN, J. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 14, 17, 20 e 21.

- BLESSMANN, J. *Pressão interna*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013. Citado na página 18.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; BEECK, J. P. A. J. van. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and cfd techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, Amsterdam, v. 100, p. 50–81, 2016. ISSN 0360-1323. Citado na página 46.
- BÊNIA, M. C. D. *Determinação dos Efeitos de Vizinhança na Resposta Dinâmica de Edifícios Altos Sob Ação do Vento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, set. 2013. Citado 10 vezes nas páginas xi, 4, 12, 32, 33, 34, 91, 93, 114 e 117.
- BRAUN, A. L. *Simulação numérica na engenharia do vento incluindo efeitos de interação fluido-estrutura*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Citado 17 vezes nas páginas xi, xiii, 18, 36, 37, 58, 59, 60, 66, 67, 70, 76, 77, 78, 79, 91 e 117.
- BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. Simulação numérica na engenharia do vento. *Revista sul-americana de engenharia estrutural*, Passo Fundo, v. 5, n. 2/3, p. 81–102, 2009. Citado 5 vezes nas páginas xii, 37, 38, 43 e 47.
- CARPEGGIANI, E. A. *Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devido à ação do vento*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2004. Citado 2 vezes nas páginas xi e 17.
- CARRERA, F. H. *Estudo numérico para a determinação das pressões devidas a ação do vento em torres metálicas de seção circular*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, ago. 2007. Citado 2 vezes nas páginas xi e 23.
- COOK, N. J. *The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: background, damage survey, wind data and structural classification*. Londres: Butterworths, 1985. Citado 6 vezes nas páginas xi, 14, 19, 21, 85 e 97.
- COOK, N. J. *The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: static structures*. Londres: Butterworths, 1990. Citado 3 vezes nas páginas xiii, 85 e 87.
- FILHO, C. M. C. *Cidades Brasileiras: Seu Controle ou o Caos*. São Paulo: Studio Nobel, 1992. Citado na página 2.
- FISHBAUGH, W. A. *Rebuilding of the Meyer-Kiser Bank building after the 1926 hurricane - Miami, Florida*. 1927. Disponível em: <<https://www.floridamemory.com/items/show/40384>>. Acesso em: 07 mar. 2019. Citado 2 vezes nas páginas xi e 8.
- FONTES, A. C. D. *Importância dos Efeitos de Vizinhança na Resposta Dinâmica de um Edifício à Ação do Vento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, fev. 2003. Citado 4 vezes nas páginas 2, 83, 84 e 117.
- GABBI, R. *Modelagem Matemática do Escoamento Turbulento em Cana Axissimétrico com "Bluff-Body"*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, jun. 2013. Citado na página 58.

- GUNAWARDENA, T. et al. Wind analysis and design of tall buildings, the state of the art. *8th Internacional conference on structural engineering and construction management*, Colombo, p. 2–10, 2017. Citado 5 vezes nas páginas [xii](#), [38](#), [39](#), [40](#) e [46](#).
- HARRIS, C. L. Influence of neighboring structures on the wind pressure on tall buildings. *Bureau of standards journal of research*, Washington, v. 12, p. 103–118, 1934. Citado 2 vezes nas páginas [xi](#) e [28](#).
- HAYWOOD, L. *Main front of Lincoln Cathedral, 2009*. 2009. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Main_front_of_Lincoln_Cathedral,_2009.jpg>. Acesso em: 17 fev. 2020. Citado 3 vezes nas páginas [xi](#), [2](#) e [3](#).
- HISTORY, M. *Meyer-Kiser Building sold for \$9.2M*. 2015. Disponível em: <<http://miami-history.com/news/meyer-kiser-building-sold-for-9-2m/>>. Acesso em: 07 mar. 2019. Citado na página [7](#).
- HOUGHTON, E. L.; CARRUTHERS, N. B. *Wind forces on buildings and structures*. Londres: Edward Arnold Publishers, 1976. Citado 2 vezes nas páginas [xi](#) e [15](#).
- JONES, D. *Tudo Sobre Arquitetura*. Londres: Sextante, 2014. Citado na página [1](#).
- KHANDURI, A. C.; STATHOPOULOS, T.; BÉDARD, C. Wind-induced interference effects on buildings - a review of the state-of-the-art. *Engineering structures*, v. 20, n. 7, p. 617–630, 1998. Citado 2 vezes nas páginas [31](#) e [43](#).
- KIM, W.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings. *Journal of wind and industrial aerodynamics*, v. 147, p. 186–201, 2015. ISSN 0167-6105. Citado 2 vezes nas páginas [xii](#) e [34](#).
- LIBERATO, R. *All Gizah Pyramids*. 2006. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:All_Gizah_Pyramids.jpg>. Acesso em: 17 fev. 2020. Citado 2 vezes nas páginas [xi](#) e [1](#).
- LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. *Escola de Primavera de Transição e Turbulência - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*, Porto Alegre, n. IV, 2004. Citado 6 vezes nas páginas [xi](#), [xii](#), [11](#), [40](#), [41](#) e [42](#).
- MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. [S.l.]: LTC, 2004. Citado 3 vezes nas páginas [48](#), [62](#) e [63](#).
- MENTER, F. et al. Overview of fluid-structure coupling in ansys-cfx. *25th International conference on offshore mechanics and artic engineering*, Hamburg, p. 1–7, 2006. Citado 3 vezes nas páginas [74](#), [75](#) e [117](#).
- MUKHERJEE, S.; BAIRAGI, A. K. Interference effect on principal building due to setback tall building under wind excitation. *SEC18: Proceedings of the 11th Structural Engineering Convention*, West Bengal, n. 20180306, p. 13–18, 2018. Citado na página [46](#).
- MUNSON, B. R. et al. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Jefferson City: John Wiley & Sons, 2009. Citado 2 vezes nas páginas [xii](#) e [57](#).
- MURAD, M. *Notas de Aula: Modelagem de Sistemas Contínuos*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado 4 vezes nas páginas [xii](#), [49](#), [50](#) e [51](#).

- MURAKAMI, S. Current status and future trends in computational wind engineering. *Journal of wind and industrial aerodynamics*, Amsterdam, v. 67 e 68, p. 3–34, 1997. Citado 7 vezes nas páginas 6, 36, 45, 46, 58, 59 e 61.
- NASCIMENTO, A. V.; BONO, G. F. F.; BONO, G. Determinação das forças devidas ao vento em edificações com diferentes inclinações do telhado segundo a nbr 6123 e a engenharia do vento computacional. *Mecânica Computacional - Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, La Plata, XXXV, p. 2381–2390, 2017. Citado na página 44.
- NETO, A. S. *Fundamentos da turbulência nos fluidos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2002. Citado na página 45.
- NETTO, A. *Manual de Hidráulica*. São Paulo: Blucher, 1998. Citado 3 vezes nas páginas xi, 6 e 18.
- NUNEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. *Design e Tecnologia*, Porto Alegre, v. 2, n. 4, p. 10–23, 2012. ISSN 2178-1974. Citado 6 vezes nas páginas xii, 29, 36, 40, 42 e 43.
- OLIVEIRA, M. G. K. de. *Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudo do efeito de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Citado na página 32.
- PASQUAL, T. C. S. *Estudo Sobre a Ação do Vento Nas Estruturas de Membrana*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, dez. 2011. Citado na página 24.
- PICCOLI, G. L. *Análise numérica na engenharia do vento computacional empregando computação de alto desempenho e simulação de grandes escalas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, maio 2009. Citado 4 vezes nas páginas 45, 46, 58 e 59.
- PRAVIA, Z. M. C.; DREHMER, G. A. *Estruturas de Aço*. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, 2004. Citado 4 vezes nas páginas xi, 12, 20 e 26.
- PRESS, A. *A Tacoma Narrows 'Galloping Gertie' bridge-collapse surprise, 75 years later*. 1940. Disponível em: <<https://www.seattlepi.com/science/article/A-Tacoma-Narrows-Galloping-Gertie-bridge-6617030.php>>. Acesso em: 07 mar. 2019. Citado 2 vezes nas páginas xi e 8.
- RAUSCH, E. *Maschinenfundamente und andere dynamische Bauaufgabe*. Berlin: VDI Verlag GmbH, 1973. Citado na página 17.
- RESEARCH GATE. *Von Kármán vortex street experiment*. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/on-Karman-vortex-street-experiment_fig8_291821947>. Acesso em: 06 dez. 2018. Citado 2 vezes nas páginas xi e 20.
- RIERA, J. D. et al. Estudo de vibrações no edifício do banco nacional (sp) visando a avaliação de sua confiabilidade e desempenho sob ação do vento. *Relatório do LDEC/LAC 94*, Porto Alegre, n. 3, 1994. Citado na página 83.

- SANGALLI, L. A. *Análise numérica da ação do vento sobre pontes com sistemas de controle de vibração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, maio 2009. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 58.
- SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering*. New York: Wiley-Interscience, 1996. Citado na página 21.
- SOUSA, M. A. A. de. *A Identidade da Metrópole. A Verticalização em São Paulo*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. Citado na página 2.
- STATHOPOULOS, T. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. *Journal of wind and industrial aerodynamics*, Amsterdam, v. 67 e 68, p. 509–532, 1997. Citado 6 vezes nas páginas 36, 37, 43, 46, 58 e 59.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME V&V 20-2009: Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer*. New York, 2009. Citado na página 37.
- THORDAL, M. S.; BENNETSEN, J. C.; KOSS, H. H. H. Review for practical application of cfd for the determination of wind load on high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, n. 186, p. 155–168, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 6, 46, 47 e 64.
- TUTAR, M.; OGUZ, G. Computational modeling of wind flow around a group of buildings. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, London, v. 18, n. 8, p. 651–670, 2007. ISSN 1029-0257. Citado na página 46.
- VIEIRA, G. S.; BRITO, J. L. V.; LOREDO-SOUZA, A. M. Experimental study of the neighbourhood effects on the mean wind loading over two equivalent high-rise buildings. *Latin american journal of solids and structures*, São Paulo, v. 3, n. 15, p. 1–15, 2018. Citado 4 vezes nas páginas xii, 26, 27 e 35.
- WANDERLEY, J. B. V.; LEVI, C. A. Validation of a finite difference method for the simulation of vortex-induced vibrations on a circular cylinder. *Ocean engineering*, v. 29, p. 445–460, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- WANG, X. Analytical and computational approaches for some fluid-structure interaction analyses. *Computers and Structures*, Atlanta, n. 72, p. 423–433, 1999. Citado na página 74.
- WISE, A. F. E. Effects due to groups of buildings. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Garston, v. 269, p. 469–485, 1971. Citado 4 vezes nas páginas xi, 15, 16 e 29.