

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE NUMÉRICA DA VENTILAÇÃO E MITIGAÇÃO DE  
CARGAS AERODINÂMICAS EM EDIFICAÇÕES BAIXAS  
USANDO SPOILERS COM CONTROLE PID**

**Gabriela Penna Bianchin**

Porto Alegre  
2021

GABRIELA PENNA BIANCHIN

**ANÁLISE NUMÉRICA DA VENTILAÇÃO E MITIGAÇÃO DE  
CARGAS AERODINÂMICAS EM EDIFICAÇÕES BAIXAS  
USANDO SPOILERS COM CONTROLE PID**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre  
2021

**GABRIELA PENNA BIANCHIN**

**ANÁLISE NUMÉRICA DA VENTILAÇÃO E MITIGAÇÃO DE  
CARGAS AERODINÂMICAS EM EDIFICAÇÕES BAIXAS  
USANDO SPOILERS COM CONTROLE PID**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada como requisito para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração (Estruturas), e aprovada em sua forma total pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 05 de Maio de 2021

**Prof. Alexandre Luis Braun**  
Dr. pela UFRGS  
orientador

**Prof. Nilo Cesar Consoli**  
PhD. pela Concordia University, Canadá  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Acir Mércio Loredou-Souza (LAC/UFRGS)**  
Ph.D. pela University of Western Ontario, Canadá

**Prof. Álvaro Luiz de Bortoli**  
**(PPGMAp/UFRGS)**  
D.Sc. pelo POSMEC/UFSC

**Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Renato Vaz Linn (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

### CIP - Catalogação na Publicação

Bianchin, Gabriela Penna  
ANÁLISE NUMÉRICA DA VENTILAÇÃO E MITIGAÇÃO DE  
CARGAS AERODINÂMICAS EM EDIFICAÇÕES BAIXAS USANDO  
SPOILERS COM CONTROLE PID / Gabriela Penna Bianchin.  
-- 2021.  
170 f.  
Orientador: Alexandre Luis Braun.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2021.

1. Engenharia do Vento Computacional (EVC). 2.  
Método CBS Semi-Implícito. 3. Simulação de Grandes  
Escalas ("LES"). 4. Controle PID. 5. Edifícios Baixos.  
I. Braun, Alexandre Luis, orient. II. Título.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Alexandre Braun, orientador, pela disponibilidade e paciência ao transmitir seu conhecimento, ajudar em momentos difíceis e ser imprescindível para a realização e conclusão deste trabalho.

Aos meus pais (Rita e Ladimir) e meu irmão Eduardo que, apesar da distância, se mantiveram próximos, aconselhando, sendo apoio incondicional e comemorando a cada pequena vitória.

Aos meus avós, em especial a Zita que, com seu coração gigantesco, se emociona e vibra a cada conquista.

Ao meu companheiro de uma década, Thiago, pelo apoio, carinho e por ser meu porto seguro quando tudo parecia dar errado. Estendo o meu agradecimento a sua família, em especial a sua mãe Sandra.

Ao “Suco do Zaffari”, Letícia e Camila, “velhos amigos” que entenderam a distância e sempre foram apoio.

Aos colegas e amigos que o PPGEC me apresentou, em especial ao Rodrigo e ao Miguel, sempre dispostos a ensinar, ajudar e aconselhar.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou minha total dedicação aos estudos e desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao CENAPAD e NACAD pelos recursos computacionais utilizados.

Por fim, a Deus por guiar meus passos e a todas as mulheres que me antecederam!

Eu não aceito as coisas  
que não posso mudar,  
estou mudando as coisas  
que não posso aceitar.  
*Angela Davis*

## RESUMO

BIANCHIN, G. P. **Análise numérica da ventilação e mitigação de cargas aerodinâmicas em edificações baixas usando spoilers com controle PID**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Edifícios baixos apresentam maior suscetibilidade à ação do vento devido a altas pressões de sucção que se desenvolvem nas coberturas, as quais se originam pela ação de vórtices desprendidos junto a cantos e arestas do telhado. Em edificações onde a estrutura de cobertura está exposta ao escoamento desenvolvido internamente através das aberturas, as condições de ventilação podem ser fundamentais para a manutenção de sua estabilidade. Com o intuito de mitigar as cargas de vento atuantes nas estruturas de telhado, apêndices aerodinâmicos têm sido incorporados às edificações. Neste sentido, propõe-se o desenvolvimento de uma ferramenta numérica para o estudo da ventilação e mitigação de cargas aerodinâmicas em edifícios baixos, onde *spoilers* são anexados junto às arestas das duas águas da cobertura. Os dispositivos utilizados apresentam dimensão retangular de comprimento (L) igual ao da edificação, largura de 2,5% L e espessura de 0,2% L, já o eixo de rotação adotado localiza-se na aresta não exposta ao vento incidente. O intuito é produzir uma redução nos níveis da força resultante ascensional atuante sobre as águas do telhado. No presente modelo, os *spoilers* são tratados como estruturas de corpo rígido, sendo acionados através de um algoritmo numérico baseado na teoria de controle PID (Proporcional Integral Derivativo), no qual consideram-se leituras das condições atuais do escoamento sobre a cobertura e uma função objetivo associada à resultante de força ascensional. Para a simulação do escoamento, emprega-se o modelo CBS (“*Characteristic Based Split*”) semi-implícito no contexto do Método dos Elementos Finitos, onde tetraedros lineares são empregados na discretização espacial. O sistema de equações fundamentais do escoamento é formado pelas equações de Navier-Stokes e pela equação de conservação de massa para escoamentos incompressíveis e isotérmicos, sendo a turbulência tratada através de Simulação de Grandes Escalas (“*Large Eddy Simulation*” – LES). Os resultados obtidos através das simulações mostram que a utilização de *spoilers* com técnicas de controle PID são capazes de reduzir significativamente as cargas aerodinâmicas sobre as estruturas de telhados de edificações baixas quando a inclinação das águas está entorno de 12° e o vento uniforme incidindo paralelamente e perpendicularmente na edificação com um perfil uniforme de velocidades.

**Palavras-chave:** *Engenharia do Vento Computacional (EVC), Método dos Elementos Finitos (MEF), Método CBS Semi-Implícito, Simulação de Grandes Escalas (“LES”), Ventilação Natural, Edifícios Baixos, Mitigação de pressão, Controle PID*

## ABSTRACT

BIANCHIN, G. P. **Análise numérica da ventilação e mitigação de cargas aerodinâmicas em edificações baixas usando spoilers com controle PID.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Low-rise buildings are more susceptible to the action of the wind due to high suction pressures that develop on the roofs, which originate from the action of vortices released close to the corners and edges of the roof. In buildings where the roof structure is exposed to the flow developed internally through the openings, ventilation conditions can be essential to maintain its stability. In order to mitigate the wind loads acting on the roof structures, aerodynamic appendages have been incorporated to the buildings. In this sense, it is proposed in this work the development of a numerical tool for the study of ventilation and mitigation of aerodynamic loads in low-rise buildings, where spoilers are used next to the windward edges of the roof. The devices used have a rectangular dimension, a length ( $L$ ) equal to that of the building, a width of  $2.5\% L$  and a thickness of  $0.2\% L$ , whereas the axis of rotation adopted is located on the edge not exposed to the incident wind. The aim is to produce a reduction in the levels of the ascensional resulting force acting on the roof surfaces. In the present model, spoilers are treated as rigid body structures, being driven through a numerical algorithm based on the PID control theory, in which readings of the current flow conditions on the roof are considered and an objective function associated with the ascensional resultant force is utilized. For the flow simulation, the semi-implicit Characteristic Based Split (CBS) model is used in the context of the Finite Element Method, where linear tetrahedra are used in spatial discretization. The system of fundamental flow equations is formed by the Navier-Stokes equations and the mass conservation equation for incompressible and isothermal flows, while flow turbulence is treated through Large Eddy Simulation (LES). The results obtained through the simulations show that the use of spoilers with PID control techniques is able to significantly reduce the aerodynamic loads on the roof structures of low-rise buildings when the roof slope is around  $12^\circ$ , considering that the incident wind is parallel and perpendicular to the building and a uniform speed profile is adopted.

**Keywords:** *Computational Wind Engineering (CWE), Finite Element Model (FEM), Semi-Implicit CBS Method, Large Eddy Simulation (LES), Natural Ventilation, Low-rise buildings, Pressure mitigation, PID control.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Formação de vórtices no canto a barlavento (Blessmann, 2009, p.90 ) .....	37
Figura 2.2 Influência da inclinação do telhado na distribuição de pressões (Blessmann, 2009, p.108 ).....	37
Figura 2.3 Situações típicas de pressões no interior e exterior das edificações (Fonte: LOREDO-SOUZA, 1992).....	38
Figura 2.4 Alteração nas bordas de edificações com telhados planos (a) sem alteração; (b) com arredondamento; (c) modificação inclinada; (d) estilo degrau (Aly e Bresowar, 2016).....	40
Figura 2.5 Inserção de parapeitos em edificações de telhados planos (a) parapeito sólido; (b) parapeito descontínuo nos cantos; (c) parapeito reforçado no canto; (Koop et al., 2005).....	42
Figura 2.6 Inserção de painéis solares em telhados com duas águas (Aly et al., 2017).....	42
Figura 2.7 Exemplos de <i>spoilers</i> (Li et al., 2018, p.4).....	43
Figura 3.1: Correntes de ar ao redor de uma edificação – pressões positivas e negativas (Givoni, 1962).....	47
Figura 3.2 Ventilação por efeito chaminé (Fonte: <a href="http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-11.jpg">http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-11.jpg</a> acesso em 15 de Janeiro de 2020).....	49
Figura 3.3: Ventilação cruzada (Fonte: <a href="http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-6.jpg">http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-6.jpg</a> acesso em 15 de Janeiro de 2020).....	50
Figura 3.4: Ventilação Unilateral (Fonte: <a href="http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-8.jpg">http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-8.jpg</a> acesso em 15 de Janeiro de 2020).....	50
Figura 3.5 Diagrama de Ventilação Natural (Fonte: KARAVA, 2008).....	51
Figura 3.6 Organograma para um projeto de ventilação natural em edificações baixas – presente trabalho .....	55
Figura 3.7 Organograma para um projeto de ventilação natural em edificações urbanas – presente trabalho.....	55
Figura 5.1 Plano $x \times t$ – procedimento do método das características (adaptado de Zienkiewicz et al. 2014, p.60).....	67
Figura 5.2 Diagrama de bloco de um controle PID – sistema de feedback com circuito fechado – presente trabalho .....	75
Figura 5.3 Controle PID baseado no passado presente e futuro (ÅSTRÖM, K. e HÄGGLUND, T. 1995, p. 12) .....	76
Figura 5.4 Caracterização do método de resposta ao degrau de Ziegler e Nichols .....	77

Figura 5.5 Característica do processo estático (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005, p. 69).....	78
Figura 5.6 Exemplos de resposta ao degrau de um sistema linear (ÅSTRÖM, K. e HÄGGLUND, T. 1995, p. 23) .....	79
Figura 5.7 Curva de Nyquist (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005, p.75)...	79
Figura 5.8 Parâmetros em um modelo de degrau (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005, p. 69).....	80
Figura 5.9 Característica do controle proporcional – obtenção do erro a partir do sinal de controle $u$ (ÅSTRÖM, K. e HÄGGLUND, T. 1995, p. 68)...	81
Figura 5.10 Movimento do <i>Spoiler</i> .....	84
Figura 5.11 Definição de parâmetros para o esquema de movimento de malha (adaptado de BRAUN, 2007).....	85
Figura 6.1 Exemplo de organização do arquivo (.geo).....	88
Figura 6.2 Arquivo de saída do <i>Gmsh</i> com dados da malha – formato 2.2.....	89
Figura 6.3 Numeração local do elemento tetraédrico no <i>Gmsh</i> (adaptado de Manual <i>GMSH</i> ) .....	90
Figura 6.4 Algoritmo numérico do trabalho – simulações de ventilação .....	91
Figura 6.5 Convenção de sinais do escoamento .....	93
Figura 7.1 Geometria e condições de contorno na cavidade 2D com um elemento tetraédrico de espessura em $Z = 0,5$ m.....	96
Figura 7.2 Linhas de corrente no interior da cavidade – $Re_{100}$ (a) estudada por este trabalho (b) Ghia et al. (1982) p.400 .....	97
Figura 7.3 Perfis de velocidade – $Re_{100}$ (a) em $X = 0,5$ m (b) em $Y = 0,5$ m... 97	
Figura 7.4 Linhas de corrente no interior da cavidade 2D – $Re_{10.000}$ (a) <i>Smagorinsky</i> clássico (b) Ghia et al. (1982) p.402 (c) <i>Smagorinsky</i> dinâmico .....	98
Figura 7.5 Perfis de velocidade nas linhas médias no interior da Cavidade 2D, <i>Smagorinsky</i> clássico - $Re_{10.000}$ (a) $X = 0,5$ m; (b) $Y = 0,5$ m.....	98
Figura 7.6 Perfis de velocidade nas linhas médias no interior da Cavidade 2D <i>Smagorinsky</i> dinâmico - $Re_{10.000}$ (a) $X = 0,5$ m; (b) $Y = 0,5$ m .....	98
Figura 7.7 Linhas isobáricas no interior da cavidade 2D, $Re_{10.000}$ , 300 níveis – (a) <i>Smagorinsky</i> clássico ( $C_S = 0,1$ ) (b) <i>Smagorinsky</i> dinâmico .....	99
Figura 7.8 Geometria e malha da cavidade tridimensional.....	100
Figura 7.9 Linhas de velocidade $V_x$ médias no plano $Z = 0$ m – 100 níveis entre - 0,4 e 1,0: (a) Bouffanais et al. (2007) p. 10; (b) presente trabalho....	101
Figura 7.10 Linhas de velocidade $V_y$ médias no plano $Z = 0$ m – 100 níveis entre -0,7 e 0,2: (a) Bouffanais et al.(2007) p.10; (b) presente trabalho.....	101
Figura 7.11 Perfis de velocidades (a) $V_x$ (direção X) média no plano $Z = 0$ m na linha $X = 0$ m; (b) $V_y$ (direção Y) média no plano $Z = 0$ na linha $Y = 0$ .....	102
Figura 7.12 Velocidades cruzadas $V_x V_y$ flutuantes no plano $Z = 0$ : (a) na linha $X = 0$ ; (b) na linha $Y = 0$ .....	102

Figura 7.13 Domínio computacional e condições de contorno utilizados nas simulações dos prismas – presente trabalho .....	103
Figura 7.14 Detalhes de Refinamento das malhas propostas.....	104
Figura 7.15 Denominação dos casos estudados .....	104
Figura 7.16 Históricos dos coeficientes aerodinâmicos (a) arrasto ( $C_D$ ) e (b) sustentação ( $C_L$ ) obtidos pelas duas malhas para o prisma com $R = 1$ e $Re_{250}$ .....	105
Figura 7.17 Distribuição de Vorticidade instantânea – (a) Islam et al. (2012) p. 1039; (b) R1re1l; (c) R1re2l; (d) R1re3l;.....	106
Figura 7.18 Registros de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ) e (b) sustentação ( $C_L$ ) - Prisma $R = 1$ e $Re_{10^5}$ .....	107
Figura 7.19 Comparação dos perfis de velocidade $V_x$ média em $Y = 0,0$ m para $Re_{10^5}$ .....	107
Figura 7.20 Coeficiente de pressão médio em torno do prisma $R = 1$ .....	108
Figura 7.21 Campos de Pressão para escoamento turbulento – 100 níveis de -1,5 a 0,5: (a) R1re1t; (b) R1re2t; (c) R1re3t .....	108
Figura 7.22 Históricos de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ); (b) sustentação ( $C_L$ ) para o Prisma com $R = 2$ e $RE_{250}$ .....	109
Figura 7.23 Vorticidade Z - prisma $R = 2$ e $Re_{250}$ : (a) Islam et al. (2012) p.1039; (b) R2re1l; (c) R2re2l; (d) R2re3l .....	110
Figura 7.24 Históricos de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ); (b) sustentação ( $C_L$ ) para o prisma com $R = 2$ e $Re_{10^5}$ .....	111
Figura 7.25 Coeficiente de Pressão médio ao longo da superfície do prisma $R = 2$ e $Re_{10^5}$ .....	111
Figura 7.26 Históricos de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ); (b) sustentação ( $C_L$ ) para o prisma com $R = 0,5$ e $RE_{250}$ .....	112
Figura 7.27 Vorticidade Z prisma $R = 2$ e $Re_{250}$ : (a) Islam et al. (2012) p.1039; (b) R05re1; (c) R05re2; (d) R05re3 .....	113
Figura 7.28 Malha utilizada e condições de contorno propostas - Ventilação Unilateral.....	115
Figura 7.29 Detalhamento para a determinação dos perfis de velocidade.....	116
Figura 7.30 Perfis de Velocidades em (a) $X = 2,5$ m e (b) $X = 7,5$ m.....	117
Figura 7.31 Resultados obtidos – 100 níveis de -20 a 20 para (a) campo médio de pressão com linhas de corrente; (b) campo da velocidade média na direção do escoamento .....	117
Figura 7.32 Aberturas e dimensões analisadas, ventilação cruzada: (a) caso I; (b) caso II; (c) caso III .....	118
Figura 7.33 Geometria proposta e condições de contorno – ventilação cruzada .....	119
Figura 7.34 Linhas de corrente - caso (I): (a) Ayad (1999) p. 58; (b) presente trabalho.....	120
Figura 7.35 Linhas de corrente, caso (II): (a) Ayad (1999) p. 59; (b) presente trabalho.....	120

Figura 7.36 Linhas de corrente, caso (III): (a) Ayad (1999) p. 61; (b) presente trabalho.....	120
Figura 7.37 Campos de vorticidade instantânea: (a) caso (I), aberturas iguais e opostas; (b) caso (II), aberturas diferentes e opostas; (c) caso (III) aberturas em paredes adjacentes .....	121
Figura 7.38 Domínio computacional, geometria da malha, dimensões da edificação e condições de contorno .....	123
Figura 7.39 Coeficientes de Pressão Externa a $0^\circ$ - (a) presente trabalho, (b) Loredo-Souza (1992) e (c) calculado pela NBR6123:1988.....	124
Figura 7.40 Coeficientes de Pressão Externa a $90^\circ$ - (a) presente trabalho, (b) Loredo-Souza (1992) e (c) calculado pela NBR6123:1988.....	125
Figura 7.41 Campos de vorticidade instantânea para galpões sem aberturas – presente trabalho: (a) vento a $0^\circ$ ; (b) vento a $90^\circ$ .....	125
Figura 7.42 Tomadas de pressões (adaptado de Loredo-Souza, 1992) .....	126
Figura 7.43 Campo de pressão médio do modelo – 100 níveis de -20 a 4: (a) <i>galp03</i> ; (b) <i>galp12</i> .....	127
Figura 7.44 Campos de pressão: (a) <i>galp09</i> ; (b) <i>galp11</i> .....	127
Figura 7.45 Características geométricas e condições de contorno para as simulações com <i>spoiler</i> – detalhamento da malha próxima ao galpão .....	130
Figura 7.46 Detalhamento da estrutura do galpão e dos <i>spoilers</i> .....	130
Figura 7.47 Propostas de extremidade rotação do dispositivo.....	131
Figura 7.48 Campos de vorticidade de escoamentos com <i>spoilers</i> – variação da extremidade de rotação da placa a barlavento: (a) extremidade direita fixa; (b) extremidade esquerda fixa .....	132
Figura 7.49 Coeficiente médios da força (a) direção y e (b) direção x atuante no <i>spoiler</i> a barlavento para ambas configurações e ângulos propostos	134
Figura 7.50 Coeficiente de sustentação atuante na água da cobertura a barlavento para caso sem e com abertura – presente trabalho.....	135
Figura 7.51 Campos de Pressão instantâneos em $t = 70$ segundos casos sem abertura – 100 níveis de -20 a 4 Pa. ....	136
Figura 7.52 Campos de Pressão instantâneos em $t = 70$ segundos casos com abertura – 100 níveis de -20 a 4 Pa. ....	137
Figura 7.53 Porcentagem de redução do $C_p$ em relação as estruturas sem <i>spoiler</i> .....	138
Figura 7.54 Curva de ganho $K_p$ .....	139
Figura 7.55 Perturbação do <i>spoiler</i> – análise dinâmica .....	140
Figura 7.56 Histórico dos coeficientes médios das forças nas direções X e Y sobre a água da cobertura a barlavento: (a) sem abertura; (b) com abertura .....	140
Figura 7.57 Passos para desenvolvimento da teoria de controle PID .....	141

Figura 7.58 Histórico dos coeficientes médios das forças nas direções X e Y sobre a água da cobertura a barlavento com aplicação do controle PID para a estrutura: (a) sem abertura; (b) com abertura.....	141
Figura 7.59 Histórico do movimento do <i>spoiler</i> – estrutura impermeável.....	142
Figura 7.60 Histórico dos parâmetros da teoria de controle PID – estrutura sem abertura.....	142
Figura 7.61 Características do domínio computacional e do galpão imerso – caracterização da malha externa do corpo nos cortes .....	144
Figura 7.62 Comparação coeficientes de pressão externa para vento a 0°: I. corte em $Z = 0,05 L$ ; II. simulação 2D ( <i>galp01</i> ); III. Loredo-Souza (1992); IV. obtidos pela NBR 6123:1988 .....	145
Figura 7.63 Comparação coeficientes de pressão externa para vento a 90°: I. corte em $Z = 0,05 L$ ; II. simulação 2D ( <i>galp02</i> ); III. Loredo-Souza (1992); IV. obtidos pela NBR 6123:1988 .....	145
Figura 7.64 Caso GP3D03 campo de pressão – 200 níveis de -5 a 5 Pa – cortes em $Y = 0.45 L$ ; $Y = -0.45 L$ e $Z = 0.05 L$ .....	146
Figura 7.65 Campo de pressão – 200 níveis de -5 a 5: (a) GP3D01; (b) GP3D02 .....	147
Figura 7.66 Linhas de corrente caso GP3D01: (a) Corte $Z = 0,05 L$ ; (b) vista tridimensional.....	148
Figura 7.67 Linhas de corrente caso GP3D02: (a) Corte $Z = 0,05 L$ ; (b) vista tridimensional.....	148
Figura 7.68 Linhas de corrente: (a) GP3D03; (b) GP3D04 .....	149
Figura 7.69 Caso GP3D04: campo de pressão (a) vista tridimensional – 200 níveis de -10 a 10; (b) corte em $Y = 0.045 L$ – 200 níveis de -5 a 5; (c) corte em $Y = -0.045 L$ – 200 níveis de -5 a 5 Pa .....	149
Figura 7.70 Histórico dos Coeficientes de forças nas direções Z e X existentes sobre a água de barlavento .....	150
Figura 7.71 Efeito tridimensional do <i>spoiler</i> na água de barlavento – 200 níveis de -4 a 4 Pa.....	150

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Síntese de artigos analisados para compreender o funcionamento dos <i>spoilers</i> e suas características.....	27
Tabela 1.2 Síntese de artigos analisados para estudo acerca da ventilação natural e suas características, além de efeitos da circulação sobre estruturas de edificações.....	31
Tabela 6.1 Identificação das faces de contorno e as respectivas conectividades em elementos de contorno.....	90
Tabela 7.1 – Constantes físicas e geométricas para a cavidade com escoamento bidimensional - casos 1 e 2.....	95
Tabela 7.2 Constantes físicas e geométricas para a cavidade com escoamento tridimensional.....	100
Tabela 7.3 Condições iniciais das simulações.....	103
Tabela 7.4 Informações sobre os refinamentos de malhas propostos.....	103
Tabela 7.5 Número total de nós e elementos dos casos de prisma $R = 1$ .....	104
Tabela 7.6 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento sobre o prisma de $R = 1$ .....	105
Tabela 7.7 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com $Re_{250}$ e prisma de $R = 1$ .....	105
Tabela 7.8 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com $Re_{10^5}$ e prisma de $R = 1$ .....	106
Tabela 7.9 Número total de nós e elementos para prisma $R = 2$ .....	109
Tabela 7.10 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com $Re_{250}$ e prisma de $R = 2$ .....	109
Tabela 7.11 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com $Re_{10^5}$ e Prisma de $R = 2$ .....	111
Tabela 7.12 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento com $Re_{250}$ e prisma de $R = 0,5$ .....	112
Tabela 7.13 Número total de nós e elementos para prisma $R = 0,5$ .....	112
Tabela 7.14 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com $Re_{250}$ e Prisma de $R = 0,5$ .....	113
Tabela 7.15 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento turbulento na ventilação unilateral.....	114
Tabela 7.16 Comparação entre os resultados - Ventilação Unilateral.....	116
Tabela 7.17 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento turbulento na ventilação cruzada.....	119
Tabela 7.18 Taxas de ventilação para os casos (I), (II) e (III).....	121
Tabela 7.19 Constantes físicas e geométricas para análise do escoamento turbulento com galpões imersos.....	123
Tabela 7.20 Casos analisados e parâmetros das malhas.....	124
Tabela 7.21 Coeficientes para os 10 casos.....	126
Tabela 7.22 Coeficientes e vazão de ventilação.....	128

Tabela 7.23 Coeficientes médios - estrutura do galpão sem aberturas .....	133
Tabela 7.24 Coeficientes médios - estrutura do galpão com aberturas .....	133
Tabela 7.25 Coeficientes das forças médias ideais para as estruturas com e sem abertura – <i>análise estática</i> .....	138
Tabela 7.26 Parâmetros Teoria de Controle PID .....	141
Tabela 7.27 Constantes físicas e geométricas utilizadas na simulação tridimensional dos galpões.....	144
Tabela 7.28 Comparação entre os coeficientes médios das paredes para simulações bi e tridimensionais .....	146
Tabela 7.29 Comparação entre os coeficientes médios do sistema de cobertura para as simulações bi e tridimensionais .....	147

## LISTA DE SÍMBOLOS

### GREGAS MAIÚSCULAS

$\Gamma$	região de contorno do domínio computacional;
$\overline{\Delta}$	largura do filtro em nível da malha;
$\Delta p_e$	pressão estática efetiva média em um ponto na superfície externa da edificação;
$\Delta p_i$	pressão estática efetiva média em um ponto na superfície interna da edificação;
$\Delta v_i^*$	incremento das componentes de velocidade referente à solução da equação de momentum;
$\Delta v_i^{**}$	incremento das componentes de velocidade referente à correção dos termos de pressão;
$\Delta t$	passo de tempo;
$\Delta t_{conv}$	passos de tempo de convecção;
$\Delta t_{dif}$	passos de tempo de difusão;
$\Omega$	domínio de análise;

### GREGAS MINÚSCULAS

$\delta_{ij}$	componentes do delta de Kronecker;
$\theta$	parâmetro de relaxamento;
$\theta_1$	parâmetro de discretização temporal varia de 0,5 a 1,0;
$\theta_2$	parâmetro de discretização temporal varia de 0 a 1;
$\lambda$	viscosidade volumétrica;
$\mu$	viscosidade dinâmica;
$\mu_t$	viscosidade turbulenta;
$\nu$	viscosidade cinemática;
$\nu_t$	viscosidade cinemática turbulenta;
$\rho$	massa específica do fluido;
$\sigma_{ij}$	componentes do tensor de tensões totais;
$\tau_{ij}$	componentes do tensor de tensão viscosas;
$\overline{\tau}_{ij}^{SGS}$	componentes do tensor de tensões sub-malha;
$\phi$	variável da equação na descrição do modelo numérico;

### ROMANAS MAIÚSCULAS

$A$	área;
$\mathbf{A}$	matriz de advecção;
$ACH$	vazão de ventilação natural por hora;
$C(\vec{x}, t)$	é o coeficiente de Smagorinsky dinâmico;
$C_D$	coeficiente de arrasto;
$C_E$	coeficiente de forma externo;

$C_I$	coeficiente de forma interno;
$C_L$	coeficiente de sustentação;
$C_P$	coeficiente de pressão;
$C_S$	constante de Smagorinsky;
$D$	dimensão característica do problema;
$\mathbf{D}$	matriz de difusão;
$F$	força do vento sobre um elemento plano;
$F_a$	força global na direção do vento (arrasto);
$F_f$	força global do vento;
$\mathbf{F}_I$	vetor de força aerodinâmica a nível nodal;
$F_s$	fator de segurança;
$\mathbf{G}_i$	matriz gradiente;
$\mathbf{H}$	matriz Laplaceana;
$K$	coeficiente de vazão;
$K_p$	constante de ganho;
$L_{ij}$	tensões resolvidas associadas às escalas de turbulência existentes entre os dois filtros;
$\mathbf{M}$	matriz de massa;
$M_{ach}$	número de Mach;
$M_{ij}$	parte anisotrópica das tensões sub-malha do segundo filtro;
$\mathbf{M}_D$	matriz de massa discreta;
$\mathbf{N}$	matriz linha contendo as funções de interpolação do elemento;
$N_i$	coordenadas de volume do elemento tetraédrico;
$N_p$	função de interpolação para pressão;
$N_v$	função de interpolação para velocidade;
$Q$	vazão de ventilação;
$Re$	número de Reynolds;
$\overline{s}_{ij}$	componentes do tensor taxa de deformação;
$S_{ij}$	tensor taxa de deformação do fluido;
$S_1$	fator topográfico;
$S_2$	fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo e de sua altura sobre o terreno;
$S_3$	fator estatístico;
$\mathbf{S}_v$ $\mathbf{S}_i^p$	matrizes de estabilização;
$St$	número de Strouhal;
$Pb$	largura de banda proporcional;
$p$	pressão;
$P_i$	pressão interna;
$P_e$	pressão externa;
$T_D$	tempo derivativo;
$T_I$	tempo integral;

$Vol$	volume interno de uma edificação;
$V_0$	velocidade básica do vento;
$V_k$	velocidade característica do vento;
$V_x, V_y, V_z$	componentes de velocidade;
$V_\infty$	velocidade característica do escoamento;

## ROMANAS MINÚSCULAS

$a_{ij}$	coeficientes de ponderação entre os nós $i$ (do interior) e os nós $j$ (contorno);
$a_i$	componente de aceleração da descrição ALE;
$c$	velocidade do som;
$c_{p,e}$	coeficiente de pressão externa;
$c_{p,i}$	coeficiente de pressão interna;
$d_{ij}$	distância Euclidiana entre os nós $i$ e $j$ ;
$e$	erro das teorias de controle;
$f_s$	frequência de desprendimento de vórtices;
$f_i \mathbf{f}_i$	vetor de forças;
$\mathbf{f}_p$	termos de contorno
$h$	dimensão característica do elemento finito;
$\bar{\mathbf{p}}$	vetor local de pressão
$p$	pressão;
$q$	pressão dinâmica;
$r$	fator de refinamento;
$\mathbf{r}_{o,int}$	vetor de rotações de corpo rígido;
$u$	variável de entrada da teoria de controle;
$v_i$	componente de velocidade do escoamento;
$V_i^*$	componentes do vetor velocidade intermediária do escoamento;
$\bar{\mathbf{v}}_i$	vetor local de velocidade;
$\omega_z$	velocidade angular do <i>spoiler</i> ;
$\mathbf{w}$	vetor velocidade de malha;
$y$	variável de processo;
$\mathbf{y}_{sp}$	valor de referência das equações de controle;
$x_i, y_i, z_i$	coordenadas nodais.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	23
1.2	CARGA DE VENTO EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS BAIXOS. 23	
1.2.1	Aspectos gerais .....	23
1.2.2	Estratégias para a mitigação de pressões na cobertura .....	25
1.3	VENTILAÇÃO EM EDIFICAÇÕES BAIXAS: EFEITOS DA CIRCULAÇÃO NAS ESTRUTURAS .....	27
1.4	METODOLOGIA E OBJETIVOS.....	32
1.4.1	Problema de Pesquisa.....	32
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	33
<b>2</b>	<b>AÇÃO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES BAIXAS: CARGAS AERODINÂMICAS E FORMAS DE MITIGAÇÃO DE PRESSÕES NA COBERTURA .....</b>	<b>34</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	34
2.2	FORÇAS DEVIDO AO VENTO: NBR 6123:1988 .....	34
2.3	ACIDENTES OCACIONADOS PELO VENTO E MEDIDAS PREVENTIVAS.....	38
2.3.1	Dispositivo aerodinâmico para mitigação - <i>Spoilers</i> .....	43
<b>3</b>	<b>CIRCULAÇÃO DE AR: ASPECTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>45</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	45
3.2	VENTILAÇÃO .....	45
3.3	CLASSIFICAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL.....	48
3.4	NORMAS VIGENTES E PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO.....	51
<b>4</b>	<b>EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DO ESCOAMENTO .....</b>	<b>56</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	56
4.2	EQUAÇÕES DE ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL E ISOTÉRMICO.....	56
4.3	ESCOAMENTOS TURBULENTOS.....	59

4.4	EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO COM FORMULAÇÃO LAGRANGEANA-EULERIANA (ALE).....	63
<b>5</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>65</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	65
5.2	FORMULAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	65
5.3	FORMULAÇÃO DA TEORIA DE CONROLE PID.....	73
5.4	MOVIMENTO DE MALHA E SPOILERS .....	83
<b>6</b>	<b>FERRAMENTAS NUMÉRICAS UTILIZADAS E ALGORITMO DOS CÓDIGOS IMPLEMENTADOS .....</b>	<b>87</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	87
6.2	GMSH.....	87
6.3	ALGORITMO PARA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MOVIMENTO .....	90
6.4	PARÂMETROS E ANÁLISE DE PÓS-PROCESSAMENTO .....	92
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DE ESCOAMENTOS – VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CÓDIGO .....</b>	<b>95</b>
7.1	ESCOAMENTO SOBRE CAVIDADES.....	95
7.1.1	Cavidade Bidimensional .....	95
7.1.1	Cavidade Tridimensional .....	99
7.2	ESCOAMENTO SOBRE PRISMAS RETANGULARES – CASO BIDIMENSIONAL .....	102
7.2.1	Razão $R = 1$ .....	104
7.2.2	Razão $R = 2$ .....	109
7.2.3	Razão $R = 0,5$ .....	112
7.3	ESCOAMENTOS COM VENTILAÇÃO – CASO BIDIMENSIONAL .....	114
7.3.1	Ventilação Unilateral .....	114
7.3.2	Ventilação Cruzada.....	118
7.4	ANÁLISE DE ESCOAMENTO SOBRE GALPÃO INDUSTRIAL – MODELO BIDIMENSIONAL .....	122

7.5	ANÁLISE DE ESCOAMENTO SOBRE GALPÃO INDUSTRIAL COM SPOILER – APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE .....	129
7.6	ANÁLISE DE ESCOAMENTO SOBRE GALPÃO INDUSTRIAL COM SPOILER E CONTROLE PID – MODELO TRIDIMENSIONAL .....	143
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>151</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>156</b>
	<b>APÊNDICE A - FORMULAÇÃO DOS ELEMENTOS ADOTADOS.....</b>	<b>164</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Edifícios baixos industriais são conhecidos por serem suscetíveis à ação do vento, devido às elevadas cargas aerodinâmicas presentes nas superfícies da cobertura. As pressões negativas sentidas nessas áreas são resultado da atuação de vórtices gerados a partir da separação do escoamento incidente junto às bordas laterais do telhado (Holmes, 2015). Normalmente, as falhas estruturais de coberturas estão intimamente ligadas à diferença entre a distribuição das pressões nas regiões externa e interna da edificação. Em severas tempestades estilhaços lançados pelo vento podem promover aberturas acidentais nas paredes e/ou telhado, alterando a circulação do escoamento. Quando estas são encontradas nas paredes de barlavento, a sobrepressão existente nessas faces é transmitida ao interior e a combinação com as sucções externas (em algumas regiões) promove a elevação das cargas de pressão.

Entre as técnicas existentes para mitigar as pressões na cobertura, destaca-se a aplicação de *spoilers* (dispositivos utilizados para gerar perturbação) nos cantos e arestas do telhado, cuja utilização tem por objetivo alterar o mecanismo de formação dos vórtices, ajustando as condições de escoamento nas zonas de separação por meio de sua inclinação. Assim, propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de estruturas inteligentes, que se adequem ao escoamento por meio de apêndices aerodinâmicos, os quais são controlados por algoritmo de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Neste contexto, o problema da ventilação e circulação do escoamento no interior e ao redor das edificações será também abordado. Estudos sobre ventilação e mitigação de pressões em coberturas de edificações baixas têm sido tradicionalmente realizados empregando-se técnicas experimentais em túneis de vento. No entanto, devido ao alto grau de desenvolvimento das técnicas computacionais, propõe-se aqui uma abordagem via simulação numérica.

## 1.2 CARGA DE VENTO EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS BAIXOS

### 1.2.1 Aspectos gerais

Edifícios baixos são estruturas revestidas com até 15 m de altura (Holmes, 2015) e provavelmente submetidas a escoamentos de camada limite atmosférica, onde os efeitos da

turbulência podem ser significativos. O projeto da estrutura de cobertura é crítico nestas edificações, considerando que as altas sucções são desenvolvidas sobre os elementos de revestimento localizados próximos às arestas e cantos do telhado. Pressões negativas são produzidas devido à separação do escoamento ao longo das bordas de barlavento, sendo a pior situação aquela que normalmente ocorre quando o vento incide com direções oblíquas, levando a sucções extremas, resultado da formação de vórtices cônicos nos cantos do telhado (Banks, 2000). Pode-se observar que o mecanismo de formação de vórtices na cumeeira e nos beirais das edificações com telhados de duas águas é diferente daquele verificado nos edifícios com telhado plano (Prasad et al., 2009), onde em todos os cantos e bordas do telhado podem ser geradas pressões negativas devido à forte separação do escoamento.

A estrutura da cobertura é normalmente submetida a cargas aerodinâmicas superiores às observadas em qualquer outro elemento construtivo. Consequentemente, os elementos de revestimento do telhado, tais como as telhas, são considerados como a parte mais vulnerável de uma edificação baixa, especialmente durante tempestades, quando componentes soltos da cobertura podem ser arrancados, tornando-se uma fonte de projéteis lançados pelo vento. Uma vez que parte da cobertura tenha sido rompida, uma sequência de falhas estruturais é desencadeada: brechas na superfície do telhado levam a pressões internas adversas, aumentando as cargas aerodinâmicas na cobertura, nas portas e nas janelas. Com a quebra da envoltória de revestimento da edificação, observa-se a pressurização interna, o que pode causar falhas estruturais adicionais (Huang et al., 2014). Devido às melhorias obtidas nos códigos de construção ao longo das últimas décadas, as falhas no sistema estrutural do edifício são escassas, mas ainda são infligidos graves danos ao revestimento do edifício pelas forças induzidas pelo vento.

O processo de formação de vórtices em coberturas de edificações baixas é descrito detalhadamente por Holmes (2015), como mostra a transcrição a seguir:

*“Quando o vento incide sobre estruturas baixas o escoamento apresenta separação entre a parede e a cobertura. A zona de separação é delimitada por uma camada de cisalhamento livre e uma região de gradientes de alta velocidade e turbulência. Essa camada se desenvolve formando vórtices, os quais podem produzir altos picos de pressão negativa no telhado. Já na parede de barlavento, há uma área de recirculação, onde elevadas sobrepressões são observadas.[...] As cargas sentidas nos telhados têm importância crítica para edifícios baixos,*

*muitas falhas estruturais observadas neste tipo de construção derivam das elevadas sucções sentidas na cobertura. ”*

A camada limite atmosférica (CLA) é a região da troposfera onde a velocidade do vento é afetada por causas como: topografia e rugosidade do terreno, forma e dimensão das edificações e variação da temperatura (Blessmann, 2013). A espessura da CLA corresponde à chamada altura gradiente ( $z_g$ ), a qual varia com as características mencionadas. A análise de problemas de circulação de vento envolve temas como o desenvolvimento da CLA e da turbulência atmosférica. Quando uma estrutura encontra-se imersa em um escoamento de ar, a força que o escoamento exerce sobre ela pode ser obtida por meio de ensaios aerodinâmicos, onde os coeficientes aerodinâmicos (arrasto, sustentação e momento) são avaliados, fornecendo as variações das forças atuantes sobre a estrutura ao longo do tempo de simulação (ver, por exemplo, Braun, 2007). A simulação da CLA é realizada computacionalmente através de condições de contorno, que descrevem o perfil de velocidades e ângulo de incidência do vento na entrada do domínio computacional. No entanto, para que a simulação se torne ainda mais próxima da realidade, deve-se empregar a turbulência na corrente incidente do escoamento. Já a vizinhança, a qual corresponde aos edifícios de grande porte ou vegetação circundantes e suas contribuições nas cargas que agem sobre a estrutura, é fundamental em questões de avaliação, principalmente, do escoamento externo.

Em áreas de campos abertos ou zonas rurais encontram-se construções como pavilhões e galpões industriais, nas quais a ação do vento, dependendo da estrutura, caracteriza-se como uma das principais cargas estruturais. A localização em terrenos onde a rugosidade é pequena faz com que as parcelas das velocidades médias sejam superiores quando comparadas a locais urbanos, mas é nesses locais que a turbulência é menor, levando a uma diminuição das parcelas flutuantes da velocidade, as quais são superiores em áreas densamente edificadas (Blessmann, 2011).

### 1.2.2 Estratégias para a mitigação de pressões na cobertura

Os parapeitos têm sido considerados e amplamente utilizados como um dispositivo de mitigação para edifícios de telhado plano, sendo capazes de desviar as camadas de cisalhamento separadas da superfície do telhado, gerando a dissipação de elevadas sucções locais. Baskaran e Stathopoulos (1988) estão entre os primeiros autores a investigar a influência de parapeitos de telhado no mecanismo de supressão de vórtice, demonstrando que parapeitos altos podem

reduzir altos níveis de sucções nos cantos do telhado em geral, mas parapeitos baixos podem levar a incrementos na carga aerodinâmica nas regiões internas do telhado (ver também, Wu, 2000). Além disso, os próprios parapeitos costumam ser submetidos a altas forças aerodinâmicas, de forma que as desvantagens associadas ao seu uso podem superar os benefícios. A eficácia de diferentes configurações e posições de parapeito na mitigação da pressão do telhado também foram investigadas por Surry e Lin (1995), Pindado e Meseguer (2009), Suaris e Irwin (2010) e Kopp et al. (2005), que avaliaram sistematicamente o desempenho aerodinâmico de vários parapeitos por meio de experimentos em túnel de vento, incluindo parapeitos contínuos, parciais e porosos, além de cercas e *spoilers*. Os resultados demonstraram que *spoilers* e parapeitos contínuos porosos obtiveram os melhores desempenhos.

Banks (2000) realizou testes em túnel de vento usando diferentes métodos de mitigação para reduzir pressões de sucção associadas a zonas de separação do escoamento, os quais incluíam um *spoiler*. Os resultados demonstraram que os *spoilers* obtiveram melhor mitigação do que os observados em outros dispositivos. Uma conclusão semelhante foi obtida por Aly e Bresowar (2016), que apresentaram um estudo comparativo sobre dispositivos de mitigação aerodinâmica para coberturas de edificações baixas. Li et al. (2018) investigaram o efeito de mitigação de pressão do vento na cobertura de um edifício baixo com telhado de duas águas com *spoilers* usando experimentos em túnel de vento. As predições experimentais mostraram que a redução da pressão máxima é obtida quando os *spoilers* estão localizados no frontão, seguidos dos *spoilers* localizados no beiral. Quando o dispositivo foi colocado na cumeeira, nenhuma diminuição perceptível na pressão de vento foi observada no telhado. *Spoilers* também foram utilizados por Banks (2000) e Kopp et al. (2005) como um dispositivo de mitigação para atenuação da sucção de pressão em telhados de edifícios baixos. No entanto, é importante notar que todos esses trabalhos foram realizados com *spoilers* fixos.

Superfícies de controle têm sido adotadas para suprimir instabilidades aeroelásticas e reduzir cargas aerodinâmicas devido à ação do vento em edifícios altos e pontes de longo vão (ver, por exemplo, Sangalli e Braun, 2020), onde dispositivos passivos ou controlados são utilizados. Esses apêndices aerodinâmicos também podem ser projetados para reduzir a carga do vento em coberturas de edifícios baixos, os quais podem ser ajustados automaticamente de acordo com as condições instantâneas do escoamento, semelhantes aos dispositivos de voo utilizados em asas de avião, como *spoilers* e *slats*. Nesse sentido, técnicas de controle PID podem ser empregadas para determinar a orientação de *spoilers* fixados nas bordas do telhado, a fim de

atenuar as cargas de vento na estrutura de cobertura. Essa operação gera estruturas inteligentes capazes de monitorar cargas extremas e acionar os dispositivos para se adaptar e reduzir as falhas estruturais, mesmo quando as edificações não sejam projetadas originalmente para suportar tais cargas. Detalhes sobre os controladores PID podem ser obtidos em Aström e Hägglund (1995) e Hägglund e Aström (2005).

Neste trabalho, *spoilers* são propostos e analisados como forma de reduzir a pressão gerada pela ação do vento nas coberturas de edificações baixas, como os galpões industriais, por exemplo. Através da Tabela 1.1 uma síntese a respeito dos trabalhos disponíveis na área pode ser obtida, devendo-se destacar o fato de que não há na literatura trabalhos onde a modificação da inclinação dos *spoilers* seja automática ou realizada por meio de algoritmos de controle. No Capítulo 2 deste trabalho, o funcionamento e explicações a respeito dos dispositivos mitigadores serão descritos detalhadamente.

Tabela 1.1 Síntese de artigos analisados para compreender o funcionamento dos *spoilers* e suas características

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Breve Resumo</b>
Baskaran e Stathopoulos	1988	Autores pioneiros no estudo da influência de parapeitos como mecanismo para supressão de vórtices cônicos em telhados
Banks	2000	Através de ensaios em túneis de vento diferentes métodos foram avaliados para redução dos picos de sucção – <i>spoilers</i> obtiveram o melhor desempenho
Kopp et al.	2005	Análise do desempenho beirais contínuos e porosos e <i>spoilers</i> em telhados planos através de ensaios em túnel de vento – ângulos e tipos de placas mais eficientes
Suaris e Irwin	2010	Investigação da eficácia de parapeitos vazados como maneira de mitigar as sucções.
Bitsuamlak et al.	2013	Análise de edifícios baixos com telhados de duas e quatro águas simulados com dispositivos arquitetônicos – beirais e placas
Huang et al.	2014	Utilização de diferentes formatos de beirais e calhas para mitigação da pressão do vento nas coberturas de edificações baixas.
Aly e Bresowar	2016	Possibilidade de mitigação das forças de sucção em edifícios baixos utilizando diferentes formas de beirais em coberturas planas
Mooneghi e Kargamoakan	2016	Estudo das formas de telhado com e sem elementos arquitetônicos com o intuito de minimizar o efeito da sucção em coberturas
Aly et al.	2017	Análise da utilização de painéis solares como medida de mitigação das forças de sucção elevadas nos cantos das coberturas
Azzi et al.	2018	Ensaio em túnel de vento de placas com furos circulares – estudo do efeito da redução da carga devido ao vento em telhados com a aplicação das placas
Li et al.	2018	Análise da utilização de <i>spoilers</i> em telhados de duas águas para mitigar as pressões em túneis de vento – determinação das dimensões ideais e localização do <i>spoiler</i>
Masuyama et al.	2020	Estudo das características das forças de arrancamento que surgem nas bordas dos dispositivos aerodinâmicos, análise de placas verticais dispostas em telhados planos

### 1.3 VENTILAÇÃO EM EDIFICAÇÕES BAIXAS: EFEITOS DA CIRCULAÇÃO NAS ESTRUTURAS

A carga aerodinâmica na estrutura do telhado em edificações baixas pode ser significativamente modificada se a permeabilidade devido às aberturas nas paredes do edifício for levada em

consideração, o que pode induzir pressões positivas na superfície interna do telhado dependendo da distribuição de aberturas sobre as fachadas do edifício (Blessmann, 2013). Essa combinação de pressão é observada principalmente em pavilhões industriais e ginásios esportivos, onde os ambientes de escoamento interno e externo interagem.

Como forma de avaliar a distribuição das pressões internas e o movimento do escoamento no interior e ao redor das edificações, este trabalho apresenta alguns conceitos atrelados a ventilação natural de construções, contribuindo como um estudo inicial para o tema. Além disso, edificações baixas, presentes nas áreas industriais e rurais, utilizam, como forma de evitar a concentração de poluentes e poeira, técnicas de circulação natural eficientes para a remoção das partículas (Bittencourt e Cândido, 2010).

A construção desenfreada em centros urbanos, combinada com a poluição da água, solo e ar e mudanças climáticas, levaram ao surgimento de climas específicos nestas regiões, os microlimas. Conforme Cheng et al. (2018), o microclima apresenta influência direta no planejamento de novas construções, as quais devem promover a utilização racional de energia e reduzir a concentração de poluentes, levando a um desenvolvimento sustentável. A condição de conforto térmico é, de acordo com Rajagopalan (2019), dependente de elementos climáticos como a umidade, temperatura e circulação do ar, além de fatores relativos ao recebimento de radiação solar. Ainda, segundo o autor, a interação entre as condições ambientais e o ser humano deve ser levada em conta para a determinação de um sistema que garanta a temperatura apropriada no interior das edificações. Contudo, apesar de relevante ao tema de estudo, neste trabalho não serão abordadas questões relativas a temperatura no interior e exterior das edificações estudadas.

Para Ayad (1999), além das condições climáticas, o conforto para os ocupantes no interior das edificações depende das configurações de aberturas, por onde as trocas de ar ocorrem e do posicionamento delas em relação ao vento incidente. No entanto, há dificuldade de prever um vento dominante, pois a variação de direções ocorre frequentemente, seja por condições climáticas ou por alterações na vizinhança. Mas a tentativa de correlacionar o posicionamento das aberturas com as direções e ângulos principais de incidência do vento é essencial para obtenção de uma ventilação natural eficaz. Analisando construções em escalas reais, Karava (2008) concluiu que o padrão de escoamento interno dependerá, também, da área de abertura (ou porosidade da parede), da relação entre a entrada/saída de ar, da localização relativa das

aberturas (alinhadas ou não) e da relação entre a distribuição de pressão externa e direção do vento.

As edificações com aberturas para a circulação de ar são ditas permeáveis e podem ou não apresentar uma abertura dominante, a qual, segundo a NBR 6123:1988, é aquela cuja área é igual ou superior à área total das aberturas que constituem a permeabilidade considerada sobre toda a superfície externa da edificação. A mesma normativa classifica que o índice de permeabilidade (relação em porcentagem da razão entre a soma das áreas de aberturas e a área total da parede em que se localizam) não pode superar 30%. A determinação deste índice deve ser realizada com prudência, pois alterações na permeabilidade durante a vida útil da edificação podem conduzir a valores mais nocivos ao carregamento (NBR 6123:1988). Ressalta-se também que nem sempre uma abertura dominante chega a definir o sinal da pressão que estará governando o interior da edificação, pois esta depende da distribuição das pressões externas, bem como do número e área das demais aberturas.

Assim, a circulação do escoamento é promovida pelas trocas de ar, as quais resultam da diferença de pressão existente entre os ambientes externo e interno. Essa característica permite que o resfriamento das residências ocorra devido ao deslocamento da massa de ar de uma região com maior pressão para outra de menor pressão, mantendo a equidade do sistema e permitindo a maior renovação do ar interno, controlando, ainda, os possíveis contaminantes existentes (Sales, 2016).

Quando, em uma construção, consegue-se empregar o escoamento natural do ar, propiciando condições satisfatórias de conforto aos ocupantes, diz-se que a edificação possui ventilação natural (Klein, 2012). Essa pode ser apresentada através de várias configurações, como cruzada e unilateral. Além da técnica natural, alternativas têm sido propostas a partir do século XX, quando a ventilação induzida passou a ser largamente utilizada. Essa técnica é caracterizada pelo uso de equipamentos mecânicos (por isso, também pode ser denominada ventilação mecânica), onde o sistema consome energia elétrica e suas operação e manutenção demandam elevados custos. Letan et al. (2003) comentam que o potencial de economia de energia elétrica em edificações existentes pode chegar a 30%, com a utilização de estratégias de condicionamento como a ventilação natural e, em novas edificações, pode atingir níveis de até 50%. Ainda, de acordo com os autores, outro fator é garantido com as aberturas: luminosidade natural.

Paralelamente, sistemas HVAC (“*Heating Ventilating and Air Conditioning*”) apresentam um modelo de ventilação natural combinada com ventilação mecânica, pois utilizam, além das tecnologias sustentáveis, outras que demandam energia não renovável, como os aparelhos de ar condicionado. Conforme Rajagopalan (2019), trata-se de um sistema eficiente e necessário em países com clima frio, pois o principal objetivo dessa abordagem é considerar os sistemas de aquecimento e resfriamento, não havendo relação com este estudo.

Em centros urbanos é comum identificar grandes edificações alinhadas e construídas sem a preocupação com os efeitos relativos ao vento no nível do pedestre. Portanto, uma análise da ventilação interna isolada não é suficiente para fins de projeto, pois a circulação externa provoca efeitos significativos ao nível do pavimento (Bittencourt e Cândido, 2010). Zhu (2016) discute os efeitos dos corredores de vento formados em regiões densamente edificadas e como o posicionamento deles pode diminuir consideravelmente a eficiência de ventilação para o pedestre, devido a grande turbulência encontrada e velocidades elevadas derivadas do efeito Venturi. Assim, o posicionamento da edificação e estudo da vizinhança é necessário para aumentar o nível de conforto do ambiente urbano e reduzir as taxas de aquecimento próximo a grandes construções. Como as análises de ventilação realizadas neste trabalho têm um caráter introdutório, estes aspectos não serão aqui abordados.

Regiões em que edificações baixas são mais comuns, como áreas residenciais, rurais ou centros industriais, a ventilação natural promovida pela circulação entre as aberturas é muito utilizada. A pressão internamente se modifica com a disposição das entradas e saídas de ar e com a velocidade do vento incidente. Conforme Holmes (2015), as pressões médias nas paredes de barlavento são positivas em relação à pressão estática do escoamento, já nas paredes laterais e de sotavento, que são influenciadas pela esteira de recirculação, geralmente apresentam pressões negativas. Assim, caso haja apenas uma abertura, a pressão existente naquela face se transmitirá a todo o ambiente interno. A combinação de mais aberturas deve sempre ser levada em consideração para determinação da eficiência da vazão de ventilação e análise de cargas atuantes sobre a estrutura.

Conceitos específicos sobre ventilação natural serão apresentados no Capítulo 3 e efeitos da circulação sobre as estruturas de edificações serão também investigados à medida em que os exemplos estudados por este trabalho forem sendo apresentados. Uma breve revisão, acerca dos trabalhos numéricos e experimentais mais significativos para este estudo, é apresentada na Tabela 1.2, onde há uma rápida descrição da análise realizada, método de simulação (numérica

ou experimental) e a metodologia de turbulência utilizada pelos autores. Observa-se que apesar de relevante, o estudo em edifícios baixos, como galpões e pavilhões, ainda é pouco abordado, como pode-se notar observando as referências. Alguns outros trabalhos foram relevantes ao tema de estudo, porém são consultas bibliográficas e, não havendo uma simulação específica no trabalho, dessa forma, não são apresentados na Tabela abaixo. No PPGE/UFRGS não são encontrados trabalhos que tratem do tema combinado com simulações numéricas, existindo apenas trabalhos experimentais em túnel de vento, como os de Loredou-Souza (1992), Makowski (2004), Chiarello (2006), Nunes (2006) e Klein (2012).

Tabela 1.2 Síntese de artigos analisados para estudo acerca da ventilação natural e suas características, além de efeitos da circulação sobre estruturas de edificações

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Análises</b>	<b>Método</b>	<b>Metodologia de turbulência</b>
Loredou-Souza	1992	Simulação de diferentes configurações de aberturas em um pavilhão para análise da distribuição da pressão interna	Simulação Experimental	-
Ayad	1999	Estudo bidimensional de diferentes posições de aberturas em uma sala isolada	Simulação numérica	LES
Hu et al.	2008	Estudo tridimensional de uma construção isolada sujeita a ventilação por duas aberturas opostas	Simulação numérica	LES
Karava	2008	Ventilação em uma sala isolada com diferentes configurações de aberturas e porosidade total da estrutura	Experimental	-
Perén et al.	2015	Análise da ventilação cruzada em uma construção com diferentes ângulos de telhados	Simulação numérica	RANS
Iqbal e Chan	2016	Análise do escoamento em nível de pedestres no entorno de edificações	Simulação numérica	RANS
Sales	2016	Diagrama de ventilação natural: ferramenta de análise do potencial da ventilação natural no estudo preliminar de projeto	Revisão e simulação numérica	-
Tominaga e Blocken	2016	Análise experimental do impacto das posições de aberturas na ventilação natural cruzada em uma construção isolada	Experimental	-
Tong et al.	2016	Análise da influência da vizinhança na ventilação natural no interior de edificações	Simulação numérica	LES
Cheng et al.	2018	Estudo de diferentes construções para análise da ventilação natural induzida pelo vento	Simulação numérica	LES
Gullbrekken et al.	2018	Estudo dos coeficientes de pressão em telhados de duas águas	Medição em escala real	-
Zhong et al.	2018	Análise bidimensional da ventilação cruzada induzida pelo vento em uma construção com aberturas na mesma face	Simulação numérica	RANS
Arinami et al.	2019	Estudo tridimensional de uma sala isolada com diferentes posicionamentos de aberturas com abas	Simulação numérica	LES
Hulsure e Maurya	2019	Investigação da ventilação natural induzida pelo vento em galpões com aberturas nos telhados	Simulação numérica	LES
Liu et al.	2020	Avaliação do escoamento externo e interno em edifícios baixos com diferentes configurações de telhados	Simulação numérica e Experimental	LES
Zheng et al.	2020	Análise do coeficiente de pressão sobre venezianas	Simulação numérica	RANS

## 1.4 METODOLOGIA E OBJETIVOS

### 1.4.1 Problema de Pesquisa

A concepção de um projeto que envolva a circulação de ar no interior e ao redor da edificação é complexo e envolve diversos parâmetros. Algumas tendências são analisadas em todos os planejamentos, mas em geral diferentes localizações de aberturas não são tão consideradas na avaliação de cargas estruturais e, desta maneira, surge o seguinte questionamento: *como é possível determinar a influência da ventilação natural na distribuição de pressões internas nas edificações? E de que maneira a disposição de aberturas pode auxiliar na mitigação das elevadas pressões atuantes no sistema de cobertura?* Por outro lado, a inserção de perturbadores pode auxiliar esse aspecto, mas *como a utilização de dispositivos aerodinâmicos (spoilers) acionados por algoritmos de controle PID podem gerar estruturas inteligentes que se adaptem à distribuição de pressões induzidas pela ação do vento nas coberturas?*

### 1.4.1 Objetivos

Os **objetivos principais** deste trabalho são: desenvolver uma ferramenta numérica para a análise de edificações baixas com e sem aberturas sujeitas a ação do vento, como forma de obter as distribuições de pressões externas e internas, bem como as cargas que atuam sobre a cobertura. Propõe-se também analisar a influência da utilização de *spoilers* com controle PID na mitigação de pressões sobre coberturas de edificações baixas.

Já como **objetivos secundários** têm-se: mapear estudos anteriores, normas nacionais e guias internacionais a respeito de cargas devidas ao vento, dispositivos aerodinâmicos e ventilação natural; apresentar as características que um projeto, levando em conta a circulação interna e externa de ar, deve possuir; desenvolver análises estáticas e dinâmicas para obtenção de parâmetros relativos às equações da teoria de controle PID; desenvolver um algoritmo de interface para discretização espacial usando elementos tetraédricos lineares com auxílio do *software* Gmsh; avaliar através de simulações numéricas as recomendações escolhidas (configurações de aberturas e movimento do *spoiler*) para responder aos problemas de pesquisa e contribuir com os futuros projetos de edificações baixas com elevado carregamento nas coberturas.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução aos temas abordados neste trabalho, onde uma breve revisão bibliográfica acerca dos dispositivos mitigadores, cargas em edificações e circulação do ar, objetivos e problemas de pesquisa são também indicados. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos carregamentos induzidos pelo vento em edifícios baixos e sobre as formas usuais de mitigação das cargas, com enfoque especial nos *spoilers*. No Capítulo 3, conceitos atrelados a ventilação natural nas edificações são apresentados, juntamente com uma síntese sobre os principais aspectos que os projetos devem possuir, combinando as aberturas com o carregamento presente na edificação. Nos Capítulos 4 e 5 tem-se a formulação numérica em elementos finitos baseada no Método CBS (“*Characteristic-Based Split*”), através da sua versão semi-implícita; um estudo a respeito das equações fundamentais que governam o escoamento, sintetizadas através das equações de Navier-Stokes e a equação de massa para escoamentos incompressíveis de fluidos Newtonianos; equações acerca do tratamento da turbulência pelo emprego da Simulação de Grandes Escalas (“*Large Eddy simulation*” - LES) juntamente com os modelos sub-malha clássico e dinâmico de Smagorinsky, além da formulação da teoria de controle PID. No Capítulo 6 encontram-se detalhes sobre o *software* Gmsh, utilizado para elaboração de geometrias e malhas referentes às simulações realizadas, além de comentários acerca dos algoritmos implementados e dos parâmetros a serem determinados. O Capítulo 7 traz uma série de exemplos utilizados para verificar e validar o código, bem como o estudo da distribuição das pressões e circulação de ar no interior e ao redor das edificações, avaliando os parâmetros da ventilação natural, além do desenvolvimento das análises estáticas e dinâmicas juntamente com a aplicabilidade da teoria de controle PID para o acionamento do *spoiler*. E, no Capítulo 8, as conclusões e recomendações para trabalhos futuros são indicadas.

## 2 AÇÃO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES BAIXAS: CARGAS AERODINÂMICAS E FORMAS DE MITIGAÇÃO DE PRESSÕES NA COBERTURA

### 2.1 INTRODUÇÃO

A incidência direta do vento sobre edificações baixas produz uma elevada carga atuante sobre a cobertura. Algumas falhas estruturais, nesse sistema, podem ser encontradas, devido aos grandes picos de sucção resultantes dos vórtices formados a partir da separação do escoamento em cantos e arestas (Banks, 2000). Com aberturas a barlavento, uma pressurização interna é percebida e a ocorrência de prejuízo às estruturas é mais provável devido à soma nociva das pressões externa e interna (Huang et al., 2014), aumentando o carregamento sobre a estrutura (Moonegui e Kargarmoakhar, 2016). Portanto, entender como é realizado o cálculo e a obtenção das ações aerodinâmicas nas estruturas é essencial para um correto dimensionamento. Neste contexto, este capítulo apresenta algumas etapas para a determinação das ações, recomendações de análises, as quais devem ser realizadas para compreender o efeito da distribuição das pressões nas estruturas, e apresentação dos dispositivos dissipadores.

### 2.2 FORÇAS DEVIDO AO VENTO: NBR 6123:1988

As forças estáticas devidas ao vento são determinadas a partir da velocidade básica ( $V_0$ ), adequada ao local onde a estrutura será construída, conforme o mapa de isopletas (ver ABNT NBR 6123:1988). A multiplicação pelos fatores  $S_1$  (topográfico),  $S_2$  (considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo e de sua altura sobre o terreno) e  $S_3$  (estatístico) garante a obtenção da velocidade característica do vento (Equação 2.1), essencial para a determinação da pressão dinâmica (Equação 2.2).

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (2.1)$$

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (2.2)$$

A partir da pressão dinâmica ( $q$ ) pode-se obter os coeficientes de pressão atuantes sobre a estrutura. Como a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte edificada em estudo, os coeficientes são informados em função das superfícies externas e internas. Assim, a pressão efetiva ( $\Delta P$ ) em um ponto da superfície da edificação é dada por:

$$\Delta P = P_e - P_i = c_p q = (c_{p,e} - c_{p,i})q \quad (2.3)$$

onde  $P_e$  corresponde à pressão externa,  $P_i$  à pressão interna,  $q$  é a pressão dinâmica de referência,  $c_p$  é o coeficiente de pressão e  $c_{p,e}$  e  $c_{p,i}$  são os coeficientes médios de pressão externo e interno, respectivamente, dados por:

$$c_{p,e} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad \text{e} \quad c_{p,i} = \frac{\Delta p_i}{q} \quad (2.4)$$

onde  $\Delta p_e$  é a pressão estática efetiva média em um ponto na superfície externa da edificação e  $\Delta p_i$  é a pressão estática efetiva média em um ponto na superfície interna da edificação. Valores positivos dos coeficientes de pressão externa ou interna correspondem a sobrepressões, enquanto que valores negativos representam sucções (NBR 6123:1988).

O método de medição dos coeficientes de pressão (valores adimensionais) permite comparar valores fornecidos pela norma com os de simulações numéricas ou de ensaios em túneis de vento, os quais apresentam resultados mais precisos por simularem a real condição da edificação e vizinhança.

A força do vento sobre um elemento plano de área ( $A$ ) da edificação atua na direção perpendicular a ele e é dada pela seguinte equação:

$$F = F_e - F_i = (C_e - C_i)qA \quad (2.5)$$

onde  $F_e$  é a força externa à edificação,  $F_i$  corresponde à força interna,  $C_e$  o coeficiente de forma externo e  $C_i$  o coeficiente de forma interno. Os coeficientes de forma são fornecidos pelas equações abaixo:

$$C_e = \frac{F_e}{qA} \quad \text{e} \quad C_i = \frac{F_i}{qA} \quad (2.6)$$

Da mesma maneira, valores positivos dos coeficientes de forma externo e interno correspondem a sobrepressões e valores negativos à sucções. É importante observar que a NBR 6123:1988 prevê apenas casos onde a pressão interna é considerada uniformemente distribuída. Conseqüentemente, em superfícies planas considera-se:  $c_{p,i} = C_i$ .

A força global do vento sobre uma edificação ou parte dela é obtida pela soma vetorial das forças de vento atuantes. A componente da força global na direção do vento ( $F_a$  – Força de Arrasto) é dada por:

$$F_a = C_a q A_e \quad (2.7)$$

onde  $A_e$  é a área frontal efetiva e  $C_a$  o coeficiente de arrasto. De uma maneira geral, uma componente da força global é dada por:

$$F_f = C_f q A \quad (2.8)$$

onde  $C_f$  é o coeficiente de força para o caso das direções X e Y.

Através de tabelas para vários tipos de edificações e direções críticas do vento, a NBR 6123:1988 traz valores para coeficientes de pressão médios e de forma externos. Em zonas críticas, como aquelas com altas sucções, junto às arestas de paredes e de telhados, coeficientes diferentes dos médios apresentados pelas tabelas são encontrados, devendo ser utilizados somente para o cálculo das forças devidas ao vento nessas respectivas zonas.

A NBR 6123:1988 discute a permeabilidade das paredes, definindo-a como a razão entre a área das aberturas e a área total da parede e estabelecendo limites para que a construção se mantenha estanque e preserve sua estrutura de acordo com a vida útil de projeto. De acordo com o índice de permeabilidade, os coeficientes de pressão interna são modificados com o tempo e com a velocidade de incidência do vento. Se uma edificação for totalmente impermeável, a pressão interna não irá variar com o tempo e será independente da velocidade da corrente de ar externa. Uma abertura dominante, segundo a normativa, é aquela cuja área é igual ou superior à área total das outras aberturas que constituem a permeabilidade de uma superfície externa. Esta pode ocorrer por acidente como a ruptura de vidros fixos causada pela pressão do vento ou por objetos lançados na estrutura.

Para edificações com paredes internas permeáveis a pressão interna pode ser considerada uniforme e, nestes casos, a norma apresenta valores pré-fixados para o coeficiente de pressão interna (ver item 6.2 da NBR 6123:1988). Contudo, entende-se que quando há aberturas acidentais na edificação esses índices serão modificados e muitas vezes o início da ruína de uma estrutura pode ser iniciado neste ponto.

Em edificações baixas, quando imersas em regiões onde a turbulência é elevada, as cargas de telhado possuem uma importância crítica, cujas ações, geralmente as sucções, são capazes de levar às principais falhas estruturais. Conforme Blessmann (2011) (ver Figura 2.1), as ações locais mais nocivas são provocadas devido a dois vórtices de topo, os quais surgem quando o ângulo de inclinação do vento está em torno de  $45^\circ$ , onde grandes sucções são encontradas. Esse fenômeno gera uma força de elevação capaz de arrancar as coberturas nas áreas mais solicitadas, localizadas próximo às quinas de barlavento. Em ventos a  $90^\circ$ , contrariamente a algumas normas ainda em uso, Blessmann (2011) verificou experimentalmente que maiores sucções podem aparecer em telhados com inclinação entre  $8^\circ$  e  $12^\circ$ , sendo que um aumento no ângulo pode provocar a tendência de diminuição das sucções. A Figura 2.2 ilustra a influência do aumento do ângulo de inclinação na distribuição das pressões sobre a cobertura. A face de barlavento apresenta duas regiões: uma influenciada pela rugosidade e pela pressão existente na parede de barlavento, causando redemoinhos cônicos, e outra de corrente livre, com suas linhas desviadas pela edificação e pelo vórtice de base (Blessmann, 2009).

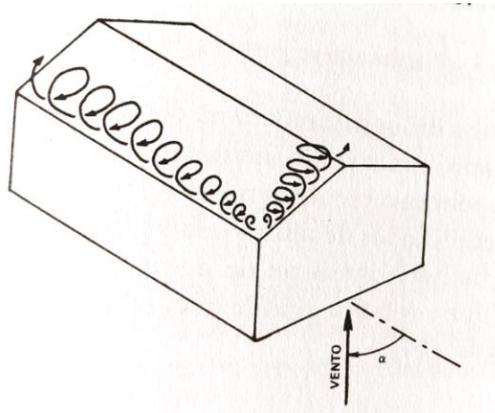


Figura 2.1 Formação de vórtices no canto a barlavento (Blessmann, 2009, p.90 )

h/b	Inclinação do telhado - $\theta$			
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
0,5				

Figura 2.2 Influência da inclinação do telhado na distribuição de pressões (Blessmann, 2009, p.108 )

Rajadas de vento incidindo a  $45^\circ$  sobre a edificação provocam no ponto de separação do escoamento ações ainda mais nocivas do que para um vento perpendicular, isso porque as pressões estáticas negativas são mais significativas quando combinadas às dinâmicas, levando a grandes picos de sucção nessas regiões.

A determinação da pressão interna, através do coeficiente de pressão interna, varia com a magnitude e localização das aberturas (Figura 2.3) em relação ao ângulo de incidência do vento. Quando essas faces com aberturas dominantes estão localizadas a barlavento, a pressão interna será positiva, que se somará com a sucção externa, criando uma situação de risco elevado para a estabilidade das coberturas (caso a). Mas, com aberturas a sotavento ocorre uma sucção interna, que promove a estabilidade estrutural, diminuindo os riscos de acidentes (caso b), assim como as aberturas, que possibilitam uma ventilação cruzada (caso c).

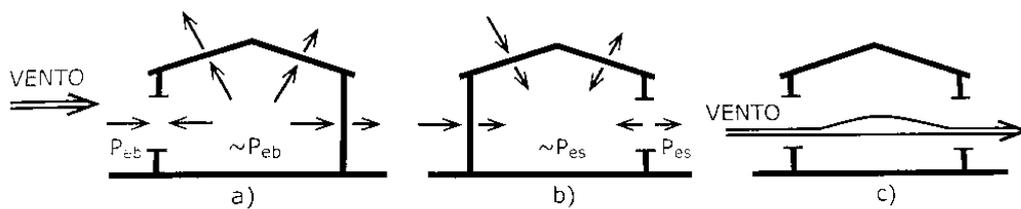


Figura 2.3 Situações típicas de pressões no interior e exterior das edificações (Fonte: LOREDO-SOUZA, 1992)

A pressão no interior das construções pode sofrer alteração, segundo Loredou-Souza (1992), devido a três fatores principais: ação do vento; gradientes térmicos entre o interior e exterior; ventilação. Assim, o escoamento no interior é função principalmente da diferença de pressão interna e externa.

## 2.3 ACIDENTES OCACIONADOS PELO VENTO E MEDIDAS PREVENTIVAS

De acordo com Blessmann (2001), a importância dos efeitos do vento nas construções está diretamente relacionada com o desenvolvimento de tecnologia dos materiais, da ciência técnica das construções, bem como da melhor ocupação do terreno e com a construção de edifícios mais altos. O vento se tornou, ao passar dos anos, uma ação essencial para o dimensionamento à medida que as construções ficaram mais esbeltas e passaram a utilizar menor quantidade de material. Ainda, conforme o autor, a maioria dos acidentes ocorre em construções leves com

grandes vãos livres, visto que nessas obras é comum se ter o arrancamento parcial ou total das telhas. Segundo Blessmann (2001), o ângulo de incidência do vento e as proporções entre as dimensões da construção são dois fatores que influenciam no coeficiente de forma. Conforme o autor, as inclinações de 15°, 30° e 45° ocasionam grandes sucções nas paredes de incidência, resultando em possíveis acidentes construtivos durante a fase de execução dos projetos.

Algumas causas de acidentes em coberturas são ligadas às falhas estruturais, ocorridas por falta de ancoragem do telhado, contraventamentos insuficientes e, em alguns casos, ao mal dimensionamento. No Brasil, a maior parte dos acidentes registrados deriva desses fatores que, combinados com os fatores aerodinâmicos, provocaram grandes desastres com perdas significativas, como enfatiza Blessmann (2001). Essas ruínas indicam que as estruturas de cobertura, principalmente em edifícios baixos, geralmente sofrem danos devidos a pressões negativas geradas pelo vento atuante nas regiões próximas às arestas do telhado.

Para Blessmann (2001), a maior parte dos acidentes causados pelo vento são em geral evitáveis se as devidas precauções forem seguidas, tais como: considerar os coeficientes aerodinâmicos reais (obtidos por normas ou ensaios em túneis de vento); determinar corretamente as sucções externas (que aparecem principalmente em telhados pouco inclinados ou curvos) e as pressões internas; atentar à disposição das aberturas permanentes como forma de analisar a distribuição da pressão; os vidros e ferragens de portas e janelas devem resistir aos esforços do vento; ancorar e contraventar corretamente as estruturas; as fundações devem ser suficientemente pesadas e profundas para evitar tombamento ou ascensão da estrutura; as ligações entre os diferentes elementos estruturais devem ser capazes de resistir aos esforços horizontais e verticais do vento. Além disso, na fase de projeto é possível adotar algumas providências que ocasionam uma diminuição dos esforços devidos ao vento. Para edificações leves e baixas é recomendado: usar telhados com inclinações superiores a 20°; telhas de barro (visto que, são mais estáveis do que as de fibrocimento e metálicas); evitar a formação de sobrepressões externas junto a paredes vazadas com venezianas ou outras aberturas permanentes, pois esta sobrepressão passará ao interior, aumentando a força ascensional sobre o telhado; evitar que durante a execução da obra surjam sobrepressões internas de alto valor; usar aberturas permanentes em locais apropriados; seguir as indicações da norma brasileira NBR 6123:1988; usar quebra-ventos de árvores, dispostos a barlavento da edificação, considerando a orientação de onde provem os ventos mais velozes; evitar edificações em topos de morro, onde o efeito Venturi é acentuado.

Outras estratégias para mitigação das pressões aerodinâmicas nos telhados de edifícios baixos vêm sendo empregadas, seja através de modificações na geometria das bordas da cobertura ou pela inclusão de dispositivos arquitetônicos como *spoilers*, beirais e parapeitos (Li et al., 2018). Essas técnicas são capazes de produzir respostas efetivas para a prevenção de alguns desastres, reduzindo as cargas de vento no telhado dos edifícios (Aly e Bresowar, 2016). Contudo, é um desafio implementar uma estratégia mitigadora que ao mesmo tempo seja compatível arquitetonicamente com as construções já existentes, mantendo a estética da construção e não alterando seu carregamento estrutural. Para Surry e Lin (1995), as várias configurações geométricas utilizadas para o alívio da pressão de sucção no canto e arestas do telhado devem ser classificadas de acordo com seus efeitos: elevar os vórtices para longe da superfície da cobertura; impedir ou perturbar a formação dos vórtices; minimizar o efeito da separação do escoamento. A seguir, algumas dessas técnicas e suas contribuições serão exemplificadas.

A técnica de modificação da geometria do telhado refere-se a algumas alterações nas bordas (ver Figura 2.4) com o intuito de modificar o padrão de escoamento e, por consequência, o comportamento aerodinâmico de telhados, sendo esse método mais comumente encontrado em edifícios de telhados planos. O estudo realizado por Aly e Bresowar (2016) enfatizou que o efeito do arredondamento das bordas é o mais eficiente no alívio dos picos de sucções. Contudo, os experimentos de Robertson (1991) demonstraram que apesar da redução da pressão significativa nas arestas (40%), o efeito próximo ao centro é o oposto. Segundo o autor, os vórtices desviados atingem a região central gerando pressões 30% maiores que nos casos onde não há modificações, sendo de certo modo ineficientes (ver Aly e Bresowar, 2016).

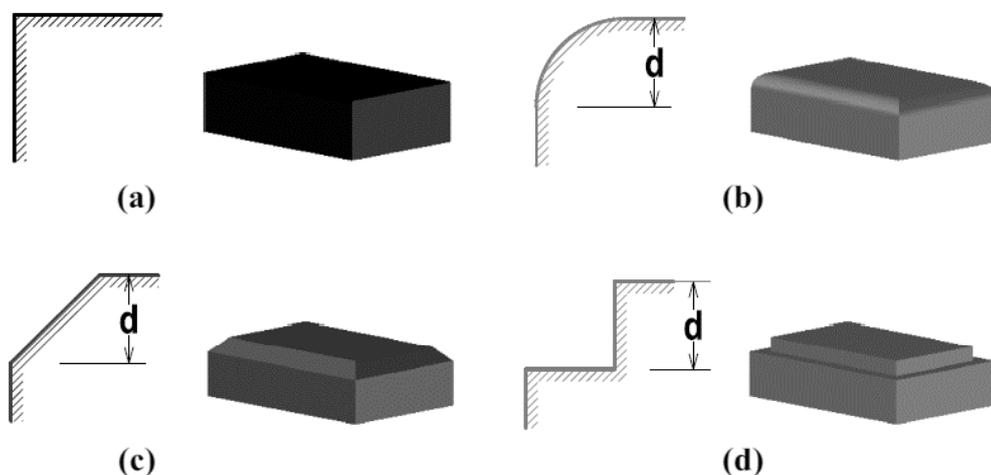


Figura 2.4 Alteração nas bordas de edificações com telhados planos (a) sem alteração; (b) com arredondamento; (c) modificação inclinada; (d) estilo degrau (Aly e Bresowar, 2016)

Por outro lado, a inserção de um dispositivo perturbador, quando anexado corretamente, pode aliviar as pressões negativas, interrompendo a formação ou desviando os vórtices para uma região longe da superfície da cobertura. Assim, os parapeitos (ver Figura 2.5) apresentam-se como os dispositivos mais populares devido a sua configuração arquitetônica comum. Eles podem ser encontrados na forma contínua (Figura 2.5 a) ou descontínua (Figura 2.5 b) e ainda serem porosos ou sólidos ou reforçados (Figura 2.5 c). Normalmente são encontrados em telhados planos, porém seus efeitos são mais eficazes na mitigação das pressões, atuando no canto da superfície dos telhados e elevando os vórtices, de modo que as camadas de cisalhamento não interajam mais com a cobertura (Kopp et al., 2005). No entanto, quanto mais alto o parapeito, maior a carga estrutural agindo sobre as paredes da edificação, a qual é somada com a pressão positiva atuante derivada da ação do vento. Neste sentido, a sobrecarga gerada por esse perturbador deve ser criteriosamente obtida a fim de um correto dimensionamento. Para Kopp et al. (2005), os parapeitos contínuos e sólidos (Figura 2.5 a) representam a pior configuração, isto porque, mesmo desviando os vórtices, ocasionam uma grande sobrecarga nas paredes da construção, impossibilitando sua inserção em uma edificação já existente. Conforme Bitsuamlak et al. (2013) e Huang et al. (2014), os dispositivos devem ser simples e atuar como mitigadores aerodinâmicos, inseridos nas coberturas de modo a não acrescentar elevado carregamento em estruturas novas ou existentes.

Desta maneira, parapeitos descontínuos nos cantos foram propostos por Baskaran e Stathopoulos (1988), sugerindo que ao serem removidos dessas regiões o pico de sucção não é minimizado (Figura 2.5 b). Além disso, esta estratégia pode ocasionar tantos danos à estrutura como um parapeito sólido e contínuo. Assim, parapeitos descontínuos existentes somente nas regiões de canto são uma alternativa que inibe a formação dos vórtices, gerando um alívio de carga em todas as regiões da cobertura (Kopp, 2005). Parapeitos descontínuos e porosos com furos circulares foram o alvo de estudos de Azzi et al. (2018), onde foi comprovado que esse modelo é capaz de reduzir até 40% os valores dos coeficientes médios de pressão existentes na cobertura e níveis de 70% em relação aos picos de sucção, considerando edificações com telhados planos. Conforme Surry e Lin (1995), a interrupção da formação de vórtices ao longo da aresta ocorre devido a absorção da energia do escoamento pela tela, antes atuante diretamente na superfície do telhado. Banks (2000) ressalta que a eficácia dos parapeitos porosos circulares é 50% maior do que a apresentada por parapeitos com furos retangulares. Masuyama et al. (2020) estudaram os efeitos de uma placa vertical disposta em telhados planos, onde foi demonstrado que, dependendo da inclinação de incidência do vento, a inserção de

placas apenas em um canto do telhado é prejudicial, aumentando a intensidade dos vórtices cônicos e, por consequência, a carga sentida pelo telhado.

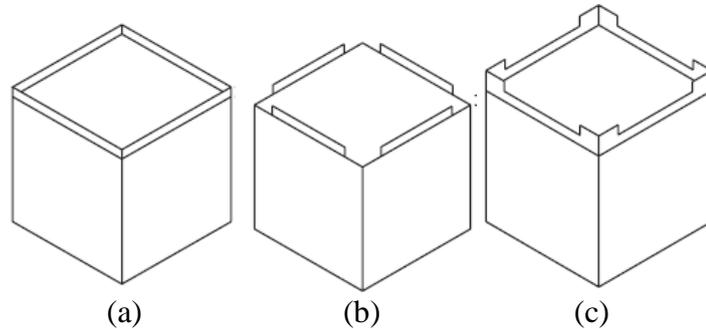


Figura 2.5 Inserção de parapeitos em edificações de telhados planos  
(a) parapeito sólido; (b) parapeito descontínuo nos cantos; (c) parapeito reforçado no canto; (Koop et al., 2005)

Embora essas configurações resultem em benefícios para telhados planos, telhados de duas ou mais águas, especialmente com baixas inclinações, apresentam grandes riscos de ruptura quando ventos com certos ângulos de incidência atuam sobre os mesmos. Para Huang et al. (2014), a presença de calhas ou beirais é capaz de gerar uma significativa redução nos picos de sucção próximo a eles. No entanto, dificilmente são capazes de impactar sobre toda a carga que age no telhado, porém, alguns elementos menores anexados aos beirais ou à estrutura da cobertura foram capazes de reduzir a pressão em todo telhado.

Neste contexto, outros dispositivos vêm sendo investigados, como *spoilers*, propostos inicialmente por Wu (2000), e painéis solares (Figura 2.6), recentemente estudados por Aly et al. (2017). A inserção de painéis solares é capaz de reduzir as cargas de vento atuantes sobre edificações baixas, melhorando o desempenho do sistema estrutural de cobertura e ainda fornecer energia renovável (Aly et al., 2017). No entanto, para os autores, quando a eficiência da mitigação é comparada com a do *spoiler*, as placas solares não são tão relevantes.

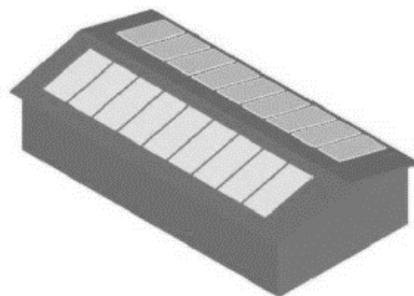


Figura 2.6 Inserção de painéis solares em telhados com duas águas  
(Aly et al., 2017)

Para Wu (2000), *spoilers* são dispositivos facilmente inseridos sobre os telhados de edificações já existentes ou novas. Através de ensaios em túneis de vento, observou-se uma redução de 50% nos picos de sucção, pois o ar que passa abaixo do dispositivo interrompe a formação dos vórtices nos cantos e bordas agudas. Neste trabalho os *spoilers* serão os dispositivos utilizados como forma de mitigar as altas pressões existentes em coberturas com duas águas de edificações baixas. Deste modo, a seção a seguir traz algumas análises a respeito desse tipo de perturbador.

### 2.3.1 Dispositivo aerodinâmico para mitigação - *Spoilers*

Atualmente, uma das formas eficientes para mitigar as pressões é com a utilização de *spoilers*, dispositivos aerodinâmicos perturbadores utilizados para, de acordo com Li et al. (2018), interromper a formação de vórtices e reduzir em cerca de 80 a 90% o pico de sucção existente nos cantos dos telhados. Os autores ressaltam que se deve projetar e escolher o dispositivo de acordo com as características geométricas do telhado, a fim de minimizar o efeito da força extra de elevação, as quais são atuantes nos próprios apêndices. Assim, além de prevenir os acidentes ocasionados pelo vento típico da CLA (camada limite atmosférica), os *spoilers* podem reduzir as cargas, mesmo quando eventos extremos ocorrem. A Figura 2.7 traz diferentes configurações de fixação em coberturas. Cabe ressaltar que o modelo E (localizado na aresta – Figura 2.7 a) promove as melhores mitigações de pressões, sendo o mais eficiente, ao passo que o modelo R (presente na cumeeira – Figura 2.7 c) e o modelo G (Figura 2.7b) não alteram os coeficientes de pressão, sendo, portanto, desprezáveis.

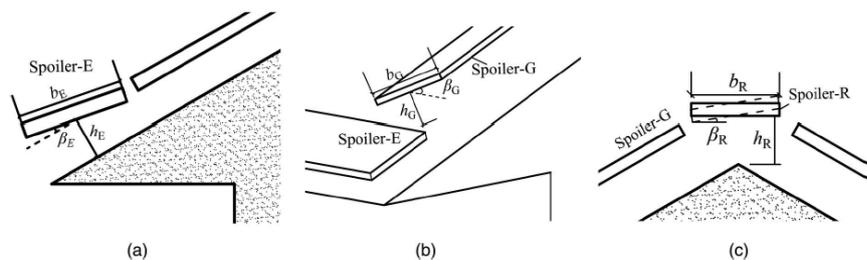


Figura 2.7 Exemplos de *spoilers* (Li et al., 2018, p.4)

Li et al. (2018) consideraram uma edificação baixa de cobertura em duas águas com uma inclinação de  $30^\circ$  com várias disposições e dimensões de *spoilers* (Figura 2.7). Os ensaios em túneis de vento com a inserção dos *spoilers* em alguns pontos do telhado resultaram nas seguintes observações: na água a sotavento o ângulo ideal de posicionamento do apêndice ( $\beta_E$ ) é  $0^\circ$  (com a horizontal), enquanto que na face de barlavento o ideal é variar entre  $10^\circ$  e  $25^\circ$  (rotação no sentido horário), devendo possuir uma altura ( $h_E$ ) de 0,2 a 0,6 m e sua largura ( $b_E$ )

deve corresponder a 2,5% do comprimento total do edifício. No entanto, os autores reiteram a necessidade de avaliar as forças de elevação atuantes sobre o *spoiler* como forma de garantir o dimensionamento correto do mesmo.

A utilização de algoritmos de controle como meio de projetar estruturas inteligentes capazes de reduzir as elevadas cargas presentes na estrutura devidas à circulação externa e interna tem sido cada vez mais necessária devido à quantidade crescente de acidentes que comumente ocorrem em edificações baixas, principalmente aquelas localizadas em áreas de campos abertos ou rurais. O funcionamento desses algoritmos ocorre por meio do acionamento de dispositivos aerodinâmicos (*spoilers*), os quais são capazes de aliviar as pressões das coberturas. Esse método possibilita o controle através da avaliação das cargas percebidas pela edificação com a alteração do ângulo do dispositivo, que ajusta a forma como o escoamento incide sobre o telhado. A formulação da teoria de controle é apresentada no Capítulo 5, já a elaboração completa da teoria para o caso dos *spoilers* pode ser observada no Capítulo 7. É importante ressaltar que, até o momento, foram estudados apenas dispositivos mitigadores fixos, sendo que neste trabalho propõe-se a utilização de dispositivos que podem rotar automaticamente de acordo com os efeitos causados no telhado pelo escoamento incidente.

Ademais, os dispositivos devem ser resistentes o suficiente para não serem arrancados e arremessados em outras estruturas, visto que estão submetidos a uma força de elevação e arrasto extremos (Azzi et al., 2018). Logo, o desafio é explorar os recursos dos dispositivos mitigadores para reduzir a pressão não apenas nos cantos, mas também em todo o telhado, para que um carregamento mínimo aja sobre a estrutura (Aly e Bresowar 2016). Blessmann (2001) enfatiza a importância quanto a instalação de dispositivos nas construções, visto que a eventual falta de limpeza ou manutenção não venha a prejudicar seu funcionamento e desempenho, sendo necessário avaliar essa capacidade atrelada às piores condições de uso.

### 3 CIRCULAÇÃO DE AR: ASPECTOS TEÓRICOS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão de alguns estudos, explicação de conceitos, classificações acerca da ventilação natural em edificações e normativas existentes para o desenvolvimento de projetos. O objetivo é demonstrar a importância do problema investigado nessa pesquisa e ressaltar pontos que devem ser considerados nos projetos com o intuito de obter a eficácia máxima para a ventilação natural. Com a avaliação das diferentes disposições e tamanhos das aberturas será possível identificar e entender os casos que levam às piores cargas estruturais. Assim, pela influência da ventilação determinar-se-á a configuração mais nociva de aberturas para galpões industriais, que deverá ser analisada juntamente com os *spoilers*.

#### 3.2 VENTILAÇÃO

O conceito de ventilação é atrelado ao efeito da circulação de ar nas construções, o qual, por sua vez, associa-se ao escoamento externo devido ao vento. Tratando-se, então, de um processo natural ou mecânico de fornecimento e remoção de ar de um ambiente, tendo como objetivo: controlar a pureza do ar e auxiliar no manejo da temperatura e umidade do local. A temperatura ideal interna está ligada ao conceito de conforto térmico, sendo, segundo o guia AIVC (*Air Infiltration and Ventilation Centre*) (1996), o estado de satisfação com o ambiente térmico onde o indivíduo está inserido, o qual depende de fatores humanos (atividade a que o local se destina), bem como de fatores climáticos (temperatura, umidade, velocidade do ar).

As edificações podem apresentar ventilação permanente (por elementos que estarão sempre abertos, permitindo a constante circulação) ou controlada (por componentes móveis, de forma automática ou por usuários dos ambientes). Quando uma abertura não prevista ocorre (devido a estilhaços arremessados pelo vento, por exemplo), a ventilação pode ser chamada de acidental. Edifícios ventilados naturalmente promovem um melhor controle do ambiente interno e permitem a adaptação à variabilidade climática da região.

Quando a circulação de ar é promovida por condições naturais denomina-se ventilação natural, já quando é resultado de equipamentos mecânicos, ventilação mecânica. Esta última é relacionada ao processo de ventilação, resfriamento e aquecimento de ambientes por meio de

aparelhos mecânicos. Assim, apesar desse método ser eficiente, apresenta um alto consumo de eletricidade e baixas taxas de remoção dos poluentes. Para Omrani et al. (2017), os altos níveis de consumo de energia elétrica e emissão de gases de efeito estufa em centros urbanos estão ligados à estratégia de ventilação mecânica e, por essa razão, construções que oferecem um resfriamento passivo tornaram-se mais atraentes e prioridades de escolha com o passar dos anos. Conforme Zhu (2016), a aceleração da urbanização descontrolada reduziu a eficiência do movimento de ar nas ruas e o desprezo pela técnica de ventilação natural promoveu a falta de ar limpo dentro das edificações, ao mesmo tempo em que um aumento da intensidade das ilhas de calor nas cidades foi registrado.

O desempenho da estratégia passiva de circulação de ar é relacionado a fatores externos e internos, os primeiros incluem a geometria urbana, tipo do edifício (residencial ou comercial) e sua exposição aos ventos dominantes, além das condições microclimáticas. Por outro lado, os fatores internos dependem do *layout* das partições e configurações das aberturas (Sales, 2016). Ainda, o *design* da arquitetura deve basear-se em princípios sustentáveis, ecológicos e de economia de energia, considerando ângulos e níveis construtivos (Zhu, 2016). A economia de energia também é alcançada quando a iluminação natural é eficiente, devendo ser levada em consideração pelos projetistas.

Segundo Tong et al. (2016), a ventilação natural é uma das estratégias sustentáveis mais importantes para edifícios e projetos bem sucedidos analisam criteriosamente a pressão, a velocidade do vento e os edifícios do entorno (vizinhança), isso porque a construção de edificações altas em grandes centros urbanos altera as características do vento predominante. A ventilação natural pode ser descrita por duas componentes: uma resultante da pressão média no entorno das aberturas e outra parcela flutuante, impulsionada por escoamentos turbulentos. Segundo Straw (2000), quando existir um número alto de aberturas nas faces externas do edifício o primeiro termo é dominante, já quando houver apenas uma abertura principal e quando a maioria das aberturas está localizada em zonas de pressões semelhantes, a segunda parcela se destaca, promovendo a convecção natural.

As paredes expostas ao vento incidente (faces de *barlavento*) apresentarão pressões positivas, enquanto que as paredes opostas (faces *sotavento*) e as laterais às correntes de ar possuirão pressão negativa. Essa situação promove as condições necessárias para a existência da ventilação e, por essa razão, é comum notar que as faces de *barlavento* possuem as aberturas de

entrada de ar, enquanto que as de sotavento apresentam as de saída (Sales, 2016). A Figura 3.1 demonstra essas relações com as correntes de ar.

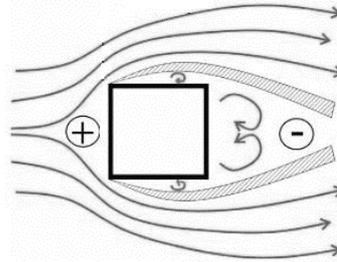


Figura 3.1: Correntes de ar ao redor de uma edificação – pressões positivas e negativas (Givoni, 1962)

A pressão interna, para Blessmann (2013), depende da localização, tipo e área das aberturas, bem como repartições internas e de seu grau de estanqueidade. Assim, a distribuição de pressões internas é função da distribuição das pressões externas, as quais variam ao longo do edifício de acordo com a forma, dimensões e característica da construção, bem como com a magnitude e direção do vento dominante.

Desta maneira, o dimensionamento das áreas de aberturas exerce papel preponderante no sucesso do projeto de ventilação natural. Atualmente, é necessário realizar investigações paramétricas e fornecer um conjunto simples de diretrizes para a arquitetura das aberturas de janelas e sua colocação na fachada (Sales, 2016). Os critérios de seleção devem basear-se em forças motrizes induzidas pelo vento, vazões de ventilação, distribuição do escoamento de ar, bem como questões relacionadas ao projeto da carga de vento. Conforme Givoni (1962), aberturas de saída de ar maiores que as de entrada promovem uma redução do fluxo de ar (diminuição da velocidade – oposto ao efeito Venturi), ao passo que propicia uma distribuição de velocidade interna mais uniforme. Já aberturas de mesmo tamanho para entrada e saída possuem a média da velocidade interna dependente da porosidade da edificação (razão entre a área de abertura pela área da parede onde está localizada).

A localização das aberturas deve variar, quando possível, em função dos ventos predominantes na região e com a forma de ventilação escolhida. Segundo Bittencourt e Cândido (2010), de maneira geral, as aberturas devem ter seu ponto médio a meia altura de um habitante, para que este perceba a ventilação no seu potencial máximo. É fundamental posicioná-las a fim de garantir a distribuição das correntes de ar no interior, resultantes dos campos de pressões gerados no entorno das aberturas. Segundo Izadyar et al. (2020), um ambiente com aberturas

em paredes opostas possui a velocidade do ar interno maior para ventos a 45° do que para aquelas perpendiculares ao plano da janela, enquanto que aberturas em paredes adjacentes a velocidade é maior para o vento perpendicular ao plano da parede.

A forma das aberturas (geometria retangular e quadrada) e a orientação (vertical e horizontal) foi avaliada por Givoni (1962) quanto ao desempenho da ventilação. A eficácia máxima da ventilação ocorreu para a abertura retangular horizontal, principalmente em incidências oblíquas de vento, onde essa geometria promoveu a melhor distribuição do escoamento no interior do ambiente estudado. No entanto, existem vários tipos de esquadrias presentes no mercado da construção civil e a escolha para cada projeto varia com a função destinada e o sistema construtivo empregado (Bittencourt e Cândido, 2010). Cada tipo de esquadria possui um percentual de abertura, o qual corresponderá à área efetiva utilizada para a ventilação. Em regiões com maior amplitude de temperatura é necessário que o usuário possa abri-la ou fechá-la totalmente de acordo com as características do clima. Assim, escolher a tipologia que ofereça maior flexibilidade no direcionamento do fluxo, bem como um maior controle da porosidade, é importante para garantia de um ambiente ventilado.

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural possui várias classificações relativas ao processo de condução da circulação do vento no interior do ambiente. Na sequência são apresentadas e descritas suas principais formas.

**Ventilação por efeito chaminé:** deriva de um processo que leva em conta apenas a diferença de pressão resultante da diferença de temperatura entre o ar interno e externo. No interior, o ar está condicionado a elevação de temperatura, tornando-se menos denso e com tendência natural a ascensão. O efeito chaminé funciona quando se propõe aberturas no topo (lanternins, exaustores eólicos ou aberturas zenitais) e no pé da construção (janelas e portas) (ver Figura 3.2), pois as aberturas inferiores são responsáveis pela entrada de ar mais frio e mais denso, enquanto que as superiores se encarregam da saída do ar mais quente, criando correntes de convecção. Deve-se garantir que a geometria de saída ofereça uma resistência mínima ao fluxo de ar, a fim de permitir que o mesmo flua livremente. Segundo Péren et al. (2015), a direção do vento atrelada à configuração do telhado promove diferentes eficácias dessas construções. Essa estratégia de convecção natural funciona adequadamente até em áreas de “vento calmo”, onde a velocidade de incidência do vento é pequena, e em áreas de “zona neutra”, onde as pressões

internas são iguais às externas, pois as aberturas nessa disposição ainda são capazes de promover a circulação (Bittencourt e Cândido, 2010). Outra forma de otimizar a ventilação com convecção natural é nos edifícios denominados torres eólicas, cuja construção leva à refrigeração da massa edífica, pois os corredores apresentam aberturas de entrada de ar, que direcionam o escoamento até as aberturas presentes no telhado.

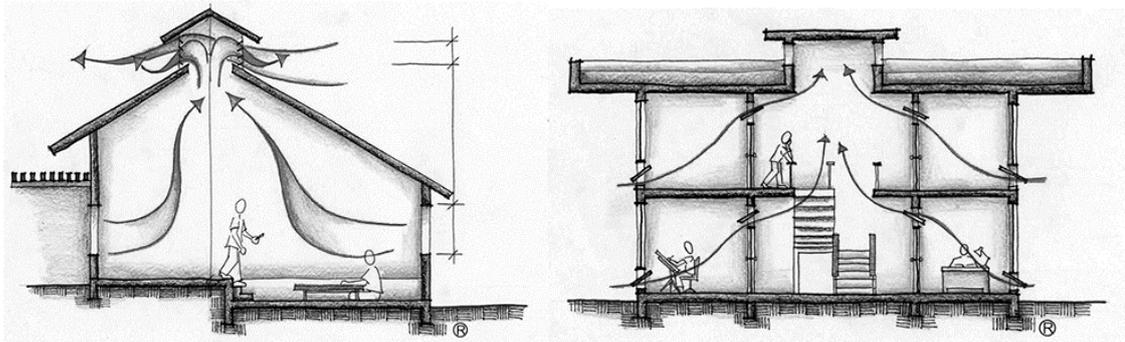


Figura 3.2 Ventilação por efeito chaminé (Fonte: <http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-11.jpg> acesso em 15 de Janeiro de 2020)

**Ventilação cruzada (“*Cross-Ventilation*”):** a circulação de ar resulta de aberturas em lados opostos ou em paredes adjacentes, cuja diferença de pressão possibilita o fluxo. Para Ayad (1999), a ventilação cruzada promove a remoção do calor devido às trocas convectivas aceleradas, melhorando a sensação térmica dos habitantes. Normalmente, esse tipo de ventilação é realizado por janelas e, por consequência, não apresentam distâncias verticais tão diferenciadas como na ventilação estilo chaminé. Nesse sistema, o escoamento é acionado pelo vento, devido à turbulência do mesmo, gerada devido a mudanças temporais na velocidade e direção do mesmo, ou pela própria vizinhança do entorno. Arinami et al. (2019) classificam esse tipo de ventilação natural como a estratégia mais eficiente de circulação de ar. Em suma, para garantir a ventilação com esse método, deve-se produzir grandes diferenças de pressões entre as aberturas, pois mesmo que haja presença significativa de ventos, caso a condição anterior não seja satisfeita, não irão ocorrer correntes cruzadas. Esse fato demonstra que a quantidade de acessos ao exterior é fator preponderante quando a face em que se encontram as aberturas for perpendicular à direção de incidência da rajada, pois potencializa o efeito da ventilação cruzada, fato que pode ser observado através da Figura 3.3.

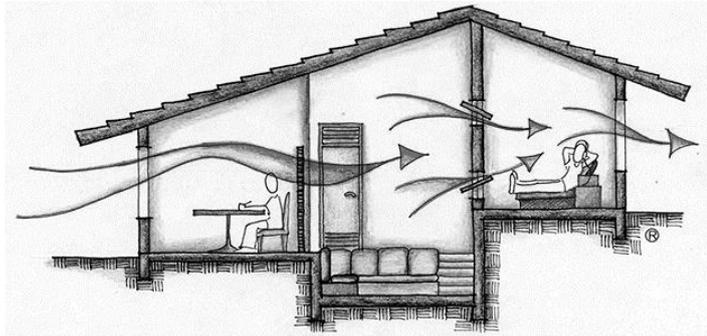


Figura 3.3: Ventilação cruzada (Fonte: <http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-6.jpg> acesso em 15 de Janeiro de 2020)

**Ventilação unilateral:** é apresentada como uma variação das estratégias de ventilação cruzada, a qual ocorre por meio de aberturas situadas em um único lado do ambiente. Esse tipo só é eficiente quando se trata de um pequeno cômodo, provocando apenas uma solução local, visto que a ventilação unilateral apresenta uma faixa limitada de circulação de ar. Pouco atraente, essa técnica é mais utilizada em escritórios ou em alguns casos simples de cômodos em residências de baixo padrão. A Figura 3.4 demonstra um exemplo de ambiente em que há aberturas apenas em uma das paredes externas, portanto, todas estão sujeitas à mesma pressão e conforme Zhong et al. (2018), a circulação de ar não é satisfatória quando as rajadas são perpendiculares. Contudo, se o vento dominante for oblíquo ou paralelo, há criação de zonas artificiais de alta e baixa pressão, induzindo a circulação de ar. Em seu trabalho, os autores enfatizam a necessidade de cuidar o espaçamento entre as aberturas e propõem que se deve tomar no mínimo o dobro em relação à largura da janela proposta, a fim de gerar grande turbulência internamente, promovendo uma ventilação satisfatória.

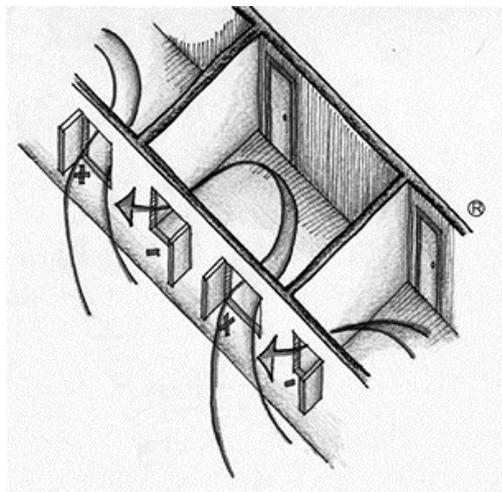


Figura 3.4: Ventilação Unilateral (Fonte: <http://projeteee.mma.gov.br/wp-content/uploads/2017/04/01-Vento-8.jpg> acesso em 15 de Janeiro de 2020)

A ventilação natural deve, então, promover: a qualidade do ar e o conforto térmico, garantindo a eficiência energética. Em climas quentes e úmidos (temperaturas elevadas e alta taxa de precipitação), como o Brasil, essa estratégia contribui para a diminuição da sensação de desconforto gerada pelo excesso de umidade, favorecendo um ambiente salubre com conservação de materiais e queda na proliferação de mofo e/ou doenças.

Na Figura 3.5 é apresentado o diagrama de ventilação proposto por Karava (2008). O comportamento do habitante varia com a atividade desenvolvida no interior da edificação. Nota-se que muitas variáveis estão envolvidas para o desenvolvimento de um projeto eficaz.

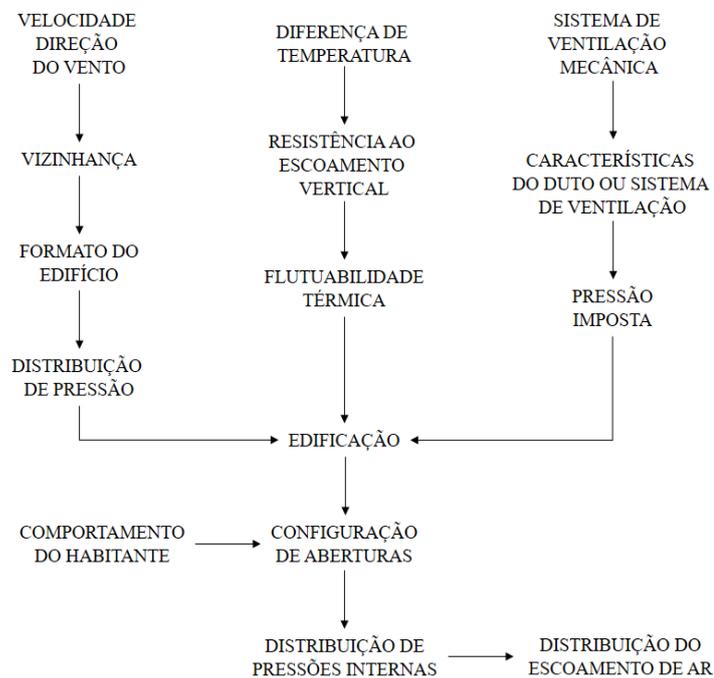


Figura 3.5 Diagrama de Ventilação Natural (Fonte: KARAVA, 2008)

Em ambientes industriais as principais causas da poluição de ar são partículas, fumaças e gases tóxicos. Com o intuito de evitar a poluição nociva e desconfortável, condições e medidas que permitam a contínua substituição do ar, como a promoção da ventilação natural cruzada, são necessárias. Este fato demonstra a importância de combinar os dimensionamentos com as estratégias de ventilação.

### 3.4 NORMAS VIGENTES E PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

A avaliação do desempenho da ventilação natural é difícil por envolver fenômenos físicos complexos da Mecânica dos Fluidos. A escolha do método depende da precisão que se deseja

e da quantidade de recursos disponíveis. As demandas por projetos que adequem a ventilação a sua arquitetura são crescentes e cálculos de previsão confiáveis são importantes. Neste contexto, as normas são instrumentos essenciais na construção civil por garantirem os requisitos mínimos à segurança, estanqueidade e desempenho.

No Brasil não há uma norma específica para os projetos de ventilação natural. Entre as existentes cabe destacar que a NBR 6123:1988 “*Forças devidas ao vento em edificações*” apresenta uma boa instrução para os procedimentos de cálculo da vazão de ventilação e determinação dos coeficientes de pressão. Para compreender a quantidade de iluminação necessária e o conforto térmico de um ambiente deve-se consultar as especificações e diretrizes da norma de desempenho NBR 15575-1:2007, a qual traz os requisitos mínimos para garantir a saúde, higiene e qualidade do ar. Os anexos A e E desta norma contêm as zonas bioclimáticas do Brasil, importante para adequar os projetos em relação ao clima da região. A NBR 15575-4:2007 trata ainda dos sistemas de vedações verticais internas e externas e os índices importantes para os projetos de ambientes de longa permanência como sala, cozinha e dormitórios. Estas normas de regulamentação trazem importantes contribuições para adequar os projetos à ventilação natural e garantia do conforto térmico de acordo com a região.

Existem vários parâmetros que alteram o escoamento do ar no entorno das edificações. Para entender melhor o efeito das vizinhanças nos esforços devidos ao vento é necessário examinar o comportamento do escoamento na simulação isolada e depois averiguar como ele é modificado devido à inserção da vizinhança no entorno. A norma brasileira NBR 6123:1988 indica de modo geral, no anexo G, três acréscimos na força do vento que a vizinhança pode provocar: efeito Venturi, deflexão do vento na direção vertical e turbulência na esteira.

A NBR 6123:1988 afirma que não é possível indicar valores numéricos para os efeitos da vizinhança de um modo genérico e normativo. Estes efeitos são obtidos pela análise experimental em túneis de vento ou simulações numéricas, desde que sejam reproduzidas as condições reais do entorno e as características do vento natural. Porém, a norma indica aproximações para o aumento que os coeficientes aerodinâmicos (arrasto, pressão e forma) podem vir a sofrer (ver anexo G da NBR NBR 6123:1988).

Para se obter uma boa estratégia de ventilação deve-se determinar alguns parâmetros, como o efeito da variação dos coeficientes de pressão no entorno e no interior do edifício, identificar as zonas de entrada e saída de ar, bem como a vazão e o coeficiente de pressão no contorno das

aberturas (Karava, 2008). De acordo com o autor, é importante avaliar a distribuição das pressões internas quando o estudo acerca do vento dominante da região estiver completo e os móveis e obstáculos internos posicionados.

Para determinar a vazão de ventilação, que passa através das aberturas existentes nas edificações ao longo do tempo, foram sendo desenvolvidas equações matemáticas que contemplam alguns fatores preponderantes para essa determinação. A vazão de entrada e saída é determinada pela forma das aberturas e é, por consequência, o principal parâmetro de um projeto de ventilação. A norma brasileira NBR 6123:1988 apresenta uma equação como referência para a determinação da taxa de ventilação, dada a seguir:

$$Q = KA\rho V \quad (3.2)$$

onde  $Q$  é a vazão de ventilação ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $K$  é o coeficiente de vazão ou de descarga,  $A$  é a área do orifício livre pelo qual o ar entra ( $\text{m}^2$ ),  $\rho$  é a densidade do ar e  $V$  a velocidade do ar na abertura, determinada por:

$$V = \sqrt{2|\Delta P_e - \Delta P_i|/\rho} \quad (3.3)$$

onde  $\Delta p_e$  é a diferença de pressão na face externa e  $\Delta p_i$  na interna, na periferia das aberturas. Quando o equilíbrio é estabelecido, a massa de ar que entra é a mesma que sai da edificação, ou seja,  $Q_{\text{Entrada}} = Q_{\text{Saída}} \rightarrow \Sigma Q = 0$ .

O coeficiente de vazão ( $K$ ) é uma medida da eficiência do orifício à passagem do fluido. Esse coeficiente é independente do número de Reynolds quando as bordas não são arredondadas. Para Straw (2000), nessas condições o valor é próximo de 0,61. No entanto, o autor reflete que para a maior parte das construções ele não permanece constante, pois é modificado ao variar as pressões e geometria das aberturas.

Como visto, apesar de haver diversas diretrizes das normas brasileiras, muitas decisões para projetos da ventilação são deixadas a cargo dos engenheiros e arquitetos, o que pode comprometer a estrutura (pressão devida ao vento), já que não há presença de uma normativa que indique os parâmetros de análise e como a ventilação deve ser planejada nos edifícios urbanos e industriais, nem a exigência de uma análise mais profunda com simulações numéricas ou experimentais. No cenário internacional, há guias com recomendações indicando os fatores

que precisam ser determinados (exemplo: taxa de renovação do ar por hora, concentração máxima de poluentes nos ambientes, vazão de ventilação, entre outros).

O comitê AIVC (“*Air Infiltration and Ventilation Centre*”), ou Centro de Ventilação e Infiltração de Ar, é composto por vários países membros em trabalho colaborativo e faz parte da agência internacional de energia, sendo responsável por fornecer informações acerca da eficiência de ventilação em edifícios. Através deste comitê, um guia contendo os aspectos relevantes que objetivam um projeto de ventilação eficiente foi elaborado. Diversos aspectos são considerados, destacando-se a revisão e importância dos conceitos de ventilação (como realizado anteriormente neste trabalho), seguidas da apresentação de uma série de capítulos, nos quais são discutidos a qualidade do ar interno às construções, o impacto no consumo de energia com a proposta da ventilação passiva, parâmetros de projeto arquitetônico, estratégias de ventilação para climas quentes e frios, eficiência da ventilação e, por fim, os métodos de cálculos necessários para averiguar os critérios propostos em projeto. As equações relativas às vazões de ventilação aproximam-se da norma brasileira, ao passo que os critérios demonstrados no guia são idênticos aos estudados e apresentados anteriormente por esse texto.

A vazão de ventilação natural por hora ( $ACH$ ) é dada pela relação da Equação 3.4, conforme o guia AIVC (1996):

$$ACH = 3600 \frac{Q}{Vol} \quad (3.4)$$

onde  $Q$  é a vazão de ventilação em  $m^3/s$  e  $Vol$  o volume interno em  $m^3$ .

De forma esquemática, as Figura 3.6 e Figura 3.7 trazem os organogramas completos com as etapas de um projeto de ventilação para edificações baixas em centros rurais ou industriais e para edificações urbanas, respectivamente. Estes esquemas foram elaborados a partir das recomendações presentes no guia (AIVC), nas normas brasileiras e nos trabalhos apresentados anteriormente na revisão teórica.

Após reunir as informações ideais para um projeto eficaz de ventilação natural, entende-se que as aberturas podem auxiliar em diversos pontos positivos, mas podem ser prejudiciais quando mal planejadas. É difícil de compreender a direção principal dos ventos, que por vezes é modificada ao longo da vida útil da construção. Assim, a recomendação, após a realização deste estudo é que, principalmente para edificações baixas industriais, haja mais do que uma abertura e estas estejam posicionadas em diferentes faces da estrutura. Esse formato colabora com a

ventilação natural, quando o vento incide a baixas velocidades e evita que as pressões internas, quando o vento apresentar uma elevada velocidade de incidência, elevem ainda mais cargas aerodinâmicas presentes nas coberturas em edificações onde o ambiente interno interage com a estrutura de telhado.

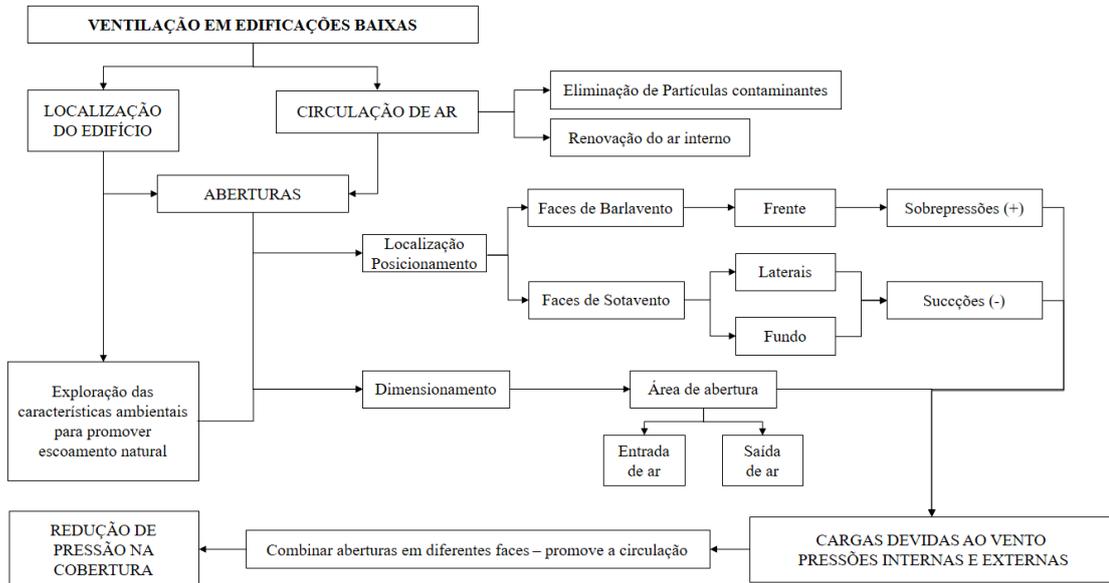


Figura 3.6 Organograma para um projeto de ventilação natural em edificações baixas – presente trabalho

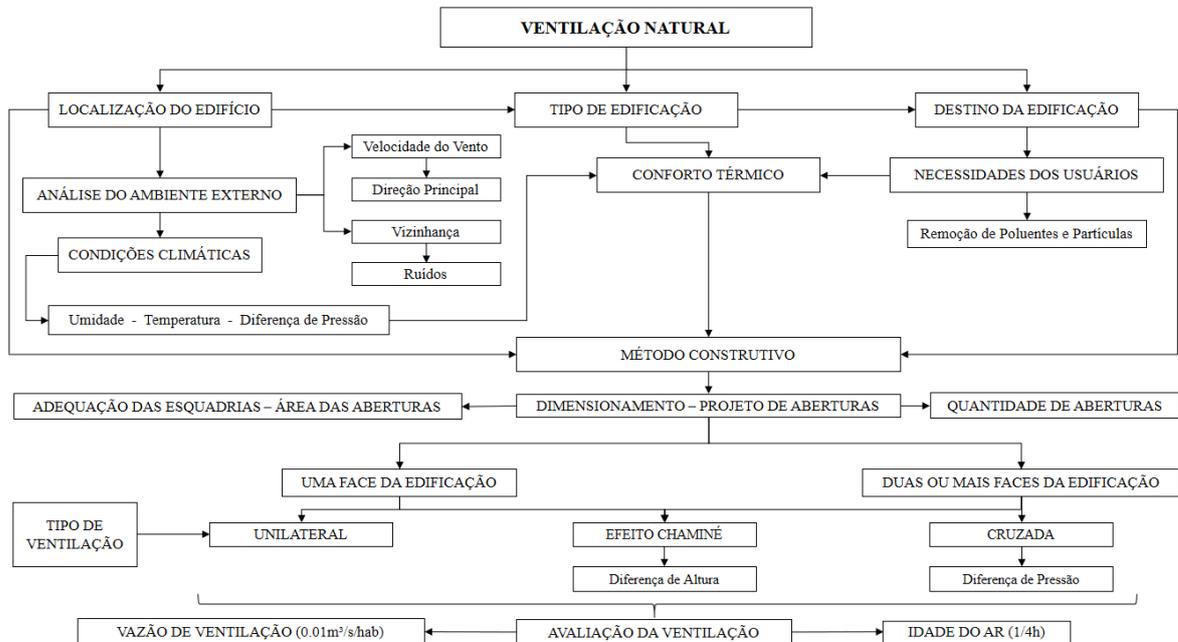


Figura 3.7 Organograma para um projeto de ventilação natural em edificações urbanas – presente trabalho

## 4 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DO ESCOAMENTO

### 4.1 INTRODUÇÃO

As equações fundamentais do escoamento de fluidos são obtidas pelas equações de conservação de momentum, massa e energia. Além disso, deve-se estabelecer relações termodinâmicas e uma equação constitutiva para o mesmo. Neste capítulo serão apresentadas as equações para um escoamento incompressível, isotérmico e sem transporte de massa, considerando a metodologia de turbulência utilizada e as relativas a conservação com uma formulação arbitrária Lagrangeana-Euleriana (ALE).

### 4.2 EQUAÇÕES DE ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL E ISOTÉRMICO

A análise de escoamentos de fluidos viscosos deve-se a um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas e não-lineares, as quais descrevem a dinâmica dos fluidos (SCHLICHTING, 2016). Esse sistema é formado pelas equações de balanço de quantidade de momentum, massa e energia, além das equações de estado e relações constitutivas.

O ar, estudado nesse trabalho, pertence à categoria de fluido Newtoniano em processo isotérmico, sem transferência de massa. Essa limitação reduz o sistema às equações de balanço de massa e momentum, além das equações constitutivas clássicas, as quais representam as relações entre componentes de tensão e taxa de deformação.

As equações do movimento derivam da segunda lei de Newton. Em um fluido as forças atuantes podem ser divididas em conjuntos: forças de corpo (gravitacionais) e forças que agem sobre as superfícies (normais e cisalhantes). Seguindo a descrição cinemática Euleriana em um sistema de coordenadas cartesianas retangulares tridimensional, obtém-se a equação de Navier-Stokes, dada por:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (i,j=1,2,3) \quad (4.1)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $v_i$  e  $f_i$  são as componentes de velocidade e de força de campo do escoamento,  $p$  é a pressão e  $\tau_{ij}$  representa as componentes do tensor de tensão viscosas, todas estas variáveis fornecidas em função da posição segundo as direções dos eixos de coordenadas  $x_j$  e do tempo  $t$ .

Um fluido Newtoniano possui relação constitutiva descrita pela expressão abaixo:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (i,j=1,2,3) \quad (4.2)$$

onde  $\sigma_{ij}$  representa as componentes do tensor de tensões totais e  $\delta_{ij}$  as componentes do delta de Kronecker, sendo  $\delta_{ij} = 1$ , para  $i = j$  e  $\delta_{ij} = 0$ , para  $i \neq j$ .

As componentes do tensor de tensões viscosas são obtidas por:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (i,j,k=1,2,3) \quad (4.3)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica e  $\lambda$  é a viscosidade volumétrica. Na expressão acima, uma relação entre as viscosidades é estabelecida pela hipótese de Stokes (ver Schlichting, 2016), descrita por:

$$3\lambda + 2\mu = 0 \quad (4.4)$$

Para escoamentos incompressíveis, considera-se que  $\lambda = 0$ .

E o tensor taxa de deformação do fluido  $S_{ij}$  como sendo:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.5)$$

Substituindo a Equação (4.5) na Equação (4.1), obtém-se a chamada forma conservativa das equações de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \quad (i,j,k=1,2,3) \quad (4.6)$$

Por outro lado, o balanço de massa é expresso através da equação abaixo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (j=1,2,3) \quad (4.7)$$

Para escoamentos incompressíveis, o número de Mach é limitado a 0,3 (Schlichting, 2016), sendo definido por:

$$M_{ach} = \frac{V_0}{c} \quad (4.8)$$

onde  $V_0$  representa a velocidade não perturbada do escoamento e  $c$  a velocidade do som.

Neste trabalho adota-se a hipótese de escoamento incompressível, na qual assume-se que a massa específica permanece constante, provocando o desaparecimento do termo envolvendo a derivada temporal da Equação (4.7). Assim, obtém-se a chamada equação da continuidade, onde impõe-se que o divergente do campo de velocidades do escoamento deva ser nulo:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (j=1,2,3) \quad (4.9)$$

A equação acima leva a dificuldades numéricas para a obtenção do campo de pressão. Neste sentido, detalhes sobre o tratamento da pressão em escoamentos incompressíveis serão dados no Capítulo 5, referente ao modelo numérico utilizado neste trabalho.

Para a solução das equações de conservação, condições iniciais e condições de contorno sobre as variáveis do problema devem ser impostas. As equações apresentadas na sequência demonstram as condições iniciais de velocidade e pressão impostas no domínio de análise  $\Omega$  no instante inicial do escoamento  $t = t_0$ :

$$v_i(X, t = t_0) = v_{i0} \quad \text{em } \Omega \quad (i=1,2,3) \quad (4.10)$$

$$p(X, t = t_0) = p_0 \quad \text{em } \Omega \quad (i=1,2,3) \quad (4.11)$$

A fronteira do domínio de análise é formada pelo contorno  $\Gamma = \Gamma_v + \Gamma_p + \Gamma_\sigma$ . Aos contornos  $\Gamma_v$  e  $\Gamma_p$  são impostas condições de contorno essenciais ou de Dirichlet, com valores prescritos de velocidade e pressão  $v_i$  e  $p$ :

$$v_i(x) = v_i \quad \text{em } \Gamma_v \quad (i=1,2,3) \quad (4.12)$$

$$p(x) = p \quad \text{em } \Gamma_p \quad (i=1,2,3) \quad (4.13)$$

No contorno  $\Gamma_\sigma$  são impostas condições naturais de Neumann nas componentes do vetor de tensões  $t_i$ , onde deve ser satisfeita a condição de equilíbrio entre o vetor  $t_i$  e as componentes do tensor de tensões  $\sigma_{ij}$  da Equação 4.2, ou seja:

$$t_i = \left[ -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] n_j = \tilde{t}_i \quad \text{em } \Gamma_\sigma \quad (i,j,k=1,2,3) \quad (4.14)$$

onde  $n_j$  são as componentes do vetor unitário normal em qualquer ponto de  $\Gamma_\sigma$  em relação ao eixo  $x_j$ .

### 4.3 ESCOAMENTOS TURBULENTOS

Escoamentos de ar no entorno de corpos são altamente turbulentos devido ao elevado número de Reynolds observado, gerando instabilizações no movimento das partículas de fluido a partir de qualquer perturbação aplicada ou obstáculo encontrado por estas partículas. Para Murakami (1997), os fenômenos de desprendimento e recirculação de vórtices, além do recolamento junto às paredes, são comuns nesses casos. Portanto, o número de Reynolds é um parâmetro essencial para a avaliação dos escoamentos, sendo definido por:

$$\text{Re} = \frac{DV_\infty\rho}{\mu} \quad (4.15)$$

onde  $V_\infty$  é a velocidade característica do escoamento, geralmente associada à velocidade do escoamento em uma região não perturbada, e  $D$  é a dimensão característica do problema.

Quando o número de Reynolds é muito alto, as forças de viscosidade podem ser desprezadas na presença de forças de inércia, assim o escoamento pode ser estudado como um fluido sem viscosidade em regiões afastadas de paredes e obstáculos (Blessmann, 2011). Prandtl demonstrou que é possível realizar esta simplificação considerando-se uma fina camada de fluido situada nas proximidades dos contornos dos sólidos imersos na corrente, denominada de camada limite. De acordo com Blessmann (2011), a velocidade na camada limite varia desde o valor correspondente ao escoamento do fluido não viscoso até zero na superfície do contorno sólido. Assim, na camada limite há predominância dos efeitos viscosos: quanto maior a velocidade, menores serão o comprimento e espessura da camada. Além disso, a pressão no seu interior é sempre determinada pelo escoamento circundante.

Um escoamento turbulento é constituído por uma faixa ampla de escalas de vórtices, onde os menores pertencem à chamada micro-escala de Kolmogorov. Para solucionar as equações pelo método da Simulação Numérica Direta (“*Direct Numerical Simulation*”-DNS) seria necessária uma discretização da malha demasiadamente fina e intervalos de tempo muito pequenos, tornando esse processo inviável pela capacidade atual dos computadores. Para evitar-se o custo computacional excessivo associado à DNS, modelos de turbulência são geralmente utilizados nestes casos. Com o intuito de superar essa limitação, escolhe-se a Simulação de Grandes Escalas (“*Large Eddy Simulation*” – LES) nesse trabalho, além de modelos sub-malha de fechamento. Vários autores já demonstraram que a metodologia RANS (“*Reynolds-averaged Navier-Stokes*”) aplicada a problemas de EVC não produz resultados satisfatórios (ver Smagorinsky, 1963; Blocken, 2014). Na metodologia LES (“*Large Eddy Simulation*”), apresentada por Smagorinsky (1963), é realizado um processo de filtragem espacial sobre o escoamento levando à separação do mesmo em grandes e pequenas escalas. As grandes escalas são resolvidas diretamente de acordo com a malha existente, sendo que as escalas inferiores à resolução da malha são resolvidas de forma aproximada através de modelos de turbulência, onde o comportamento do escoamento é mais homogêneo. Modelos numéricos baseados em LES apresentam maior grau de precisão à custa de malhas com alto nível de refinamento junto a contornos sólidos. Esse problema tem sido resolvido usando modelos híbridos, os quais combinam os melhores aspectos das metodologias RANS e LES em uma única estratégia de solução, como a Simulação de Escalas Separadas (DES) (Ishihara et al., 2011).

Segundo Hu et al. (2008), formulações LES apresentam-se como o método mais adequado para a descrição e investigação da vazão de ventilação no interior de edificações. A maior parte dos estudos relativos a ventilação natural apresenta a formulação LES, pois de acordo com Liu et al. (2020), os resultados com as previsões numéricas via LES apresentam ótima concordância com os resultados experimentais. Arinami et al. (2019) também destaca que a precisão da turbulência dentro das edificações é melhor representada e determinada com essa metodologia. Rajagopalan (2019) igualmente utiliza LES e comenta que essa formulação é a melhor para se obter bons resultados em modelos tridimensionais.

O desenvolvimento de uma formulação LES inicia-se pela decomposição das variáveis de campo (velocidade e pressão) em parcelas relativas às grandes escalas,  $\overline{v}_i$  e  $\overline{p}$ , e referentes às escalas inferiores à resolução da malha,  $v'_i$  e  $p'$ , da seguinte forma:

$$v_i = \overline{v_i} + v'_i \quad (4.16)$$

$$p_i = \overline{p_i} + p'_i \quad (4.17)$$

No contexto do Método dos Elementos Finitos, esta decomposição é obtida através de um processo de filtragem, onde os elementos presentes na malha atuam como filtros, sendo sua dimensão característica expressa em função da raiz cúbica do seu volume, como mostrado na equação abaixo:

$$\overline{\Delta} = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3} \quad (4.18)$$

Com o emprego desse filtro uniforme, o processo de filtragem reduz-se a uma operação de média espacial das variáveis envolvidas. Portanto, substituindo os termos presentes nas Equações (4.16) e (4.17) na equação de balanço de momentum (4.6) e realizando as devidas simplificações, obtém-se:

$$\frac{\partial(\overline{v_i})}{\partial t} + \overline{v_j} \frac{\partial(\overline{v_i})}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \overline{v_i}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{\tau_{ij}^{SGS}}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \overline{f_i} \quad (i,j=1,2,3) \quad (4.19)$$

O termo  $\overline{\tau_{ij}^{SGS}}$  corresponde às componentes do tensor de tensões sub-malha, ou seja, aos efeitos relativos às escalas inferiores à resolução da malha, exigindo um modelo de fechamento para a solução. Na simulação de grandes escalas, este termo é determinado através da seguinte equação:

$$\overline{\tau_{ij}^{SGS}} = \rho \overline{(v'_i v'_j)} = 2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (4.20)$$

onde  $\overline{S_{ij}}$  representa as componentes do tensor taxa de deformação (Equação 4.5), expressas em termos de velocidades de grandes escalas, e  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta, determinada através de modelos de turbulência. Os modelos de turbulência utilizados nesse trabalho são os seguintes: modelo clássico de Smagorinsky (1963) e modelo Dinâmico, apresentado por Germano et al. (1991) e modificado por Lilly (1992). Estes modelos são comumente utilizados para representar os efeitos das pequenas escalas em Simulações de Grandes Escalas (LES).

Pelo modelo clássico de Smagorinsky (1963) a viscosidade turbulenta é calculada pela seguinte equação:

$$\mu_t = \rho (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| = \rho (C_s \bar{\Delta})^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (4.21)$$

onde  $C_s$  é a constante adimensional de Smagorinsky, que conforme Murakami (1997) varia entre 0,1 e 0,25 de acordo com o tipo de escoamento,  $|\bar{S}|$  é a magnitude do tensor taxa de deformação, calculado em termos de velocidades de grandes escalas, e  $\bar{\Delta}$  corresponde a largura do filtro em nível da malha, conforme apresentado na Equação (4.18).

Já o modelo dinâmico, proposto por Germano et al. (1991) e modificado por Lilly (1992), apresenta vantagens em relação ao modelo anterior, visto que a constante de Smagorinsky passa a ser tratada como uma variável em função do espaço e do tempo, não mais imposta como anteriormente. Assim, por essa metodologia, tem-se a viscosidade turbulenta expressa por:

$$\mu_t = \rho C(\vec{x}, t) \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| = \rho C(\vec{x}, t) \bar{\Delta}^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (4.22)$$

onde  $C(\vec{x}, t)$  é o coeficiente dinâmico, função do tempo e do espaço, determinado nos nós da malha de elementos finitos. Após as modificações propostas por Lilly (1992), o coeficiente passa a ser determinado por meio da seguinte equação.

$$C(\vec{x}, t) = -\frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (4.23)$$

$$L_{ij} = \langle \bar{v}_i \bar{v}_j \rangle - \langle \bar{v}_i \rangle \langle \bar{v}_j \rangle \quad (4.24)$$

$$M_{ij} = \langle \bar{\Delta} \rangle^2 - \langle \bar{S} \rangle \langle \bar{S}_{ij} \rangle - \langle \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \rangle \quad (4.25)$$

onde  $L_{ij}$  representa as tensões resolvidas associadas às escalas de turbulência existentes entre os dois filtros e  $M_{ij}$  é a parte anisotrópica das tensões sub-malha do segundo filtro. Logo, este modelo pressupõe o uso de dois filtros.

A primeira filtragem nesse processo duplo é realizada como no modelo clássico de Smagorinsky (1963). As variáveis que passaram por esse processo são definidas através de uma

barra superior enquanto variáveis associadas ao segundo filtro são representadas pelo símbolo  $\langle \bullet \rangle$ . Para uma variável genérica  $\bar{k}$ , correspondente às grandes escalas do primeiro filtro, seu valor  $\langle \bar{k} \rangle$  associado ao segundo filtro em um nó  $i$  é obtida através da equação abaixo:

$$\langle \bar{k} \rangle^i = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\bar{k}^j}{d_i^j} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{d_i^j} \right)} \quad (4.26)$$

sendo  $n$  o número de nós com conectividade direta ao nó  $i$ ,  $d_i^j$  a distância euclidiana entre os nós  $i$  e  $j$ , enquanto que  $\bar{k}^j$  é a variável associada ao primeiro filtro avaliada no nó  $j$ .

A segunda filtragem utiliza um filtro de dimensão característica superior ao primeiro denominado de filtro teste ( $\bar{\Delta}$ ). A dimensão característica do filtro teste referente ao nó  $i$  de um elemento tetraédrico pode ser dada por:

$$\langle \bar{\Delta} \rangle^i = \left( \sum_{e=1}^{NE} \Omega(e) \right)^{1/3} \quad (4.27)$$

onde  $NE$  é o número de elementos comuns ao nó  $i$  e  $\Omega_e$  é o volume do elemento  $e$ .

#### 4.4 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO COM FORMULAÇÃO LAGRANGEANA-EULERIANA (ALE)

Em problemas envolvendo corpos móveis imersos no escoamento, pode-se empregar a chamada descrição Arbitrária Lagrangeana-Euleriana (ALE), desenvolvida por Hirt et al. (1974) e modificada por Hughes et al. (1981), a qual consiste em delimitar uma região ao redor do corpo onde o movimento da malha do escoamento é arbitrário e independe das coordenadas materiais e espaciais. Já o fluido localizado fora dessa região é resolvido de forma puramente Euleriana, onde o domínio de referência é fixo no espaço e a matéria move-se através dele. A estrutura imersa pode ser idealizada como um corpo rígido (indeformável) quando a magnitude das deformações sofridas pela estrutura imersa é muito inferior aos deslocamentos e rotações apresentados pela mesma (ver, por exemplo, Braun, 2002).

Considerando a descrição ALE, as componentes de aceleração são obtidas por meio de uma derivada material no tempo, conforme mostrado abaixo:

$$a_i = \frac{Dv_i}{Dt} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} (v_i - w_j) \quad (i,j=1,2,3) \quad (4.28)$$

sendo  $w_j$  as componentes do vetor velocidade de malha.

Assim, as equações de Navier-Stokes em uma metodologia LES são então reescritas considerando uma descrição ALE da seguinte forma:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_j - w_j) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{f_i}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + (v + v_t) \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \quad (i,j,k=1,2,3) \quad (4.29)$$

onde  $\nu = \mu/\rho$  é a viscosidade cinemática e  $\nu_t = \mu_t/\rho$  a viscosidade cinemática turbulenta.

Na condição de não deslizamento, deve-se impor que na interface fluido-estrutura a velocidade de malha seja igual à velocidade do escoamento, a qual, por sua vez, deve ser igual à velocidade da estrutura nestes pontos.

## 5 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

### 5.1 INTRODUÇÃO

Para qualquer modelo numérico há necessidade de adotarem-se procedimentos de discretização espacial e temporal das equações que descrevem o escoamento, os quais podem ser realizados através de esquemas implícitos, semi-implícitos, quase-implícitos ou explícitos, devendo-se escolher aquele que melhor se alinhe ao problema estudado (Codina et al., 1998).

Uma solução numérica adequada para problemas da EVC requer, em geral, um alto grau de precisão do modelo numérico, maior eficiência das ferramentas numéricas e máquinas computacionais com características avançadas. A dificuldade nesses problemas é encontrada porque envolvem, geralmente, a presença de obstáculos e corpos imersos, os quais provocam a existência de fenômenos complexos no escoamento, exigindo um grande número de graus de liberdade derivado do alto nível de refinamento de malha, principalmente junto a regiões de camada limite. Como consequência, pequenos passos de tempo são adotados para a integração no tempo usando métodos explícitos, os quais são necessários para se obter um correto tratamento da turbulência, característica inerente aos escoamentos de vento.

Quanto à discretização espacial, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem sido tradicionalmente utilizado em trabalhos sobre a EVC produzidos no Centro de Mecânica Aplicada e Computacional (CEMACOM) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), podendo-se citar, por exemplo, Braun (2007), Madalozzo (2012), Alminhana (2017), Aguirre (2017) e Sangalli (2019). Neste contexto, embora elementos hexaédricos sejam mais comuns, o uso de elementos tetraédricos favorece a implementação e discretização de geometrias diferenciadas, obtendo uma distribuição racional e econômica dos elementos sobre o domínio computacional.

### 5.2 FORMULAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A aplicação do método convencional de Galerkin sobre as equações de Navier-Stokes gera oscilações espúrias nos campos de velocidade do fluido em problemas com advecção dominante devido à natureza não auto-adjunta destas equações (ver Tezduyar et al., 1991). Neste sentido, de acordo com Zienkiewicz et al. (2014), o Método das Características tem sido empregado

como método de estabilização, produzindo como resultado a eliminação do termo convectivo de equações do tipo advecção-difusão, tornando-as, assim, auto-adjuntas, o que possibilita a utilização do método convectivo de Galerkin sem a geração de oscilações espúrias na resposta numérica.

O Método CBS (“*Characteristic Based Split*”), idealizado por Zienkiewicz e Codina (1995), consiste na aplicação do método de projeção de Chorin (1968) no contexto do Método das Características, onde a solução do sistema de equações é obtida em três etapas: em um primeiro passo, obtém-se uma primeira aproximação para o campo de velocidades resolvendo-se uma equação de balanço de momentum sem o termo de pressão. No segundo passo, é obtida a solução do campo de pressão a partir do campo de velocidades aproximado do primeiro passo. Na última etapa, o campo de velocidade é corrigido a partir do campo de pressão obtido no segundo passo, sendo que na versão semi-implícita do método, a equação de massa é resolvida de forma implícita usando uma equação de Poisson (Nithiarasu et al., 2016).

Apesar de o método de Taylor-Galerkin ter sido utilizado em vários trabalhos do PPGE/UFRGS (Rossa, 2000; Braun, 2007; Madalozzo, 2012) para a simulação de escoamentos incompressíveis com a hipótese de pseudo-compressibilidade, um modelo numérico baseado no Método CBS (“*Characteristic Based Split*”) foi proposto recentemente por Barroso (2019). Este esquema numérico mostrou-se mais eficiente em aplicações da EVC, onde a turbulência apresenta papel preponderante.

O método pode ser demonstrado pelas equações descritas na sequência, onde é aplicado a uma equação advecção-difusão unidimensional:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0 \quad (5.1)$$

sendo  $\phi$  a variável da equação,  $u$  a velocidade do escoamento e  $k$  a constante de difusão.

A evolução do escoamento se dá em um intervalo de tempo qualquer  $\Delta t = [t_n, t_{n+1}]$ , onde a distância percorrida por uma partícula é dada por  $\Delta x = u \cdot \Delta t$ . A reta produzida em um plano de eixos  $x$  x  $t$  representa a linha característica do escoamento no domínio espaço-tempo (Figura 5.1).

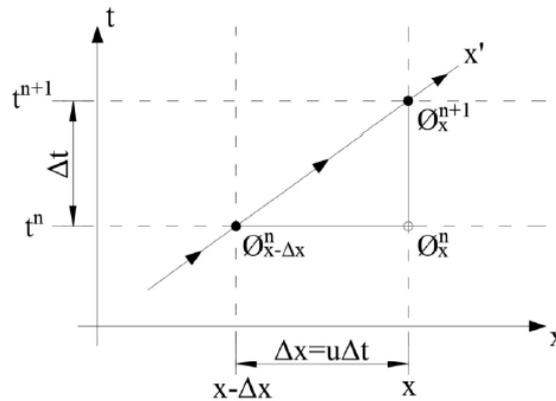


Figura 5.1 Plano  $x \times t$  – procedimento do método das características (adaptado de Zienkiewicz et al. 2014, p.60)

Uma abordagem lagrangeana incremental é utilizada para a descrição cinemática da partícula ao longo da linha característica, onde um sistema de coordenadas móveis  $x'$  com velocidade de onda  $u$  é assumido, conforme apresentado por Zienkiewicz et al. (2014):

$$\frac{\partial \phi(x', t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0 \quad (5.2)$$

Percebe-se na expressão acima que o termo advectivo, presente na Equação (5.1), desaparece. No entanto, embora o termo advectivo seja eliminado pelo procedimento anterior, a solução torna-se complexa pela adoção do sistema de coordenadas móvel. A alternativa que pode ser adotada é empregar séries de Taylor descendentes sobre os termos da equação. A forma semi-discreta da Equação (5.2) é então aproximada por:

$$\frac{\phi^{n+1}|_x - \phi^n|_{x-\Delta x}}{\Delta t} \approx \theta \frac{\partial}{\partial x'} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x'} \right)^{n+1} \Big|_x + (1-\theta) \frac{\partial}{\partial x'} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x'} \right)^n \Big|_{x-\Delta x} \quad (5.3)$$

Quando  $\theta=0$  a formulação é dita explícita, para  $\theta=1$  é implícita e semi-implícita para  $0 < \theta < 1$ . Os termos avaliados em  $x-\Delta x$  são aproximados por séries de Taylor, conforme apresentado abaixo:

$$\phi^n|_{x-\Delta x} = \phi^n|_x - \frac{\partial \phi^n}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 \phi^n}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x'} \right)^n \Big|_{x-\Delta x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \Big|_x - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^n \right] \Delta x \quad (5.5)$$

Substituindo as Equações (5.4) e (5.5) na Equação (5.3) e desprezando os termos de ordem 3 ou superior, além de considerar  $\Delta x = u \cdot \Delta t$ , obtém-se:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = -u \frac{\partial \phi^n}{\partial x} + u^2 \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial^2 \phi^n}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^n \quad (5.6)$$

Na equação acima o termo  $u$  pode ser considerado constante ou variável, de onde diferentes formas de estabilização podem ser obtidas. Ao longo da linha, no entanto, deve ser considerado como a velocidade média.

Assim, ao utilizar-se as séries de Taylor, o termo advectivo reaparece acompanhado de um termo adicional de ordem 2. Esse termo age como um operador difusivo artificial, reduzindo as oscilações espúrias provenientes da discretização espacial do termo advectivo. Assim, a equação está adequada para a aplicação do método de Galerkin.

Ao contrário da equação de advecção-difusão, as equações de Navier-Stokes constituem uma equação vetorial. Logo, uma extensão direta do método das características de Galerkin para as equações de momento não é trivial. Para a aplicação do método, é necessário remover o termo de gradiente de pressão, levando a um procedimento de cálculo do campo de velocidades em dois estágios. Este procedimento de duas etapas apresenta duas vantagens: a primeira vantagem é que, sem os termos de pressão, cada equação de momento assemelha-se a uma equação de advecção-difusão, favorecendo a aplicação do método das características de Galerkin. A segunda vantagem é que a remoção do termo de pressão das equações de momentum aumenta a estabilidade do campo de pressões. Devido à decomposição introduzida nas equações, o método é usualmente referido como esquema *Characteristic Based Split* (CBS).

O método da projeção de Chorin (1968) pode ser aplicado para a resolução de problemas envolvendo escoamentos incompressíveis através de uma formulação mista (variáveis de pressão e velocidade), onde a solução é obtida em três passos a partir da separação dos termos de pressão da equação de momentum discretizada. Com o intuito de satisfazer a condição de Babuska-Brezzi (ver Babuska, 1973) para elementos finitos, as formulações são desenvolvidas considerando as funções de interpolação para pressão ( $N_p$ ) e para velocidade ( $N_v$ ), as quais devem ser escolhidas adequadamente. Conforme Zienkiewicz et al. (2014), se o método da projeção for aplicado de forma consistente, a formulação permite a arbitrariedade de escolha das funções de  $N_p$  e  $N_v$ . Para esse trabalho adota-se  $N_p = N_v$ .

Será adotado aqui um modelo CBS na versão semi-implícita, similar ao modelo utilizado por Nithiarasu et al. (2016), onde os procedimentos empregados para a obtenção das equações referentes aos três passos de projeção do método são descritos como segue:

Passo 1:

Um campo de velocidades intermediário (aproximado) é obtido inicialmente. Esta etapa é realizada removendo-se o termo de pressão das Equações de Navier-Stokes:

$$\frac{v_i^* - v_i^n}{\Delta t} = - (v_j^n - w_j^n) \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} + (v + v_t) \frac{\partial^2 v_i^n}{\partial x_j^2} + \frac{1}{\rho} f_i \quad (5.7)$$

onde  $v_i^*$  são as componentes do vetor velocidade intermediária do escoamento. Aplicando os procedimentos referentes ao método das características sobre o campo de velocidades  $v_i^n$ , obtém-se:

$$\begin{aligned} v_i^n|_{x-\Delta x} &= v_i^n|_x - \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} \Delta x_j + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} \Delta x_j \right] \Delta x_k \\ &= v_i^n|_x - \Delta t (v_j^n - w_j^n) \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} + \frac{\Delta t^2}{2} (v_k^n - w_k^n) \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ (v_j^n - w_j^n) \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (5.8)$$

Substituindo a aproximação acima na Eq. (7), chega-se a:

$$\frac{v_i^* - v_i^n}{\Delta t} = - (v_j^n - w_j^n) \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} + (v + v_t) \frac{\partial^2 v_i^n}{\partial x_j^2} + \frac{\Delta t}{2} (v_k^n - w_k^n) \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ (v_j^n - w_j^n) \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho} f_i \quad (5.9)$$

Passo 2:

O campo de pressões é calculado a partir de uma equação de Poisson, a qual é derivada considerando-se que o campo de velocidades intermediário obtido no primeiro passo precisa ser corrigido. A forma semi-discreta das equações de momento, sem a remoção do termo de gradiente de pressão, pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \frac{v_i^{n+1} - v_i^n}{\Delta t} &= - (v_j^n - w_j^n) \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} + (v + v_t) \frac{\partial^2 v_i^n}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} + \\ &\frac{\Delta t}{2} (v_k^n - w_k^n) \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ (v_j^n - w_j^n) \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \right] + \frac{1}{\rho} f_i \end{aligned} \quad (5.10)$$

O campo de velocidades correto pode ser obtido diretamente se a equação acima for utilizada. Subtraindo a Eq. (5.9) pela Eq. (5.10), obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{v_i^{n+1} - v_i^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} + \frac{\Delta t}{2} (v_k^n - w_k^n) \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \right] \quad (5.11)$$

Da equação acima pode-se observar que se a pressão puder ser calculada a partir de outra equação, o campo de velocidades intermediário poderá ser corrigido usando-se a Eq. (5.11). Neste sentido, a fim de obter o campo de pressões, é aplicada uma relaxação na equação da continuidade usando-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial v_i^{n+\theta}}{\partial x_i} = \theta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right)^{n+1} + (1-\theta) \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right)^n = 0 \quad (5.12)$$

O parâmetro de relaxamento  $\theta$  deve ser diferente de zero e menor do que a unidade para garantir a estabilidade do campo de pressão (Zienkiewicz et al. 2014). Neste trabalho, adota-se a opção  $\theta = 0,5$ . Uma vez que o campo de velocidades em  $n + 1$  não está disponível no passo 2, substitui-se a Eq. (5.11) na Eq. (5.12), obtendo-se:

$$\theta \left( \frac{\partial v_i^*}{\partial x_i} \right) - \frac{\Delta t \theta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} \right)^n + (1-\theta) \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right)^n = 0 \quad (5.13)$$

Na operação acima, são desprezados termos de terceira ordem e superiores. Considerando a condição de incompressibilidade na Eq. (5.13), obtém-se:

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} \right)^n = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{\partial v_i^*}{\partial x_i} \right) \quad (5.14)$$

Embora a equação acima não exija nenhum tratamento especial para estabilizar oscilações no campo de pressões, a ausência de um termo transiente torna obrigatória a montagem e solução implícita de um sistema de equações.

### Passo 3:

Correção do campo de velocidades. A equação de correção de velocidades foi derivada anteriormente (Eq. 5.11), envolvendo a pressão obtida no passo 2 e o campo de velocidades intermediário obtido no passo 1, sendo rerepresentada abaixo:

$$\frac{v_i^{n+1} - v_i^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} + \frac{\Delta t}{2} (v_k^n - w_k^n) \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \right] \quad (5.15)$$

Aplicando o método convencional de Galerkin no contexto do MEF nas equações que definem os três passos do método CBS implícito e integrando por partes os termos de segunda ordem, obtêm-se a forma discretizada do sistema de equações do escoamento em nível de elemento:

**Passo 1:** cálculo do campo de velocidades intermediário.

$$\mathbf{M} \frac{\Delta \mathbf{v}_i^*}{\Delta t} = -\mathbf{A} \mathbf{v}_i^n - \mathbf{D} \mathbf{v}_i^n - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{S}_v \mathbf{v}_i^n + \mathbf{f}_i \quad (5.16)$$

**Passo 2:** cálculo do campo de pressões.

$$\mathbf{H} \mathbf{p}^n = -\frac{1}{\Delta t} \mathbf{G}_i \mathbf{v}_i^* + \mathbf{f}_p \quad (5.17)$$

**Passo 3:** correção do campo de velocidades.

$$\mathbf{M} \mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{M} \mathbf{v}_i^* - \frac{\Delta t}{\rho} \mathbf{G}_i \mathbf{p}^n - \frac{\Delta t^2}{2\rho} \mathbf{S}_i^p \mathbf{p}^n \quad (5.18)$$

Nas expressões acima, os vetores  $\mathbf{v}_i$  e  $\mathbf{p}$  possuem os valores nodais de velocidade e pressão, respectivamente. As matrizes e vetores com termos de contorno em nível de elemento da formulação são descritas na sequência:

Matriz de massa:

$$\mathbf{M} = \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega \quad (5.19)$$

Matriz de advecção:

$$\mathbf{A} = \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_j^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} d\Omega \quad (5.20)$$

Matriz de difusão:

$$\mathbf{D} = \int_{\Omega_e} \nu \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_j} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} d\Omega \quad (5.21)$$

Vetores de forças e termos de contorno:

$$\mathbf{f}_i = \frac{1}{\rho} \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T f_i d\Omega + (\nu + \nu_t) \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \left( \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} n_j \mathbf{v}_i^n \right) d\Gamma \quad (5.22)$$

$$\mathbf{f}_p = \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \left( \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} n_i \mathbf{p}^n \right) d\Gamma \quad (5.23)$$

Matrizes de gradiente:

$$\mathbf{G}_i = \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} d\Omega \quad (5.24)$$

Matriz Laplaciana:

$$\mathbf{H} = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_i} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} d\Omega \quad (5.25)$$

Matrizes de estabilização:

$$\mathbf{S}_v = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_k} (\mathbf{N} \mathbf{v}_k^n) (\mathbf{N} \mathbf{v}_j^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} d\Omega \quad (5.26)$$

$$\mathbf{S}_i^p = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_k} (\mathbf{N} \mathbf{v}_k^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} d\Omega \quad (5.27)$$

Nas expressões acima,  $\mathbf{N}$  é uma matriz linha contendo as funções de interpolação do elemento tetraédrico linear. Detalhes sobre a formulação do elemento usado neste trabalho são encontrados no Apêndice A.

A matriz de massa consistente  $\mathbf{M}$  pode ser substituída pela matriz de massa discreta  $\mathbf{M}_D$  no primeiro e no terceiro passo para possibilitar a obtenção do campo de velocidades de forma explícita, evitando a necessidade de fatorização da matriz de coeficientes do sistema de equações. Quando esta substituição é utilizada, alguns pequenos erros podem ocorrer na solução de problemas transientes, enquanto que para solução de problemas estacionários, nenhum erro é introduzido. Mesmo para problemas transientes, uma solução precisa ainda pode ser obtida por meio de refinamento da malha ou pela utilização da matriz de massa consistente.

O passo de tempo é calculado localmente de acordo com a seguinte condição:

$$\Delta t = \min(\Delta t_{conv}; \Delta t_{dif}) \quad (5.28)$$

onde os passos de tempo de convecção e difusão são dados por:

$$\Delta t_{conv} = \frac{h}{\|\mathbf{v}\|} \quad (5.29)$$

$$\Delta t_{dif} = \frac{h^2}{2\nu} \quad (5.30)$$

sendo  $\|\mathbf{v}\|$  a norma do vetor velocidade do elemento finito e  $h$  a sua dimensão característica, calculada para os elementos tetraédricos (utilizados nesse trabalho) como:

$$h_i = \min \left( \frac{3\Omega_i}{A_{face\ oposta}} \right)_{ie} \quad (5.31)$$

sendo  $ie$  o número de elementos conectados ao nó  $i$ ,  $\Omega_i$  o volume do elemento tetraédrico e  $A$  a área da face do tetraedro oposta ao nó  $i$ .

Destaca-se que o valor de  $\Delta t$  a ser utilizado é calculado multiplicando-se o valor obtido pela Equação (5.28) por um fator de segurança  $\alpha$ , que varia de 0,5 a 2,0, dependendo do problema e do nível de refinamento de malha empregado (Zienkiewicz et al., 2014).

### 5.3 FORMULAÇÃO DA TEORIA DE CONROLE PID

A teoria de controle é essencial em vários campos da Engenharia, sendo um componente importante em veículos espaciais e em muitas operações industriais, que envolvem dispositivos para o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade e vazão (OGATA, 2010).

Apesar de controladores com ação proporcional (P) e integral (I) terem sido difundidos e utilizados desde os anos 30, foi a partir da década de 80, com o desenvolvimento dos computadores e melhorias nas tecnologias, que os controladores PID (proporcionl, integral e derivativo) passaram a ser largamente utilizados (HÄGGLUND e ÅSTRÖM, 2005). O ajuste e projeto de controladores PID têm sido tradicionalmente baseados em técnicas resultantes de métodos de *design* poderosos.

Existem muitos requisitos em um sistema controlado. Para Åström e Hägglund (1995), os sistemas devem responder adequadamente às mudanças do ponto de ajuste; atenuar os distúrbios de cargas; ser insensível às variações do processo e não devem fornecer controles excessivos. Assim, o projeto de um sistema de controle envolve aspectos da dinâmica, saturação do atuador e características de perturbações. Ainda, de acordo com os autores, quando se trabalha com sincronizadores automáticos é necessário incluir diagnósticos do controlador, visto que seu funcionamento inadequado acarreta prejuízos ao sistema de controle.

Ao abordar essas teorias, alguns termos utilizados pelos desenvolvedores precisam ser descritos:

- **Sistema:** combinação de componentes que atuam simultaneamente com o intuito de executar um objetivo;
- **Controle:** designa uma ação que regula, direciona ou altera o comportamento de algo;
- **Sistema de controle:** composto pela combinação de componentes cujo objetivo é controlar um sistema;
- **Planta:** trata do sistema que é o objeto da ação do controle;
- **Controlador/Atuador:** parte do sistema de controle que será responsável pela aplicação do controle na planta;
- **Medidor/Observador:** parte do sistema de controle que será responsável pela medição do resultado de saída da planta;
- **Variável de Entrada:** quantidade ou condição que será manipulada e controlada, ou seja, fenômeno que é o objeto de controle;
- **Variável de Controle:** quantidade ou condição que será variada pelo controlador, com o intuito de alterar o valor da variável de entrada;
- **Variável de Medida/Saída:** trata da condição da quantidade que resultará da ação do medidor na saída da planta;
- **Variável de Referência:** quantidade ou condição que serve de parâmetro comparativo em relação à variável de medida;
- **Erro:** valor resultante da comparação das variáveis de medida e de referência, estabelecendo o nível de afastamento entre elas.

Um sistema de controle possui realimentação quando estabelece uma comparação entre a entrada de referência e a saída, utilizando a diferença entre elas como meio para estabelecer o

controle. Esse método faz com que o sistema seja insensível aos distúrbios externos e às variações internas nos parâmetros. Contudo, é necessário estabelecer que seja *controlável* (ou seja, no tempo  $t_0$  permite a obtenção de uma ação de controle que irá transferir o estado inicial  $\bar{x}(t_0)$  para qualquer final  $\bar{x}(t)$ ) e *observável* (ou seja, permite que o estado inicial  $\bar{x}(t_0)$  possa ser determinado pelo valor obtido por  $y(t)$  (saída) sobre um intervalo finito de tempo).

Há várias maneiras de controlar os sistemas, uma destas (e a técnica mais difundida hoje) é o controle PID (HÄGGLUND e ÅSTRÖM, 2005), que será abordado neste trabalho, o qual possui três termos principais: o Proporcional, o Integral e o Derivativo. Para a instalação, ajuste e uso dos controladores há necessidade de o sistema possuir um auto ajuste, isto é, se modificar e adequar a partir de um operador ou sinal externo, que pode ser aplicado de modo automático ou manual. Essa técnica garante eficiência da implementação. Ademais, o controlador PID pode ser definido como uma implementação simples de *feedback* (Figura 5.2

), a qual possui duas componentes principais, o processo e o controlador.

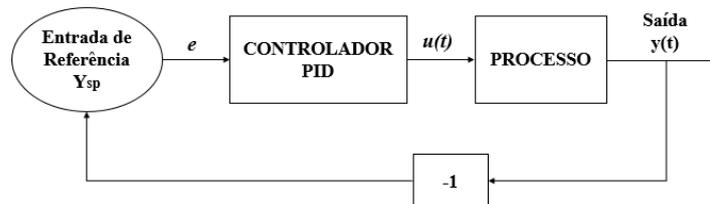


Figura 5.2 Diagrama de bloco de um controle PID – sistema de feedback com circuito fechado – presente trabalho

O processo possui uma variável de entrada ( $u$ ) (ou variável manipulada/de controle), definida por meio de um atuador. A saída do processo é denominada variável de processo ( $y$ ), medida através do sensor. O atuador e o sensor são partes do bloco de processo. Já o valor desejado da variável de processo é chamado de valor de referência,  $y_{sp}$ . O erro, por conseguinte, representa a diferença entre o ponto de ajuste e a variável de processo. Assim, tem-se que  $e = y_{sp} - y$ . Portanto, resumidamente, o princípio de *feedback* consiste em aumentar a variável manipulada quando o erro for positivo e diminuí-la quando o erro for negativo. Quando o erro for próximo de zero, significa que neste ponto a variável de processo está próxima ao ponto de ajuste. Se o desempenho for insatisfatório, o processo pode tornar-se instável, por isso deve-se determinar corretamente os parâmetros do controlador. Uma das maneiras é escolher arbitrariamente e modificar os parâmetros até que o comportamento esteja adequado, outra é desenvolver modelos matemáticos para o projeto do controlador.

Os parâmetros do controlador são determinados através de métodos para o projeto de controladores, dentre os mais usuais, destacam-se: **Controle liga e desliga** (não há parâmetros de escolha, porque frequentemente a variável de processo está próxima do ponto de ajuste, resultando um sistema com variáveis oscilantes); **Controle Proporcional** (o sinal de controle é proporcional ao erro, resultando um erro de controle muito pequeno, o qual, por sua vez, evita a oscilação das variáveis. No entanto, algumas vezes a variável de processo desvia-se do ponto de ajuste, o que é resolvido com o controle proporcional-integral); **Controle PID** (Proporcional, Integral e Derivativo).

O controle PID, que será abordado neste trabalho, consiste na capacidade de antecipação do erro, através da saída com base em uma extrapolação linear. Um controlador PID de domínio de tempo contínuo é expresso em um domínio de Laplace (O'DWYER, A. 2006), tal como é demonstrado pela Equação (5.32).

$$u(s) = G_c(s)E(s) \quad (5.32)$$

onde  $G_c(s)$  representa a função de ganho e  $E(s)$  a função erro.

O controle PID, pode ainda, ser definido a partir da relação:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (5.33)$$

onde  $K_p$  é a constante de ganho proporcional,  $e(t)$  o valor do erro,  $T_i$  o tempo integral e  $T_D$  o tempo derivativo. A Figura 5.3 apresenta como é baseado a determinação dos parâmetros de um controlador PID.

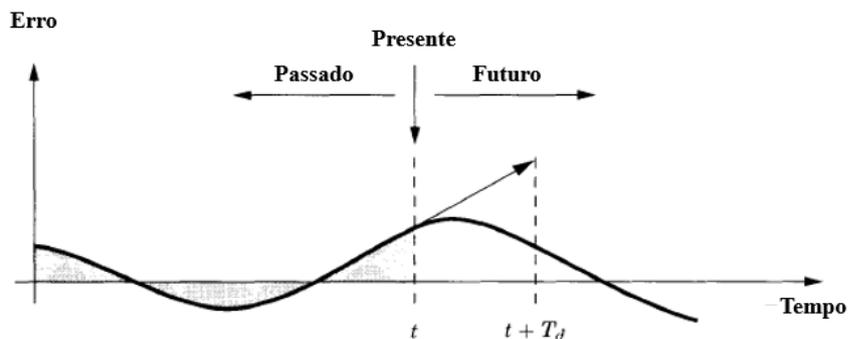


Figura 5.3 Controle PID baseado no passado presente e futuro (ÅSTRÖM, K. e HÄGGLUND, T. 1995, p. 12)

Quando  $T_i = \infty$  e  $T_d = 0$ , o controle é dito proporcional (P) e permite a existência de um erro de controle no estado estacionário. Assim, a relação entre a variável de controle  $u(t)$ , a constante de ganho proporcional  $k_p$  e o valor do erro  $e(t)$ , neste tipo de controle, é dada por:

$$u(t) = K_p e_p(t) + u_b \quad (5.34)$$

onde  $u_b$  pode ser definido como a média entre os pontos de  $u_{\max}$  e  $u_{\min}$  ou ser ajustado manualmente, desde que quando  $u(t)$  atingir esse valor o erro seja zero (ver Figura 5.9). Há, portanto, uma correlação entre a variável de saída e a atuação do controle, onde a constante de ganho é ajustável.

Conforme O'dwyer (2006), um controlador PID permite contribuições de entradas atuais, anteriores e futuras. De acordo com Ogata (2010), os métodos clássicos para determinar os parâmetros de controle PID foram estudados por Ziegler e Nichols em 1942, os quais formularam as regras de sintonia e ajustes, que formam a base das teorias e permitem caracterizar o processo através de dois parâmetros, determinados por experimentos simples. O autor ainda as descreve como regras para sintonia de controladores PID, ou seja, significa que ajustam os valores do ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo, baseados nas características transientes, com o intuito de proporcionar uma ação estável.

Os dois métodos desenvolvidos por Ziegler e Nichols tiveram um grande impacto na prática de controle PID, mesmo que não resulte um ajuste refinado (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005). Estes ainda são amplamente utilizados, seja na sua forma original, seja modificado. O primeiro trata-se do **Método de Resposta ao Degrau ou Análise Estática** (Figura 5.4), caracterizado através de dois parâmetros,  $a$  e  $L$ . Já o segundo trata-se do **Método de Resposta em Frequência**, que se baseia na caracterização dinâmica do processo.

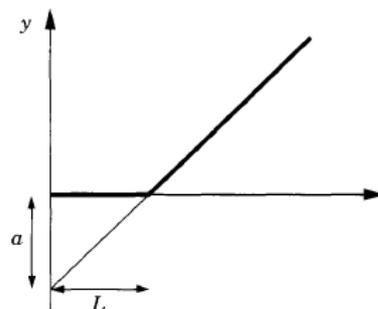


Figura 5.4 Caracterização do método de resposta ao degrau de Ziegler e Nichols

As regras de ajuste Ziegler-Nichols foram originalmente projetadas para fornecer sistemas com boas respostas a distúrbios de carga. O critério de projeto foi a razão de decaimento de amplitude de um quarto, que geralmente é muito grande. Por esta razão, o método de Ziegler-Nichols frequentemente requer modificação ou reajuste. Uma vez que o objetivo principal do projeto era reduzir distúrbios de carga, muitas vezes é necessário escolher o ponto de ajuste com cuidado a fim de obter-se uma resposta satisfatória.

Para Åström e Hägglund (1995), o controle PID deriva das características obtidas por modelo de processos, essenciais para a simulação e projeto de sistemas de controle. O comportamento em estado estacionário pode ser descrito por uma função que informa o valor de estado estacionário da variável de processo para determinados valores da variável manipulada. Após a análise estática, onde é obtida a relação entre a entrada e a saída de um sinal, há necessidade de analisar a dinâmica do processo, ou seja, aplicar perturbações ao sistema, com o intuito de obter-se a relação em estados transientes.

A partir de modelos estáticos, várias propriedades de controle proporcional podem ser compreendidas. A Figura 5.5 apresenta, através de uma curva, a visualização da relação entre o sinal de entrada do processo  $u(t)$  e o sinal de saída  $y(t)$ , obtidos por um processo de análise estática. Um dos procedimentos é realizar experimentos de circuitos fechados, ou seja, a variável de controle é medida em um estado constante e o processo é repetido até cobrir toda a gama de pontos de ajuste.

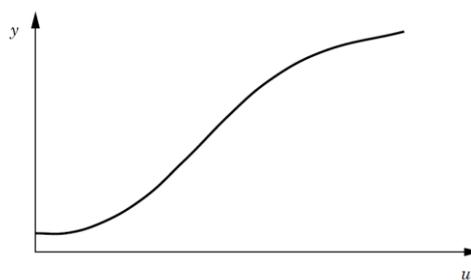


Figura 5.5 Característica do processo estático (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005, p. 69)

Modelos dinâmicos são naturalmente mais difíceis de serem capturados (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K., 1995), porém são utilizados para descrever o comportamento de sistemas de controle quando há pequenos desvios da condição de equilíbrio. A dinâmica do processo consiste em obter as relações entre o sinal de controle e a variável medida. Para descrever o comportamento dinâmico é necessário mostrar a resposta do sistema a uma mudança de passo

na variável manipulada (resposta ao degrau do sistema ou curva de reação do processo) (Figura 5.6).

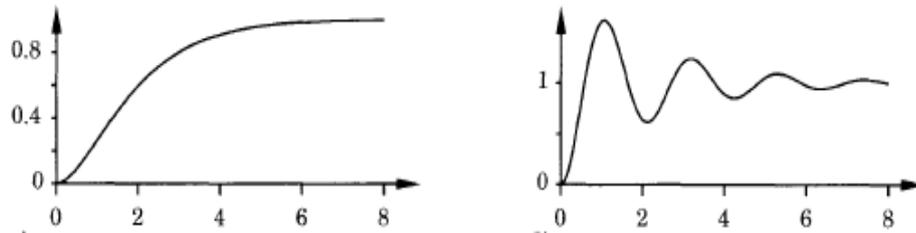


Figura 5.6 Exemplos de resposta ao degrau de um sistema linear (ÅSTRÖM, K. e HÄGGLUND, T. 1995, p. 23)

Muitas propriedades podem ser obtidas diretamente da resposta ao degrau. O sinal de perturbação para a análise da resposta transitória deve ser escolhido de tal forma que o experimento seja facilmente realizado. Além da forma linear, pode-se obter a resposta em frequência, que utiliza ondas senoidais como sinais de testes para caracterizar a dinâmica de sistemas invariáveis. Para um sistema linear estável, a saída apresentará a mesma frequência do sinal de entrada, possuindo apenas a fase e amplitude diferentes. A relação é descrita pela Equação (5.35), onde as funções  $a(\omega)$  e  $\phi(\omega)$  são descritas para todas as frequências.

$$G(i\omega) = a(\omega)e^{i\phi(\omega)} \quad (5.35)$$

A função  $G(i\omega)$  é chamada de resposta em frequência do sistema;  $a(\omega)$  é a função amplitude e  $e^{i\phi(\omega)}$  é a função de fase. O número complexo  $G(i\omega)$  pode ser representado como um vetor de comprimento  $a(i\omega)$  que forma o ângulo  $\phi(i\omega)$  com o eixo real, resultando na curva de Nyquist, que fornece uma descrição completa do sistema (Figura 5.7).

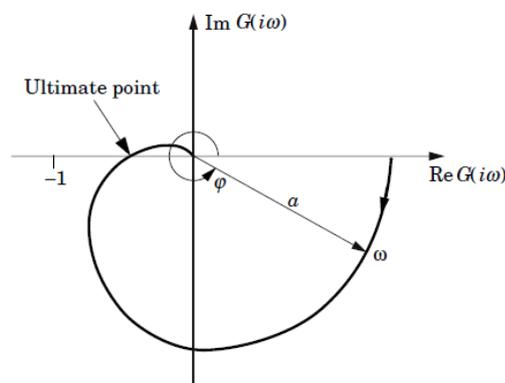


Figura 5.7 Curva de Nyquist (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005, p.75)

O valor de  $G(i\omega)$  é necessário para os métodos de ajuste desenvolvidos por Ziegler e Nichols serem aplicados. As características das mudanças de *setpoint*, distúrbios de carga e o ruído de medição também devem ser levados em consideração no projeto do sistema de controle. Assim, se o processo for linear, uma resposta ao degrau revela todas as informações sobre o processo dinâmico. Da mesma forma, uma curva de Nyquist ou resposta em frequência fornece uma resposta completa e a descrição de um processo dinâmico.

Sempre há perturbações agindo em um sistema de controle, que podem ocorrer nos pontos de ajuste, nos distúrbios de cargas ou nos ruídos de medição. Distúrbios de carga são mais frequentes e geralmente de baixa frequência, capazes de serem filtrados pelo processo. Os parâmetros da Equação (5.36) podem ser determinados a partir de um teste de resposta. O tempo aparente de atraso ( $L$ ) é dado pelo ponto onde a tangente intercepta o nível de estado estacionário antes da mudança de etapa. A Figura 5.8 apresenta como se obtêm os parâmetros a partir da curva obtida pelos processos estático e dinâmico.

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL} \quad (5.36)$$

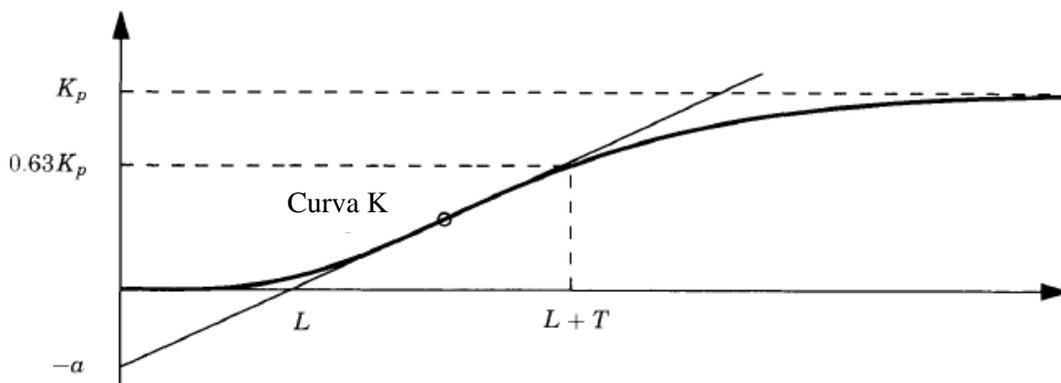


Figura 5.8 Parâmetros em um modelo de degrau (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005, p. 69)

A partir dos resultados obtidos, pode-se dimensionar os atuadores e selecionar a resolução do sensor, de acordo com a faixa de sinal requerida.

A determinação do erro é realizada com base na curva de ganho  $K_p$  (Figura 5.9) derivada da análise do processo estático, onde a Banda Proporcional ( $Pb$ ) define o valor da primeira constante de ganho proporcional ( $K_p$ ).

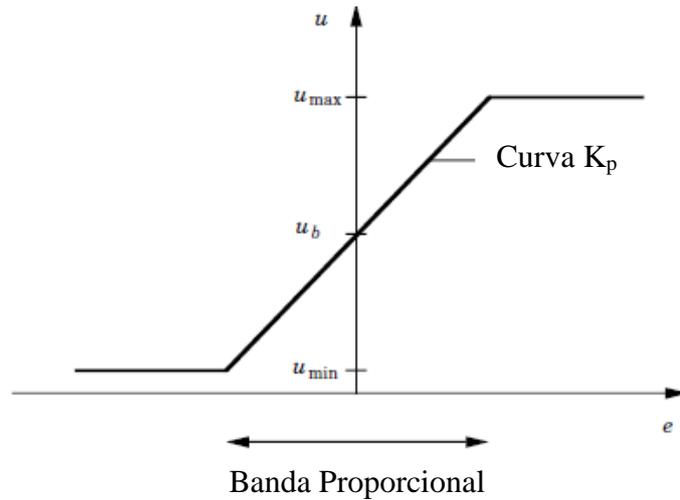


Figura 5.9 Característica do controle proporcional – obtenção do erro a partir do sinal de controle  $u$  (ÅSTRÖM, K. e HÄGGLUND, T. 1995, p. 68)

$$u_{m\acute{a}x} - u_{m\acute{i}n} = K_p \cdot Pb \quad (5.37)$$

A principal função da ação integral (I) é garantir que a saída do processo esteja de acordo com o ponto de ajuste no estado estacionário. Assim, este termo fornece uma ação de controle proporcional ao tempo integral do erro, onde a relação entre a variável de controle e o erro é dada por:

$$u(t) = K_p \left( e_p(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (5.38)$$

A ação derivativa (D) é pouco utilizada ou frequentemente desligada (HÄGGLUND, T. e ÅSTRÖM, K. 2005). Trata-se de uma ação proporcional à derivada temporal do erro de controle, permitindo a previsão de um erro futuro. O controle derivativo pode ser representado através da equação a seguir:

$$u(t) = K_p \left( e_p(t) + T_D \frac{de_D(t)}{dt} \right) \quad (5.39)$$

Expandindo a Equação (5.39) em série de Taylor, obtém-se a Equação (5.40), a qual reflete que o sinal de controle é proporcional a uma estimativa de controle de erro no tempo  $T_D$ , onde a estimativa é obtida por extrapolação, ou seja:

$$e(t + T_D) \approx e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5.40)$$

Uma estrutura flexível é obtida tratando o ponto de ajuste e a saída do processo. Com isso, um controlador PID pode ser dado pela equação:

$$u(t) = K_p \left( e_p(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de_D(t)}{dt} \right) \quad (5.41)$$

onde os erros proporcional, derivativo e integral são dados pelas Equações 5.42, 5.43 e 5.44.

$$e_p = by_{sp} - y \quad (5.42)$$

$$e_D = cy_{sp} - y \quad (5.43)$$

$$e = y_{sp} - y \quad (5.44)$$

Segundo Hägglund e Åström (2005), o coeficiente  $b$  representa o distúrbio de carga e varia entre os valores 0, 0,5 e 1, já o parâmetro  $c$  representa a medição do ruído, podendo apresentar os mesmos valores. Para garantir um controle do tipo PID, o ideal é manter  $b$  e  $c$  iguais a 1.

Para implementar uma lei de controle de tempo contínuo, como um controlador PID em um código computacional, é necessário aproximar as derivadas e a integral que aparecem na lei de controle. Algumas alternativas de aproximação são apresentadas a seguir:

Ação proporcional:

$$P = K_p (by_{sp} - y) \quad (5.45)$$

Para os instantes de amostragem, tem-se:

$$P(t_k) = K_p (by_{sp}(t_k) - y(t_k)) \quad (5.46)$$

Ação integral:

$$I(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(s) ds \quad (5.47)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{K_p}{T_i} e \quad (5.48)$$

Embora existam diferentes maneiras para a aproximação das equações, neste trabalho será empregada uma aproximação em diferenças finitas (*forward differences*):

$$\frac{I(t_{k+1}) - I(t_k)}{h} = \frac{K_p}{T_i} e(t_k) \quad (5.49)$$

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{K_p h}{T_i} e(t_k) \quad (5.50)$$

Ação derivativa:

Aplicando novamente uma aproximação em diferenças finitas sobre o termo derivativo, obtém-se:

$$\frac{T_D}{N} \frac{D(t_{k+1}) - D(t_k)}{h} + D(t_k) = -K_p T_D \frac{y(t_{k+1}) - y(t_k)}{h} \quad (5.51)$$

$$D(t_{k+1}) = \left(1 - \frac{N h}{T_D}\right) D(t_k) - K_p N (y(t_{k+1}) - y(t_k)) \quad (5.52)$$

Nas expressões acima,  $t_k$  indica um instante de tempo no processo de integração temporal,  $h$  define o período de amostragem e  $N$  é um parâmetro do modelo, com valores variando entre 8 e 20, usualmente (HÄGGLUND E ÅSTRÖM, 2005).

No Capítulo 7, dedicado a simulação de exemplos, apresenta-se o desenvolvimento da teoria de controle PID para *spoilers* aplicados a cobertura de um galpão industrial. A formulação utilizada baseia-se nas equações e teoria apresentadas acima, empregando-se análises estáticas e dinâmicas propostas neste trabalho.

## 5.4 MOVIMENTO DE MALHA E SPOILERS

Os *spoilers* serão considerados aqui usando a hipótese de corpo rígido, com movimento governado pelo algoritmo de controle PID. No modelo atual, os *spoilers* só podem girar em torno de seu eixo de rotação, localizado junto a sua borda (aresta) à jusante (Figura 5.10). Com o intuito de acomodar o movimento do dispositivo dentro da malha de elementos finitos do escoamento, uma formulação cinemática ALE e um esquema de movimento de malha são adotados. A formulação ALE, introduzida por Hughes et al. (1981) e Donea et al. (1982), consiste em adotar um domínio que se move arbitrariamente e independentemente dos pontos espaciais e materiais.

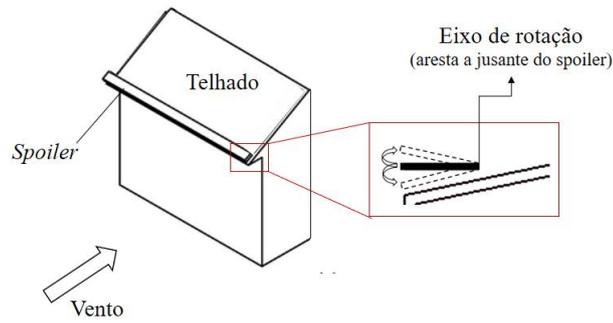


Figura 5.10 Movimento do Spoiler

As forças aerodinâmicas são avaliadas localmente considerando qualquer elemento finito que compartilha uma face do elemento com uma interface fluido-estrutura, expressa como:

$$(\mathbf{F}_i)_E = \int_{\Gamma_E} \mathbf{N}^T \left[ (\mathbf{N}\bar{\mathbf{p}})n_i - (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} \bar{\mathbf{v}}_i \right) n_j \right] d\Gamma \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (5.53)$$

onde  $\bar{\mathbf{v}}_i$  e  $\bar{\mathbf{p}}$  são os vetores locais de velocidade e pressão do escoamento, enquanto  $n_j$  são componentes do vetor unitário normal avaliado em um ponto na interface. Usando um procedimento típico de montagem de elementos finitos, os vetores de força aerodinâmica  $\mathbf{F}_I$  são avaliados em nível nodal. As resultantes de força aerodinâmica e momento em um ponto específico P são finalmente obtidas com:

$$\mathbf{F}_R = \sum_{I=1}^{NNI} \mathbf{F}_I; \quad \mathbf{M}_R^P = \sum_{I=1}^{NNI} (\mathbf{r}_{PI} \times \mathbf{F}_I) \quad (5.54)$$

onde  $NNI$  é o número de nós na interface fluido-estrutura.

A análise do escoamento com malhas móveis é realizada adequadamente se a Lei de Conservação Geométrica (LCG) for satisfeita (ver Thomas e Lombard, 1979 para informações detalhadas). De acordo com Lesoinne e Farhat (1996), a LCG é satisfeita em formulações ALE de elementos finitos se o vetor de velocidade de malha  $\mathbf{w}$  for calculado da seguinte forma:

$$\mathbf{w} = \mathbf{v} = \frac{\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n}{\Delta t} \quad \text{em } \Gamma_t^{\text{fsi}} \quad (5.55)$$

onde  $\Gamma_t^{\text{fsi}}$  é a interface sólido-fluido no instante  $t$ , enquanto que  $\mathbf{x}_n$  e  $\mathbf{x}_{n+1}$  são vetores de coordenadas nodais referentes a nós da malha do escoamento sobre a interface, as quais são avaliadas nos instantes  $t_n$  e  $t_{n+1}$  dentro do intervalo de tempo  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ .

Assim, o movimento da malha do escoamento em uma região próxima será definido arbitrariamente de acordo com o movimento do *spoiler*. Neste trabalho, um esquema de movimento de malha proposto por Teixeira (2001) e adotada por Braun (2007) é empregado (Figura 5.11), onde as componentes do vetor velocidade de malha são obtidas da seguinte forma:

$$w_k^i = \frac{\sum_{j=1}^{NS} a_{ij} w_k^j}{\sum_{j=1}^{NS} a_{ij}} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (5.56)$$

onde  $NS$  é o número de pontos de malha localizados nos limites do domínio ALE e  $a_{ij}$  são coeficientes de influência definidos entre os pontos de malha  $i$  e  $j$ , considerando que  $i$  refere-se a pontos de malha internos, passíveis de movimento, e  $j$  refere-se a pontos de malha sobre os limites do domínio ALE, onde  $w_i = 0$ . Os coeficientes de influência  $a_{ij}$  são obtidos por:

$$a_{ij} = (d_{ij})^{-n} \quad (5.57)$$

onde  $d_{ij}$  é a distância Euclidiana entre os pontos  $i$  e  $j$  da malha e  $n$  é um parâmetro definido pelo usuário, o qual é escolhido de acordo com a amplitude dos deslocamentos do corpo imerso, a fim de evitar a distorção excessiva da malha.

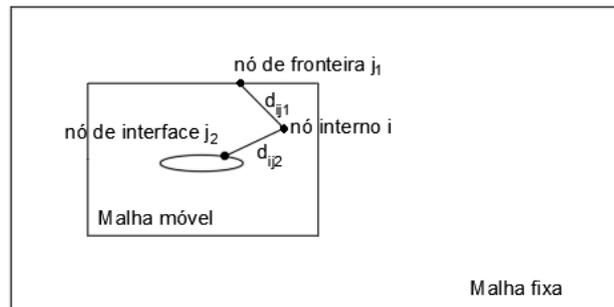


Figura 5.11 Definição de parâmetros para o esquema de movimento de malha (adaptado de BRAUN, 2007)

Nota-se que  $a_{ij}$  representa um fator peso no cálculo dos valores das velocidades de malha, o qual define a influência exercida pelos nós de fronteira sobre os nós internos. Assim, a distância  $d_{ij}$  é inversamente proporcional à influência da velocidade do nó de fronteira sobre a velocidade do nó interno. Esta ponderação é atenuada pelo expoente  $n$ , sendo tradicionalmente definido como  $n = 4$  (Braun, 2007). Além disso, a delimitação da área/volume da região ALE é definida

pelo usuário, baseada em trabalhos semelhantes existentes, experiências anteriores ou suposições sobre o campo de deslocamento.

O campo de velocidades de malha é estabelecido de maneira que as distorções dos elementos sejam minimizadas, respeitando as condições de contorno dadas por:

$$\mathbf{w}|_{\Gamma_t^{\text{fsi}}} = \mathbf{w}_b \quad (5.58)$$

$$\mathbf{w}|_{\Gamma_t^e} = \mathbf{w}_e = \mathbf{0} \quad (5.59)$$

onde  $\mathbf{w}_b$  é um vetor com valores prescritos de velocidade de malha, referentes aos nós dos elementos do fluido que pertencem à superfície em contato com o corpo deslocável ( $\Gamma_t^{\text{fsi}}$ ), e  $\mathbf{w}_e$  é o vetor de velocidade de malha dos nós que pertencem à fronteira entre as regiões ALE e Euleriana da malha do fluido ( $\Gamma_t^e$ ), os quais possuem valores prescritos nulos.

O vetor de velocidades do escoamento referente aos nós pertencentes à superfície do *spoiler* é calculado aqui considerando que o movimento do *spoiler* é restrito a rotações de corpo rígido em torno do eixo de rotação e a condição de não escorregamento, o que leva a:

$$\mathbf{v}_{int}(t_{n+1}) = \boldsymbol{\omega}^s(t_{n+1}) \times \mathbf{r}_{o,int}(t_{n+1}) \quad (5.60)$$

onde  $\mathbf{r}_{o,int}$  é um vetor posição definido entre um ponto sobre o eixo de rotação ( $o$ ) e um ponto qualquer sobre a superfície do *spoiler* ( $int$ ). O vetor velocidade angular do *spoiler*  $\boldsymbol{\omega}^s$  é obtido levando-se em consideração a posição angular dada pelo algoritmo de controle (Equação 5.41) dentro de um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Considerando que o eixo de rotação está alinhado com o eixo de coordenadas global Z, a velocidade angular do *spoiler* pode ser avaliada da seguinte forma:

$$\omega_z(t_{n+1}) = \frac{u(t_{n+1}) - u(t_n)}{\Delta t} \quad (5.61)$$

onde  $u$  é a variável de controle, a qual define a posição angular instantânea do *spoiler*.

A posição dos nós de fluido no domínio ALE é então atualizada considerando a seguinte expressão:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \mathbf{w}\Delta t \quad (5.62)$$

onde  $\mathbf{w}$  é o vetor velocidade de malha avaliado a partir das Equações (5.55) e (5.56).

## 6 FERRAMENTAS NUMÉRICAS UTILIZADAS E ALGORITMO DOS CÓDIGOS IMPLEMENTADOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

A análise dos problemas é realizada por meio de três etapas bem definidas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na primeira, realiza-se a modelagem geométrica do problema, estabelecendo o domínio computacional (relativo ao espaço de análise – volume de controle) e a estrutura de malha (tipo e quantidade de elementos). Neste trabalho, a primeira etapa será realizada através do *software Gmsh*. A fase subsequente de processamento ou simulação numérica ocorre com o emprego de códigos-fonte (em linguagem FORTRAN 90) formados por um conjunto de rotinas, as quais representam as operações matemáticas necessárias para a solução das equações fundamentais do problema. A terceira e última etapa consiste na análise e interpretação dos resultados obtidos através da fase anterior. Neste estudo, esta etapa é realizada por meio do *software Tecplot 360 Free Trial 2020*, onde é possível a visualização de campos instantâneos e médios, bem como a construção de gráficos.

O *software Gmsh*, apesar de ser uma versão de gerador de malha tridimensional gratuito, ainda não é muito utilizado em trabalhos do PPGEC-UFRGS. Assim, no decorrer deste capítulo, um resumo detalhado sobre suas funcionalidades será apresentado. Após, uma breve descrição dos algoritmos implementados e utilizados na fase de processamento será apresentada, juntamente com os modelos de paralelização utilizados no código. Por fim, destacam-se os parâmetros necessários na fase de pós-processamento.

### 6.2 GMSH

O *software* utilizado neste trabalho para a discretização dos volumes é o *GMSH 4.4.1*, distribuído pela GNU *General Public License* (GPL) e desenvolvido em 1997 por C. Geuzaine e J.-F. Remacle. De acordo com Geuzaine e Remacle (2009), trata-se de um gerador de malha de elementos finitos uni, bi e tridimensional, com código aberto, cujo objetivo é fornecer uma ferramenta de malha rápida (geração em segundos), leve (requer pouco espaço para instalação) e fácil de manipular, devido a sua entrada paramétrica e recursos avançados de visualização. Neste contexto, o *Gmsh* é utilizado para obtenção dos arquivos em formato ASCII (*.msh*), o

qual apresenta as informações relativas aos nós (número total e coordenadas), aos elementos (número total e conectividades) e à geometria do problema.

A geração da malha através do *software* é realizada por meio de um arquivo de entrada (.geo) (Figura 6.1) com linguagem paramétrica, onde além dos pontos, linhas, superfícies e volumes definidos, apresenta-se a quantidade de subdivisões ao longo das linhas (representando o total de pontos que haverá e, por consequência, o número total de elementos ligados a essa linha) ou o refinamento a partir do nó (estabelecimento do tamanho do elemento no ponto – comando *gridsize*). Esses podem seguir um tamanho conforme uma progressão geométrica, constante ou que se adapte à curvatura (através dos seguintes comandos: “*Progression*” ou “*Bump*”). A malha de elementos tetraédricos (utilizados neste trabalho) é, por sua vez, gerada através da interface do *Gmsh*.

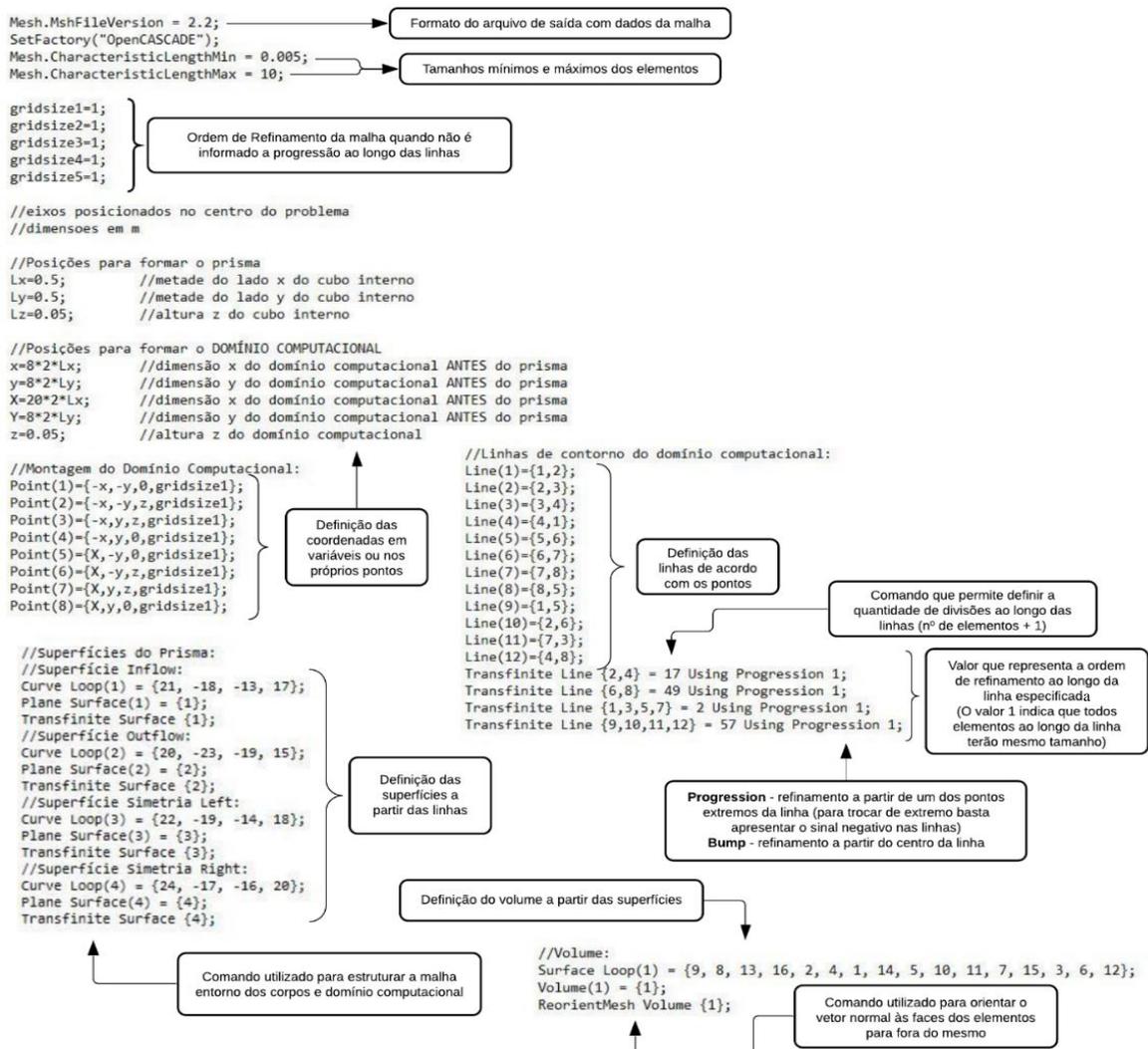


Figura 6.1 Exemplo de organização do arquivo (.geo)

Uma maneira eficiente de geração da estrutura é construí-la em um plano bidimensional e através do comando “*Extrude*” transformá-la em tridimensional. Esse método garante que a malha apresente quantos elementos se desejar ao longo da espessura na direção extrudada.

De acordo com Geuzaine e Remacle (2009), uma malha tetraédrica geralmente necessita de melhoramento, adequando a qualidade dos elementos, o que pode ser realizado aplicando as opções de otimização. O *Gmsh* implementa seu próprio procedimento de otimização de malha onde, por meio da troca de bordas e faces e realocações de vértices, promove um melhoramento de qualidade. Outra opção é utilizar o algoritmo de código aberto “*Netgen*”, que por sua vez traz melhorias adicionais. Para o presente trabalho, a otimização “*Netgen*” apresentou resultados mais satisfatórios na geração da malha de tetraedros, reduzindo o tempo de processamento dos problemas no código de solução das equações do escoamento. A Figura 6.2 apresenta um exemplo de arquivo de saída com os dados da malha disponibilizados pelo *Gmsh*.

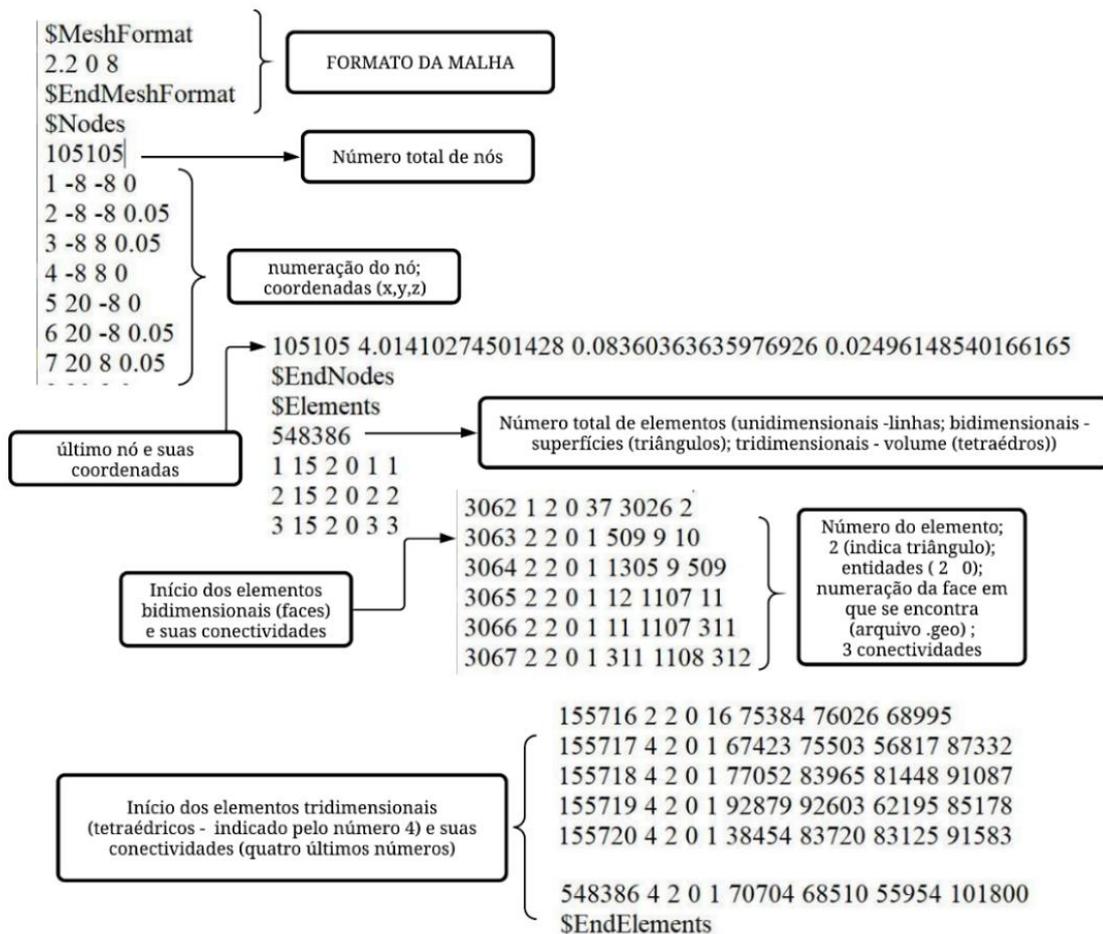


Figura 6.2 Arquivo de saída do *Gmsh* com dados da malha – formato 2.2

Algumas informações não são obtidas diretamente pelo *Gmsh*, como as condições de contorno das variáveis, as condições iniciais de velocidade e pressão e os dados relativos às constantes físicas da matéria. Por meio da implementação de códigos de interface, desenvolvidos para este trabalho em linguagem *Fortran90*, foi possível separar e obter todas as informações necessárias.

Além disso, deve-se atentar para a determinação de vetores normais à face de contorno dos elementos, a qual é realizada considerando que a numeração das conectividades promova a orientação saliente à face, ou seja, com sentido do vetor apontando para fora dos elementos. A Figura 6.3 apresenta um elemento genérico e sua numeração local, proposta pelo *software*. Nota-se que essa segue o sentido oposto ao implementado pela formulação do elemento tetraedro (ver Apêndice A), fazendo com que os vetores normais apontem para o interior do corpo. Deste modo, uma renumeração para as conectividades é realizada pelo programa de interface. Na Tabela 6.1 demonstram-se as faces e a ordem de numeração para a garantia do sentido correto dos vetores normais às faces dos elementos conforme a formulação do tetraedro proposta para este trabalho.

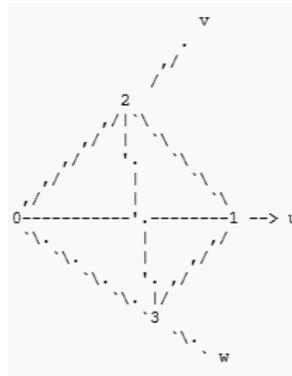


Figura 6.3 Numeração local do elemento tetraédrico no *Gmsh* (adaptado de Manual *GMSH*)

Tabela 6.1 Identificação das faces de contorno e as respectivas conectividades em elementos de contorno

FACE	ORDEM DE NUMERAÇÃO DAS CONECTIVIDADES
I	2 – 3 – 4
II	1 – 4 – 3
III	1 – 2 – 4
IV	1 – 3 – 2

### 6.3 ALGORITMO PARA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

No presente trabalho são implementadas as rotinas de controle, bem como a otimização, através do processamento paralelo utilizando diretivas OpenMP. O algoritmo utilizado para a solução

das equações do fluido é resumido pelas etapas apresentadas na Figura 6.4, sendo este necessário nas fases iniciais, onde o escoamento foi alvo principal do estudo. A fase posterior, a qual utiliza o algoritmo de controle PID para movimentar o *spoiler*, será descrita na sequência. De maneira geral, os códigos implementado em FORTRAN 90 e com paralelização OpenMP, foram simulados através dos supercomputadores presentes no Centro Nacional de Supercomputação de Alto Desempenho em São Paulo (CENAPAD-SP) (Intel Xeon IBM P750 – 64Gb de memória RAM), no PC do Centro de Mecânica Aplicada Computacional (CEMACOM/PPGEC/UFRGS) (Processador Intel Xeon E5-2699v4 2.20GHz – 64Gb de memória RAM) e no Supercomputador Lobo Carneiro do Núcleo Avançado de Computação de Alto Desempenho (NACAD/COOPE-UFRJ) (Intel Xeon E5-2670v3 2.30GHz – 64Gb de memória RAM).

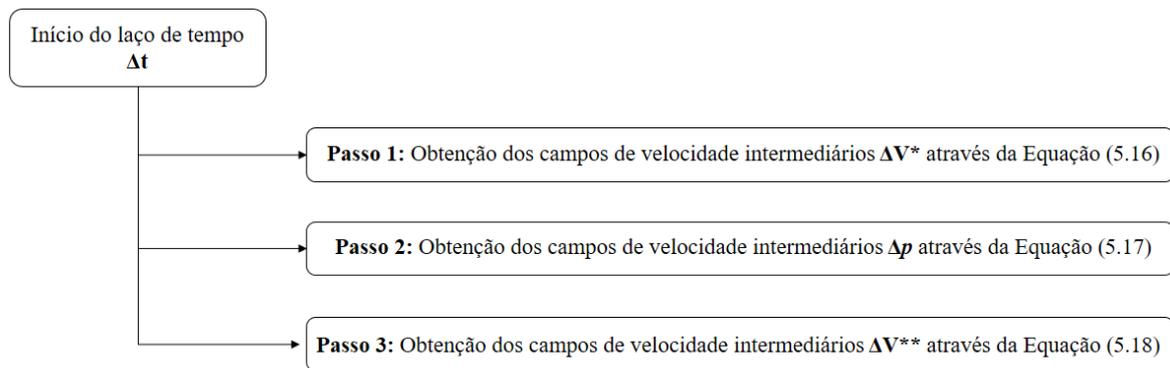


Figura 6.4 Algoritmo numérico do trabalho – simulações de ventilação

A metodologia de mitigação de pressão, proposta neste trabalho, para reduzir a carga aerodinâmica em telhados de edifícios baixos pode ser brevemente descrita usando o seguinte algoritmo numérico:

- 1) Obter o campo de velocidades do escoamento usando as Equações (5.16) a (5.18) e as condições de contorno especificadas pelas Eqs. (4.12) a (4.14);
- 2) Obter as forças aerodinâmicas geradas pelo vento sobre superfícies do telhados com sensores (Equações 5.53 e 5.54);
- 3) Determinar a orientação angular do *spoiler* usando controle PID, Equações (5.41) a (5.52);
- 4) Calcular a velocidade angular instantânea do *spoiler* usando a Equação (5.61);
- 5) Calcular o vetor de velocidade instantânea do escoamento para nós da malha sobre a superfície do *spoiler* usando a Equação (5.60);

- 6) Obter o vetor de velocidade de malha instantâneo sobre o domínio ALE considerando o esquema de movimento de malha apresentado pela Eq. (5.56), sujeito a condições de contorno expressas pelas Equações (5.58) e (5.59);
- 7) Atualizar a posição dos nós de fluido no domínio ALE usando a Eq. (5.62);
- 8) Retornar ao passo 1 e seguir para o próximo passo de tempo, até que o processo de integração no tempo esteja concluído.

A aplicação da computação paralela tem crescido proporcionalmente à complexidade dos problemas investigados. Em alguns códigos a paralelização é indispensável para garantir a simulação computacional, devido à quantidade de dados a serem processados. O processamento em paralelo iniciou via CPUs (“*Central Process Units*”), mas o comumente utilizado pela comunidade acadêmica são diretrizes de paralelização de tarefas por sistema de memória compartilhada e/ou mecanismos de multiprocessamento (OpenMP ou MPI). Por este motivo, neste trabalho foram utilizadas as diretrizes de paralelização OpenMP.

#### 6.4 PARÂMETROS E ANÁLISE DE PÓS-PROCESSAMENTO

A visualização dos resultados, gerados pelo código-fonte desenvolvido neste trabalho, dados na forma de campos de velocidade e pressão, coordenadas da malha e coeficientes aerodinâmicos (arrasto, sustentação, momentos e pressão), é feita pela integração dos arquivos em um formato legível pelo *software TECPLOT 360 Free Trial 2020*.

Na Engenharia do Vento, a utilização de coeficientes para a quantificação das características aerodinâmicas dos corpos imersos no escoamento é muito difundida, pois através dos históricos dos coeficientes pode-se obter a estimativa da carga produzida pelo vento sobre a estrutura, levando a projetos otimizados em relação a essas características. Além disso, para que seja válida a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com os publicados por outros autores é necessária que haja a similaridade entre os escoamentos e os coeficientes analisados. O coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) é ligado às forças que atuam sobre a estrutura na direção do escoamento. O coeficiente de sustentação ( $C_L$ ) é determinado em função das forças que atuam na estrutura transversalmente ao escoamento. Aqui os coeficientes serão apresentados a partir das forças obtidas para as direções X, Y e Z, devendo em cada caso ser determinada a direção que garante os coeficientes de arrasto e sustentação. Os coeficientes de momento aerodinâmico ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) referem-se às cargas de momento produzidas nos eixos globais X, Y e Z. O coeficiente de pressão ( $C_P$ ) mede a pressão exercida pelo escoamento sobre a superfície do

corpo imerso e é relacionado à *pressão de referência*  $p_0$  (determinada geralmente em um ponto de estagnação sobre o corpo ou em uma região não perturbada do escoamento) e à *pressão dinâmica* (calculada em uma região não perturbada do escoamento). A Figura 6.5 apresenta a convenção de sinais e eixos para a determinação das forças aerodinâmicas.

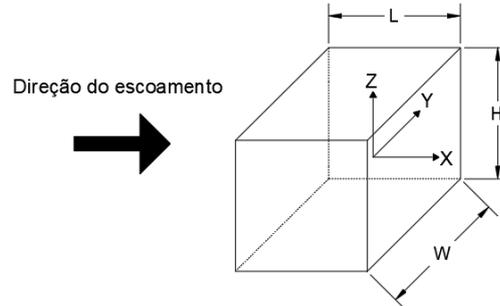


Figura 6.5 Convenção de sinais do escoamento

Expressões para os coeficientes descritos acima são apresentadas abaixo:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^{NNI} (F_x)^i}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 HW} \quad (6.1)$$

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^{NNI} (F_y)^i}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 HL} \quad (6.2)$$

$$C_z = \frac{\sum_{i=1}^{NNI} (F_z)^i}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 WL} \quad (6.3)$$

$$(C_p)_i = \frac{p_i - p_0}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (6.4)$$

$$C_{M_k} = \frac{\sum_{i=1}^{NNI} (F_{x_m} \Delta_{x_n} - F_{x_n} \Delta_{x_m})^i}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A_i L_i} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (6.5)$$

sendo  $F_{x_m}$  e  $F_{x_n}$  as forças nas direções  $m$  e  $n$  definidas para cada nó, perpendiculares ao eixo  $k$ , onde se deseja calcular o coeficiente  $C_{M_k}$ ;  $\Delta_{x_n}$  e  $\Delta_{x_m}$  representam as distâncias entre o nó e o centro de massa do corpo referentes às coordenadas  $m$  e  $n$ ;  $L_i$  é o braço de alavanca na direção

do escoamento;  $NNI$  é o número total de nós em contato com o corpo,  $A_i$  a área de influência do nó  $i$ ,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $V_\infty$  a velocidade característica do escoamento e  $p_i$  a pressão no nó  $i$ .

O número de *Strouhal* (SCHLICHTING, 2016) é um parâmetro adimensional relacionado à determinação da frequência de desprendimento de vórtices ( $f_s$ ), sendo definido como:

$$St = \frac{f_s D}{V_\infty} \quad (6.6)$$

onde  $D$  é a dimensão característica do corpo.

Escoamentos turbulentos, cujo número de Reynolds é muito elevado, possuem a chamada camada limite, a qual corresponde a uma fina camada de fluido situada próximo aos contornos dos sólidos imersos na corrente, onde os efeitos viscosos são importantes. Após a camada limite, forma-se uma zona de transição ou amortecimento e, por fim, a camada inercial ou esteira é percebida. Após o ponto de separação, na esteira se tem o escoamento descolado a sotavento, com velocidades variáveis (Loredo-Souza, 1992). Para que a simulação capture todas as zonas e se desenvolva adequadamente, deve-se garantir um refinamento ideal da malha no entorno do corpo. Uma das formas de garantia desse refinamento é através do fator adimensional  $y^+$ , que deve apresentar valor inferior a 5 e é definido pelo tamanho do menor elemento, viscosidade cinemática, número de Reynolds, massa específica, velocidade e dimensão de referência.

Embora a metodologia LES produza soluções com um melhor nível de aproximação em modelos 3D para simulações de turbulência, uma análise tipo LES 2D também pode ser adotada em casos de flutuações homogêneas longitudinais (SANGALLI e BRAUN, 2020). Para Bruno e Khris (2003), pode-se reproduzir os efeitos associados aos escoamentos 3D com ajuste do parâmetro livre do modelo de sub-malha, definido neste trabalho através da constante de Smagorinsky. Neste caso, as características adimensionais do escoamento (alongamento de vórtices e vórtices na esteira) desempenham papel importante na cascata de energia, subtraindo uma quantidade elevada de energia do escoamento transversal, as quais não podem ser simuladas exatamente em uma análise 2D, mas seus efeitos podem ser percebidos utilizando um valor otimizado da constante de Smagorinsky e discretização cuidadosa do domínio computacional, técnicas que serão adotadas por este trabalho.

## 7 ANÁLISE DE ESCOAMENTOS – VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CÓDIGO

A etapa de verificação de um código é definida por Roache (1997) como sendo aquela em que se realiza a comparação de soluções computacionais, onde é possível solucionar incoerências das relações matemáticas, erros e incertezas numéricas e discretização (refinamento) de malhas. Já a etapa de validação refere-se àquela em que as simulações numéricas são comparadas às experimentais em túneis de vento. Neste trabalho serão analisados exemplos clássicos da Dinâmica dos Fluidos Computacional para verificar e validar o algoritmo proposto, os quais abrangem a efetividade dos modelos sub-malha clássico e dinâmico de Smagorinsky baseados na Simulação de Grandes Escalas (LES).

Este capítulo apresenta cinco seções onde escoamentos sobre cavidades, prismas retangulares, estruturas com aberturas (ventilação), galpões com e sem aberturas (cargas e pressões) e *spoilers* serão os temas estudados, respectivamente.

### 7.1 ESCOAMENTO SOBRE CAVIDADES

#### 7.1.1 Cavidade Bidimensional

Nesta etapa é apresentado o estudo acerca da recirculação de um fluido viscoso em uma cavidade bidimensional (elementos tetraédricos com um elemento ao longo da espessura), induzida pelo movimento da placa superior com uma velocidade uniforme. Dois casos foram analisados nessa etapa, cada um com número de Reynolds diferente, ou seja, com escoamentos distintos. As características geométricas e as condições de contorno empregadas são explicitadas na Figura 7.1 (plano XY da malha com  $Z = 0,5$  m) e na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Constantes físicas e geométricas para a cavidade com escoamento bidimensional - casos 1 e 2

PARÂMETRO	SIMBOLO	UNIDADE	VALOR
Massa específica	$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	1,00
Viscosidade dinâmica	$\mu$	Re kg/m.s	0,1 e 0,001
Velocidade da placa superior	$V_{\infty}$	m/s	10,00
Dimensão característica	$D$	m	1,00
Constante de Smagorinsky	$C_s$	adm	0,10

Os dois exemplos apresentam uma malha com 20.402 nós e 60.000 elementos tetraédricos, com menor dimensão do elemento próxima a  $5 \times 10^{-3} \text{m}$ . A espessura da cavidade corresponde a um elemento e a terceira componente da velocidade é nula em todo o domínio, a fim de obter-se um escoamento bidimensional. Definindo o número de Reynolds do escoamento,  $Re_{100}$  e  $Re_{10.000}$ , é possível obter-se o valor da viscosidade dinâmico correspondente (Equação 7.1), mantendo constante a massa específica, velocidade e dimensão característica de referência, isto é:

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} \rightarrow \mu = \frac{\rho V_{\infty} D}{Re} \quad (7.1)$$

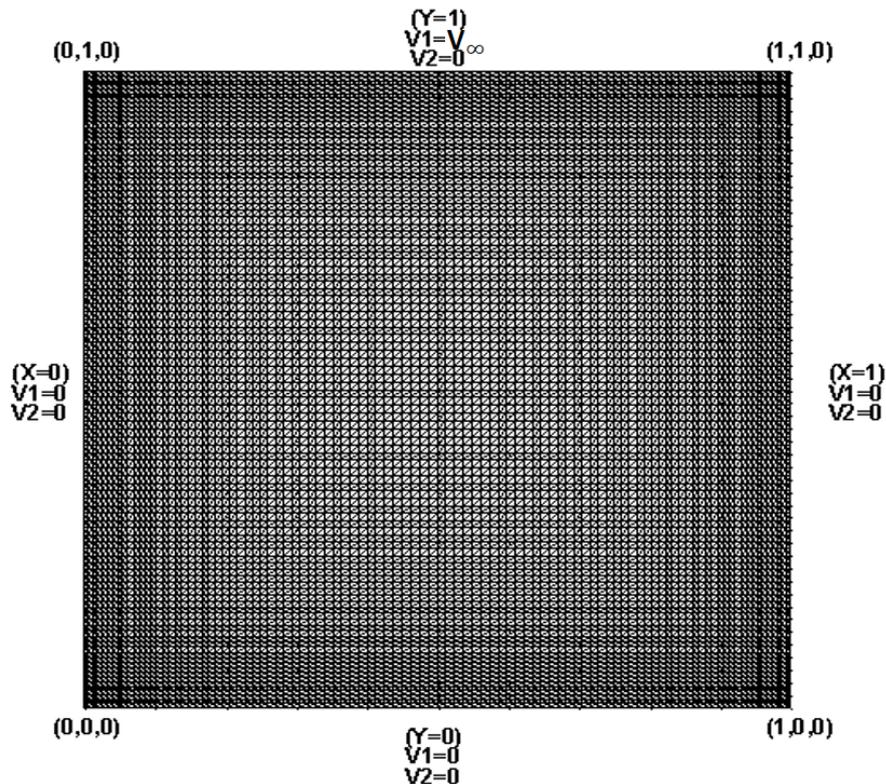


Figura 7.1 Geometria e condições de contorno na cavidade 2D com um elemento tetraédrico de espessura em  $Z = 0,5 \text{ m}$

Para o primeiro caso ( $Re_{100}$ ), a viscosidade dinâmico vale  $0,10 \text{ kg/m.s}$ , enquanto que o incremento de tempo inicial está entorno de  $1,52 \times 10^{-4}$ . A Figura 7.2 apresenta as linhas de corrente do escoamento obtidas por esse trabalho e as apresentadas por Ghia et al. (1982). Já os perfis de velocidades nas linhas médias no interior da cavidade são comparados com a referência através da Figura 7.3.

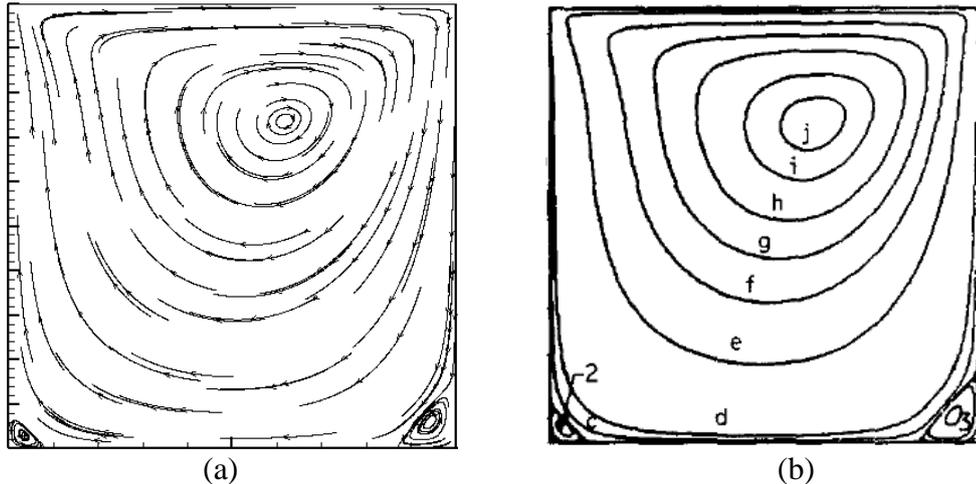


Figura 7.2 Linhas de corrente no interior da cavidade – Re100 (a) estudada por este trabalho (b) Ghia et al. (1982) p.400

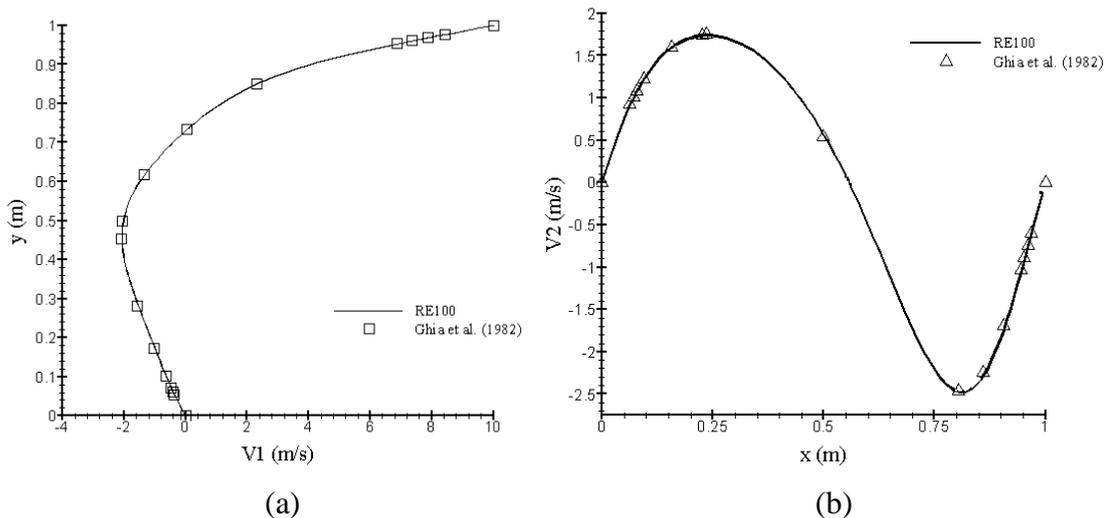


Figura 7.3 Perfis de velocidade – Re100 (a) em  $X = 0,5$  m (b) em  $Y = 0,5$  m

No segundo caso (Re10.000), turbulento, a viscosidade dinâmica vale  $0,001$  kg/m.s, ao passo que o incremento de tempo inicial está entorno de  $3,123 \times 10^{-4}$  s. Para a simulação foi utilizado um modelo de turbulência clássico, no qual diferentes valores para a constante de *Smagorisky* foram testados, além do modelo dinâmico. Neste trabalho, o valor escolhido como o mais adequado, ao compararem-se os resultados com a referência, é  $C_s$  igual a  $0,1$ , para o caso clássico. A Figura 7.4 apresenta as linhas de corrente do escoamento obtidas por esse trabalho para os dois modelos e as obtidas por Ghia et al. (1982). Já os perfis de velocidades nas linhas médias no interior da cavidade são comparados através das Figura 7.5 e Figura 7.6. E, por fim, na Figura 7.7 estão informadas as linhas isobáricas no interior da cavidade.

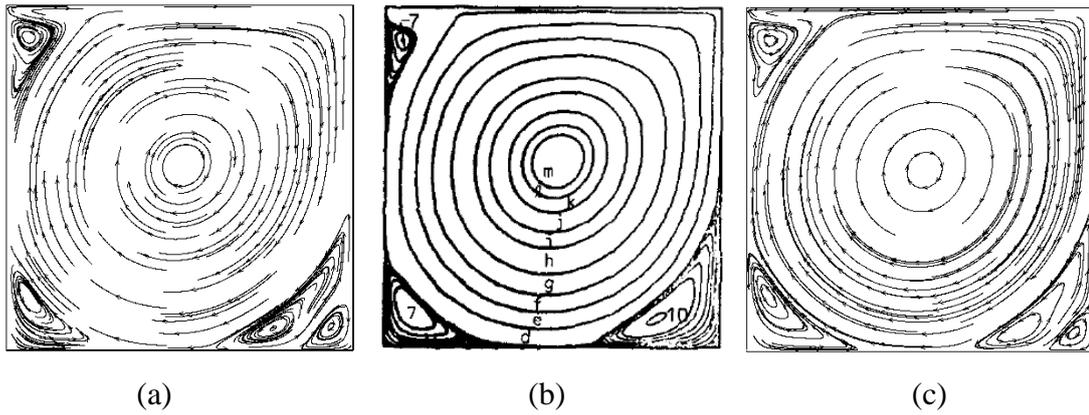


Figura 7.4 Linhas de corrente no interior da cavidade 2D – Re10.000 (a) *Smagorinsky* clássico (b) Ghia et al. (1982) p.402 (c) *Smagorinsky* dinâmico

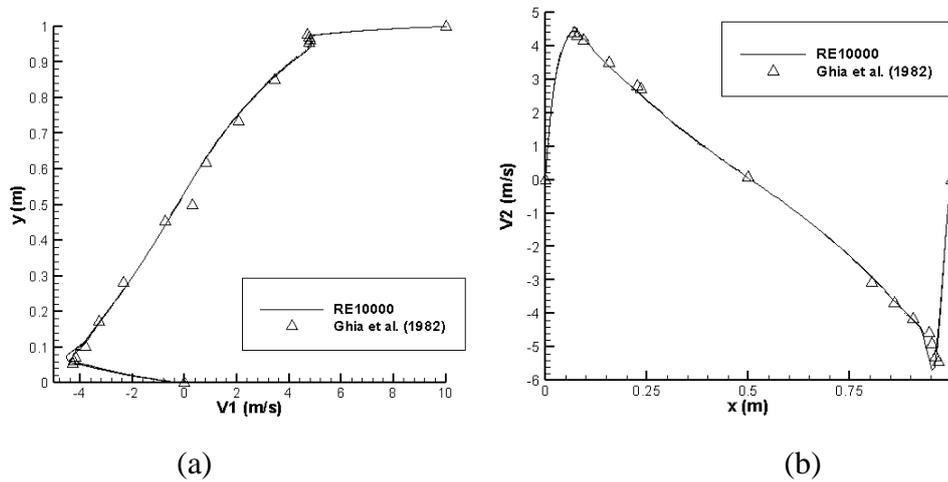


Figura 7.5 Perfis de velocidade nas linhas médias no interior da Cavidade 2D, *Smagorinsky* clássico - Re10.000 (a) X = 0,5 m; (b) Y = 0,5 m

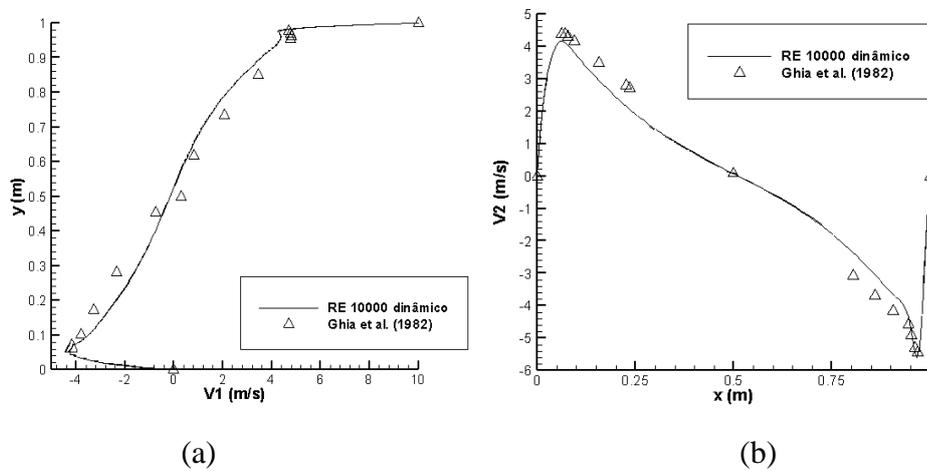


Figura 7.6 Perfis de velocidade nas linhas médias no interior da Cavidade 2D *Smagorinsky* dinâmico - Re10.000 (a) X = 0,5m; (b) Y = 0,5 m

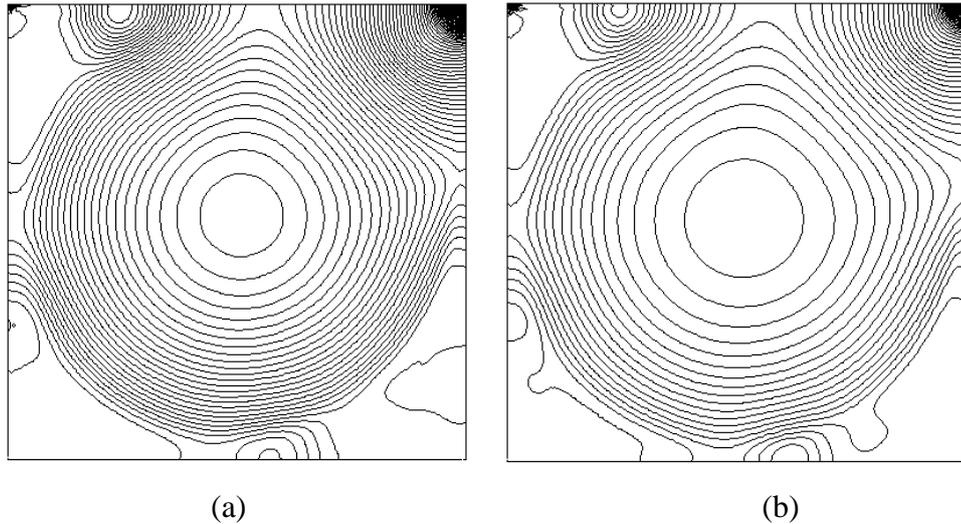


Figura 7.7 Linhas isobáricas no interior da cavidade 2D,  $Re=10.000$ , 300 níveis – (a) *Smagorinsky* clássico ( $C_S=0,1$ ) (b) *Smagorinsky* dinâmico

Percebe-se que os dois modelos apresentam comportamentos semelhantes, no entanto, os perfis de velocidade média são mais próximos à referência quando se compara o modelo clássico de *Smagorinsky*, com  $C_S$  igual a 0,1, ao dinâmico. Isso ocorre porque no modelo dinâmico a constante de Smagorinsky passa a ser considerada como uma variável dependente do espaço e tempo, obtida através de um processo de dupla filtragem. No entanto, apesar do método ter vantagens como a possibilidade de se considerar o fenômeno de “*back-scattering*” (transferência de energia das pequenas para as grandes escalas) e um comportamento assintótico da constante de proporcionalidade (anula-se na subcamada laminar junto aos contornos sólidos), a grande desvantagem está na dificuldade de manter o processo numérico estável, resultado das grandes flutuações apresentadas pelo coeficiente dinâmico.

### 7.1.1 Cavidade Tridimensional

Nesta etapa é apresentado o estudo acerca da recirculação de um fluido viscoso em uma cavidade tridimensional induzida pelo movimento da placa superior com uma velocidade uniforme ao longo da direção X, simulado anteriormente por Bouffanais et al. (2007). Trata-se de um problema turbulento, cujo número de Reynolds é 12.000 e o modelo utilizado é o de *Smagorinsky* clássico. A malha, composta por 1.572.864 elementos tetraédricos e 274.625 nós (Figura 7.8), cujo menor elemento está entorno de  $5,0 \times 10^{-4}$  m, possui as constantes físicas e geométricas de acordo com a Tabela 7.2.

A geometria da cavidade é semelhante a um cubo de dimensões  $2 \times 2 \times 2$ . O refinamento da malha ocorre em regiões onde, segundo Bouffanais et al. (2007), necessita-se de maior atenção para

que o escoamento consiga se desenvolver, ou seja, próximo à região de deslocamento da placa e nas demais paredes. A malha foi gerada controlando o número de elementos nas faces externas do volume.

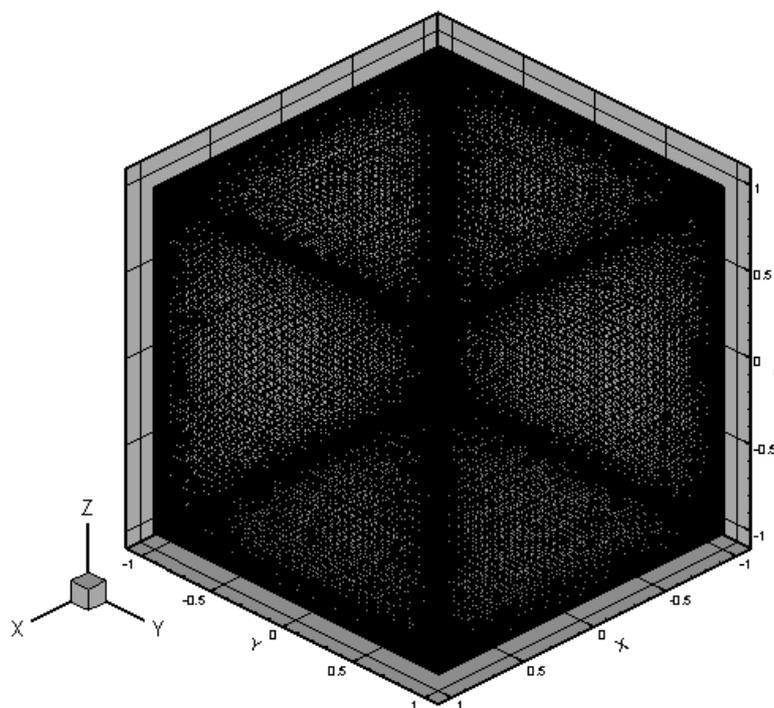


Figura 7.8 Geometria e malha da cavidade tridimensional

Tabela 7.2 Constantes físicas e geométricas para a cavidade com escoamento tridimensional

PARÂMETRO	SIMBOLO	UNIDADE	VALOR
Massa específica	$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	1,00
Viscosidade dinâmica	$\mu$	Re kg/m.s	$1,667 \times 10^{-3}$
Velocidade da placa superior	$V_{\infty}$	m/s	10,00
Dimensão característica	$D$	m	2,00
Constante de Smagorinsky	$C_s$	adm	0,18

As linhas dos campos de velocidades médias relativas as direções X e Y são demonstradas através das Figura 7.9 e Figura 7.10, respectivamente, e comparadas com as referências. Os níveis de velocidade usados na análise são os mesmos considerados pela referência. As linhas de velocidade média no plano  $Z = 0$  m são mostradas na Figura 7.11.

As velocidades cruzadas flutuantes nas linhas  $X = 0$  m e  $Y = 0$  m existentes no plano  $Z = 0$  m estão presentes na Figura 7.12. Detalha-se que a estrutura da malha proposta por este trabalho está em conformidade, mas apresenta algumas diferenças quando comparada com a apresentada

por Bouffanais et al. (2007). Observa-se que há divergências de resultados principalmente no interior da cavidade, estando relacionada a alguma deficiência de malha nesta região.

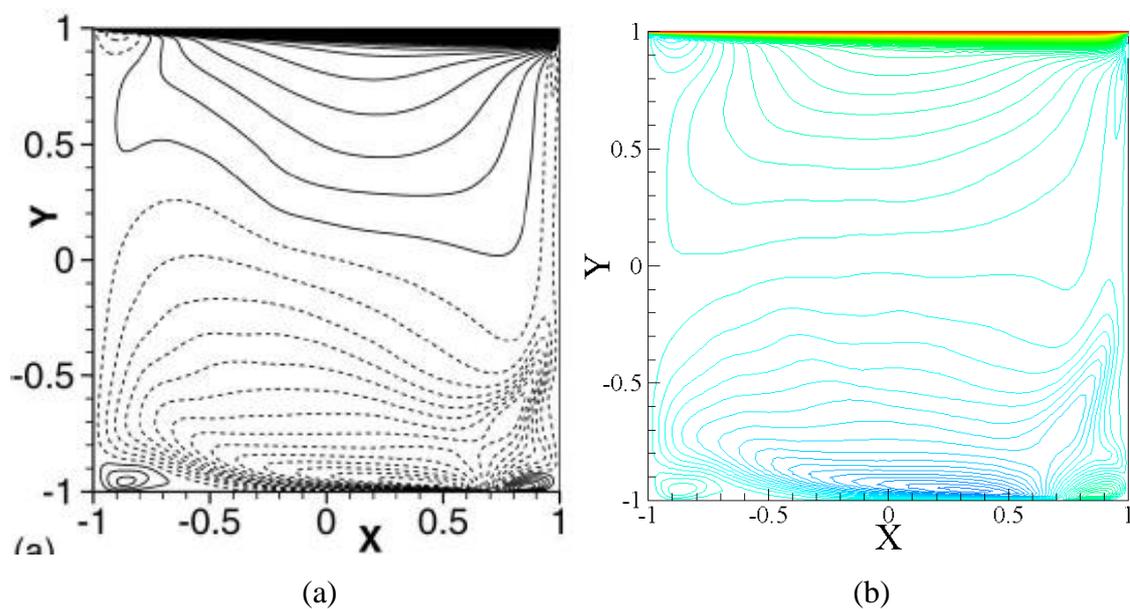


Figura 7.9 Linhas de velocidade  $V_x$  médias no plano  $Z = 0\text{m} - 100$  níveis entre  $-0,4$  e  $1,0$ : (a) Bouffanais et al. (2007) p. 10; (b) presente trabalho

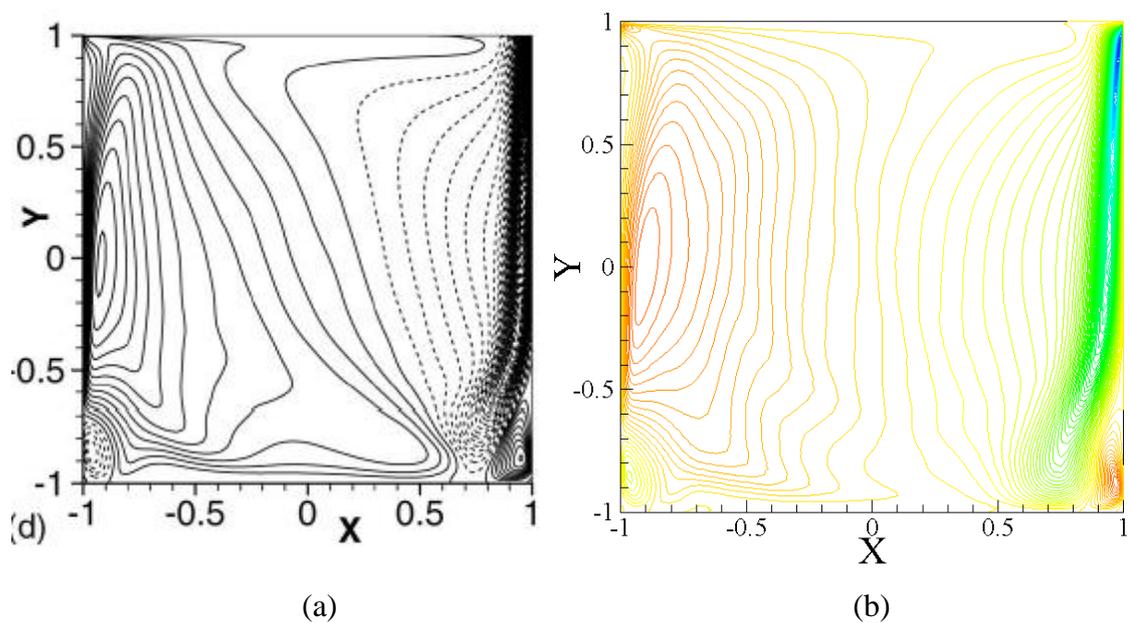


Figura 7.10 Linhas de velocidade  $V_y$  médias no plano  $Z = 0\text{m} - 100$  níveis entre  $-0,7$  e  $0,2$ : (a) Bouffanais et al.(2007) p.10; (b) presente trabalho

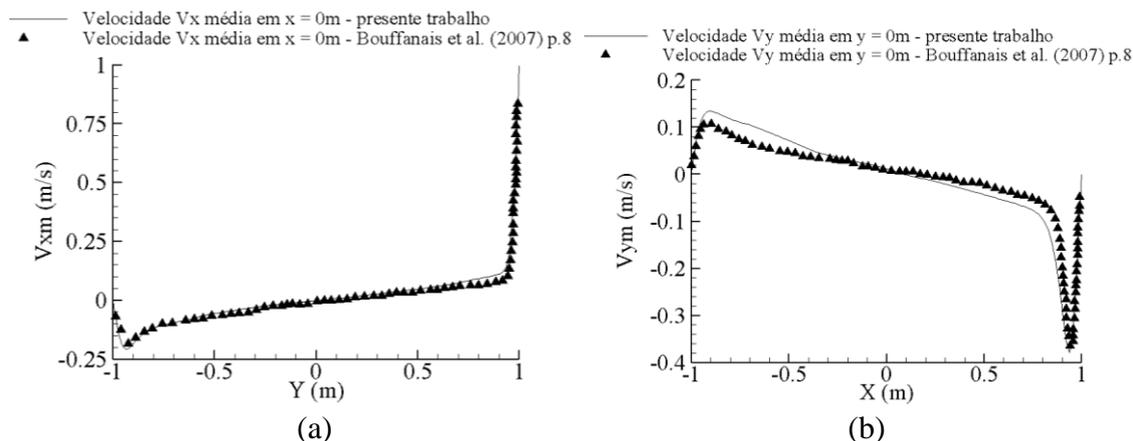


Figura 7.11 Perfis de velocidades (a)  $V_x$  (direção X) média no plano  $Z = 0$  m na linha  $X = 0$  m; (b)  $V_y$  (direção Y) média no plano  $Z = 0$  na linha  $Y = 0$

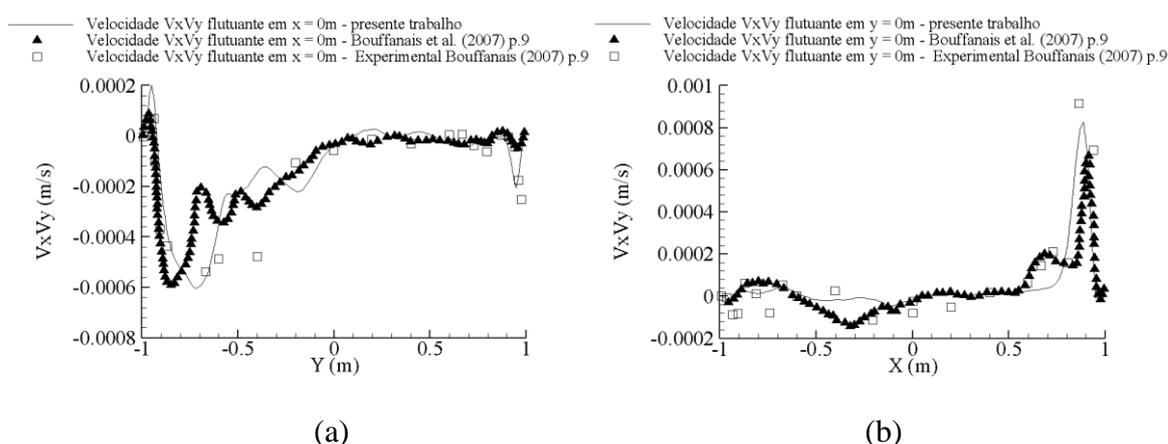


Figura 7.12 Velocidades cruzadas  $V_x V_y$  flutuantes no plano  $Z = 0$ : (a) na linha  $X = 0$ ; (b) na linha  $Y = 0$

## 7.2 ESCOAMENTO SOBRE PRISMAS RETANGULARES – CASO BIDIMENSIONAL

Os exemplos apresentados a seguir remetem a casos de prismas sujeitos a escoamentos laminares ( $Re_{250}$ ) e turbulentos ( $Re_{10^5}$ ). O principal objetivo desta etapa é verificar o comportamento dos esquemas numéricos propostos em escoamentos com corpos imersos. A seção é dividida em três itens de acordo com a geometria do corpo imerso (lado x/lado y): Razão = 1 (geometria quadrangular de lado igual a 1 m), Razão = 2 (geometria retangular 2 m x 1 m) e Razão = 0.5 (geometria retangular 1 m x 2 m). As características dos domínios computacionais são apresentadas na Figura 7.13. Já as condições iniciais e de contorno propostas, que vão ao encontro das utilizadas pelas referências, são observadas através da Tabela 7.3.

Tabela 7.3 Condições iniciais das simulações

CONDIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Velocidade x	1m/s na entrada do domínio, nula nas paredes do prisma e livre nas demais faces.
Velocidade y	Nula na entrada, nas paredes do prisma e paredes superior/inferior do domínio, livre nas demais faces.
Velocidade z	Nula em todos os nós da malha, por tratar-se de escoamentos bidimensionais.
Pressão	Nula na saída do domínio e livre nas demais faces.

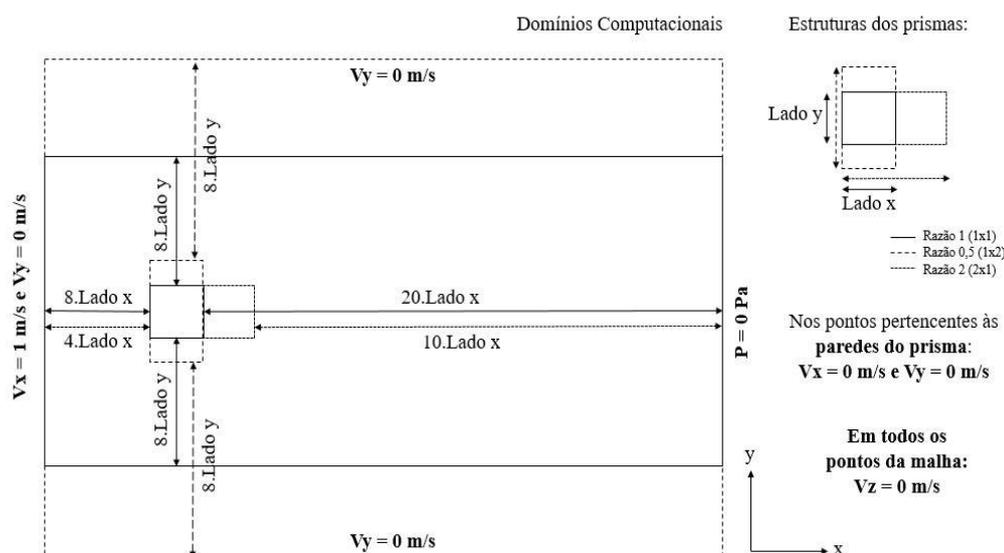


Figura 7.13 Domínio computacional e condições de contorno utilizados nas simulações dos prismas – presente trabalho

Para cada razão geométrica, três refinamentos de malhas foram propostos com a intenção de simular os escoamentos laminar e turbulento. Há diferenças entre as razões de prisma, conforme a variação do domínio apresentada anteriormente na Figura 7.13, mas a ordem de refinamento e o menor tamanho de elemento foram mantidos constantes. A Tabela 7.4 apresenta informações acerca dos três refinamentos propostos para as razões geométricas.

Tabela 7.4 Informações sobre os refinamentos de malhas propostos

Malha	Razão de Refinamento	Menor tamanho de elemento (m)	Caso Turbulento ( $Re10^5$ )
			y+
Refinamento 1	1,0	0,001	5,0099
Refinamento 2	1,25	0,0008	4,0081
Refinamento 3	1,5625	0,00064	3,00601

A Figura 7.14 demonstra o detalhe dos refinamentos nas paredes do prisma. Cabe destacar que a mesma lógica de construção foi utilizada para as razões 2 e 0,5.

As razões geométricas de valor 2 e 0,5 remetem a estruturas tais como os galpões industriais, vistos em planta, porque é comum encontrar essas relações entre os lados nessas construções.

Essas estão, em sua maioria, expostas a ventos incidentes de diversas direções. Portanto, conhecer e compreender as ações que influenciam no projeto dessas edificações é essencial.

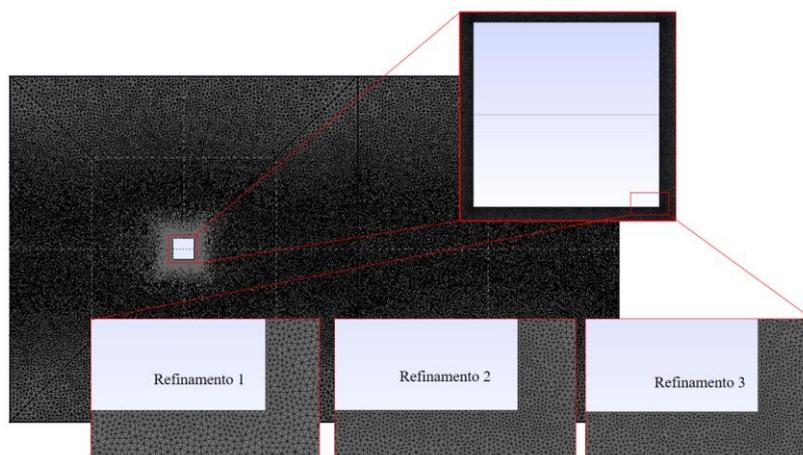


Figura 7.14 Detalhes de Refinamento das malhas propostas

A seguir serão apresentadas as malhas utilizadas, cujos casos são denominados conforme a Figura 7.15.

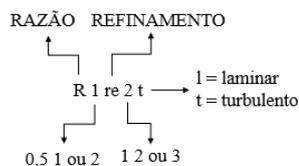


Figura 7.15 Denominação dos casos estudados

### 7.2.1 Razão $R = 1$

A primeira razão remete a um prisma em formato quadrangular. A seguir serão apresentados os resultados para as três razões de refinamento com malhas não estruturadas, cujas características da malha e constantes físicas e geométricas são observadas na Tabela 7.5 e na Tabela 7.6. A Tabela 7.7 abaixo apresenta os coeficientes de arrasto e sustentação, médios e rms, além da frequência de pico do espectro e o número de *Strouhal*  $S_i$ , calculados pela referência e pelas simulações realizadas neste trabalho. Estes valores foram determinados nos últimos 60 segundos de simulação, pois o escoamento já está bem desenvolvido para ambas malhas, conforme pode ser observado através dos históricos dos coeficientes (Figura 7.16).

Tabela 7.5 Número total de nós e elementos dos casos de prisma  $R = 1$

Caso	Número total de nós	Número total de elementos tetraédricos
R1re1l e R1re1t	129.396	385.200
R1re2l e R1re2t	193.542	576.906
R1re3l e R1re3t	332.553	992.256

Tabela 7.6 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento sobre o prisma de  $R = 1$

PARÂMETRO	Casos Laminares	Casos Turbulentos
Massa Específica ( $\rho$ )	1,00 Kg/m <sup>3</sup>	1,00 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )	4,0x10 <sup>-3</sup> Ns/m <sup>2</sup>	1,0x10 <sup>-5</sup> Ns/m <sup>2</sup>
Velocidade Característica – $V_\infty$ (entrada)	1,00 m/s	1,00 m/s
Constante de Smagorinsky ( $C_s$ )	-	0,15
Dimensão característica – $D$ (lado do prisma)	1,00 m	1,00 m
Tempo total de simulação (físico)	100 s	100 s
Número de Reynolds	250	100.000

Tabela 7.7 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com  $Re_{250}$  e prisma de  $R = 1$

PARÂMETRO	Islam et al. (2012)	R1re11	R1re21	R1re31
$C_D$ médio	1,580	1,639	1,620	1,615
$C_D$ rms	0,080	0,084	0,083	0,081
$C_L$ rms	0,750	0,821	0,756	0,751
$S_t$	0,145	0,158	0,145	0,149

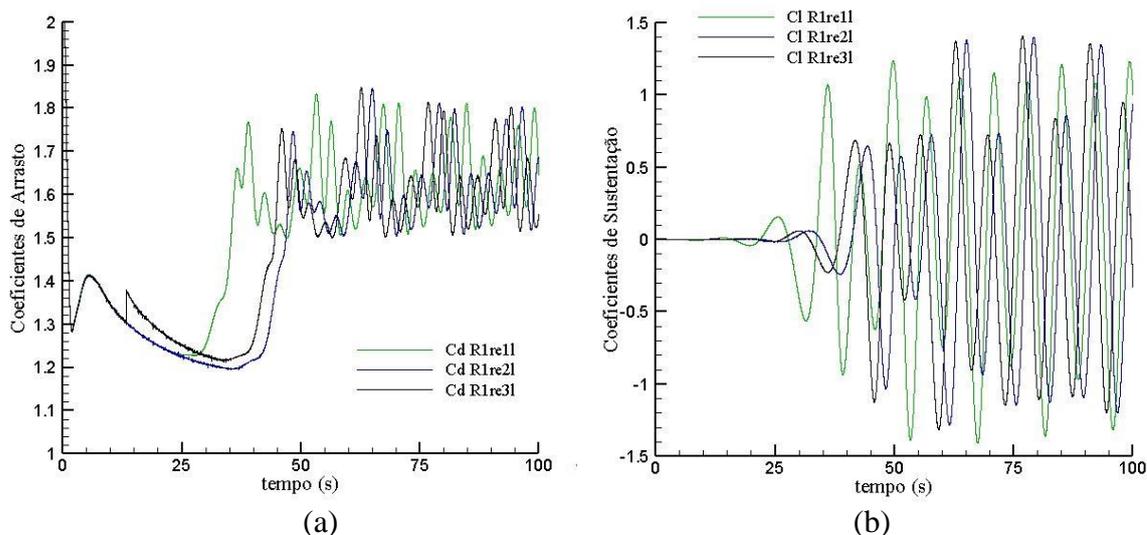


Figura 7.16 Históricos dos coeficientes aerodinâmicos (a) arrasto ( $C_D$ ) e (b) sustentação ( $C_L$ ) obtidos pelas duas malhas para o prisma com  $R = 1$  e  $Re_{250}$

A Figura 7.17 demonstra os campos da componente de vorticidade instantânea perpendicular ao plano de análise (direção  $Z$ ) medidos em instantes semelhantes de tempo (100 segundos).

Os campos se apresentam satisfatoriamente quando comparados com a referência, destacando-se ainda que, próximo ao corpo, o vórtice que apresenta um valor negativo, indica uma rotação no sentido horário, ao passo que um valor positivo indica a rotação no sentido anti-horário. A proximidade entre os resultados demonstra que as três malhas podem ser utilizadas para verificar os modelos numéricos para o caso laminar, no entanto, as duas mais refinadas

apresentam resultados ainda mais semelhantes, como pode ser visto pelos coeficientes aerodinâmicos.

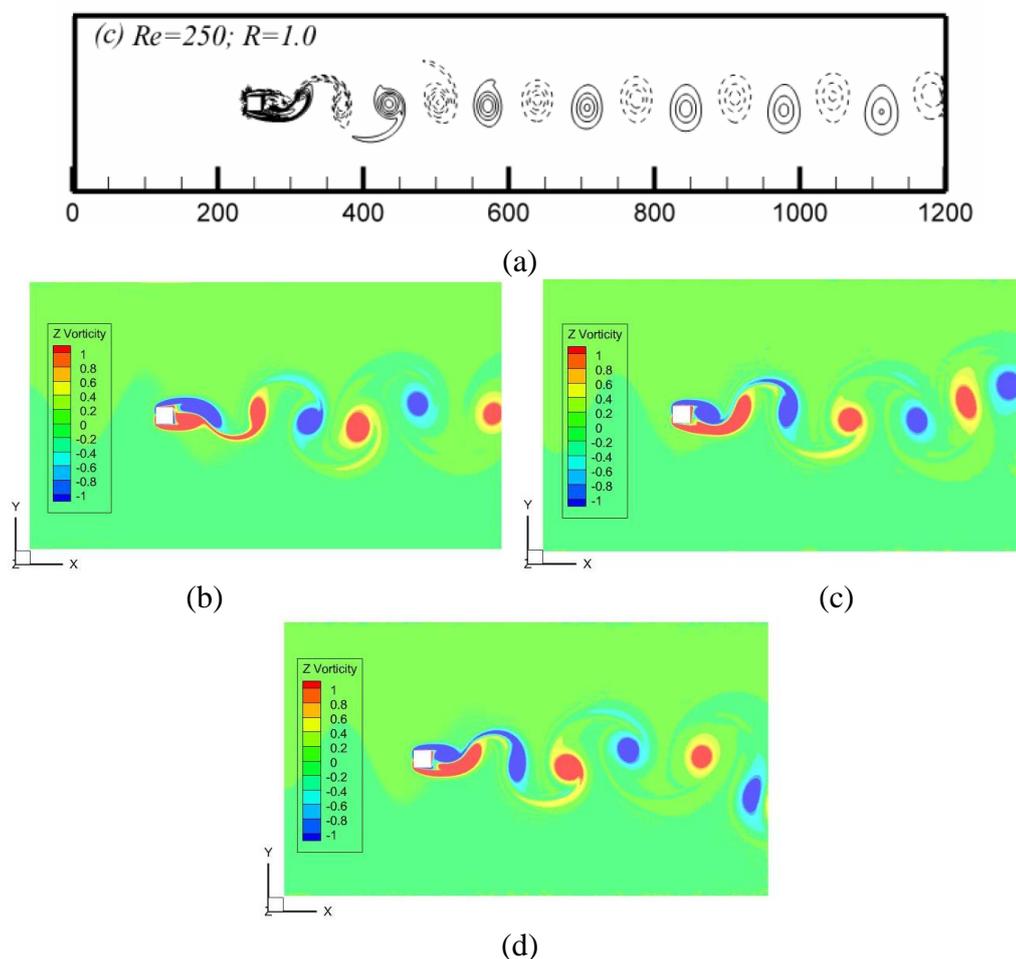


Figura 7.17 Distribuição de Vorticidade instantânea – (a) Islam et al. (2012) p. 1039; (b) R1re11; (c) R1re21; (d) R1re31;

A seguir são apresentados os resultados para o escoamento turbulento, cujo número de Reynolds é 100.000, simulado por este trabalho e por Yu e Kareem (1996). A Tabela 7.8 abaixo traz os coeficientes aerodinâmicos calculados a partir do tempo de 50 segundos, pois de acordo com a Figura 7.18, a qual apresenta os históricos, o escoamento já encontra-se desenvolvido.

Tabela 7.8 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com  $Re10^5$  e prisma de  $R = 1$

PARÂMETRO	Numérico LES (Yu e Kareem, 1996)	Experimental (Yu e Kareem, 1996)	R1re1t	R1re2t	R1re3t
$C_D$ médio	1,01	1,05	1,16	1,21	1,18
$C_D$ rms	0,21	0,22	0,25	0,23	0,22
$C_L$ rms	1,06	1,22	0,57	0,68	0,99
$S_t$	0,14	-	0,15	0,16	0,15

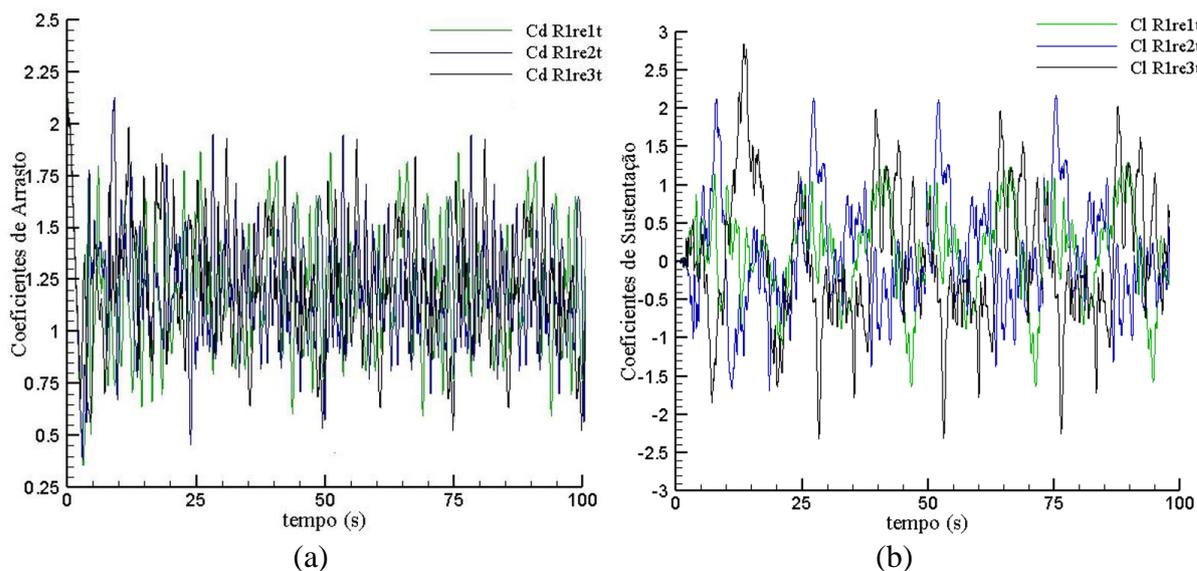


Figura 7.18 Registros de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ) e (b) sustentação ( $C_L$ ) - Prisma  $R = 1$  e  $Re10^5$

A Figura 7.19 mostra o perfil da componente  $V_x$  (direção X) da velocidade média ao longo de uma linha horizontal posicionada em  $Y = 0,0$  m desde a aresta lateral superior do prisma até a coordenada  $X = 7,0$  m, como apresentado no detalhe da figura. Observa-se que os refinamentos 2 e 3 apresentam soluções semelhantes e estão entre a solução da simulação numérica e experimental de Yu e Kareem (1996), já os resultados referentes ao primeiro refinamento divergem bastante dos resultados de referência, indicando que para o caso turbulento este tipo de malha não é suficiente. Esse fato pode ser evidenciado porque o elemento tetraédrico é rápido computacionalmente para processar as operações mas, apresenta deficiências na descrição de regiões com altos gradientes.

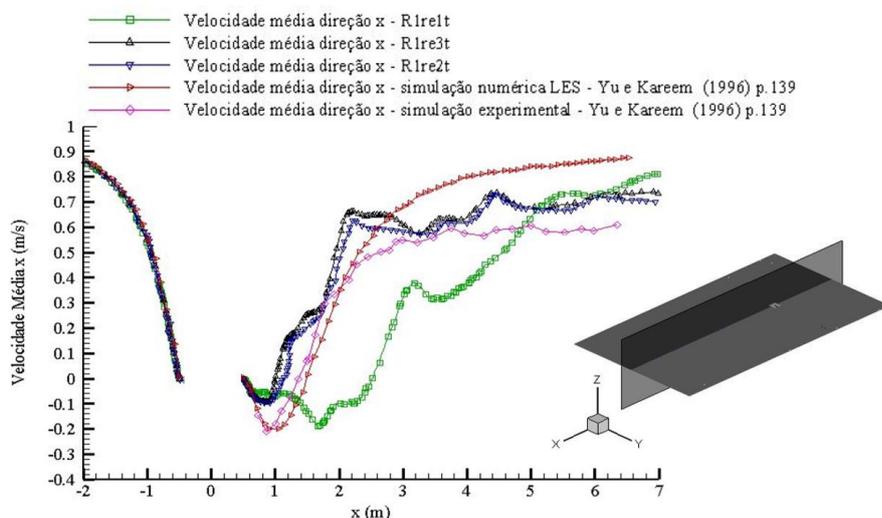


Figura 7.19 Comparação dos perfis de velocidade  $V_x$  média em  $Y = 0,0$  m para  $Re10^5$

Já na Figura 7.20 são comparados os coeficientes de pressão para o escoamento turbulento, onde é possível perceber, novamente, que as malhas com refinamento 2 e 3 estão em acordo com a referência, porém a primeira apresenta valores mais elevados. A explicação do porque isto ocorre deve-se provavelmente à quantidade de elementos presentes no entorno do prisma e o grau de refinamento da malha, visto que a constante de *Smagorinsky* utilizada para simular a turbulência com metodologia LES foi a mesma indicada por Yu e Kareem (1996) nos três modelos.

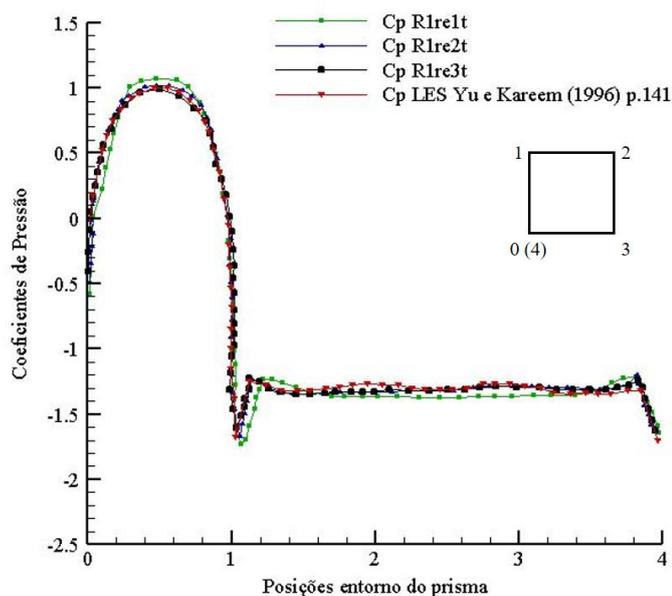
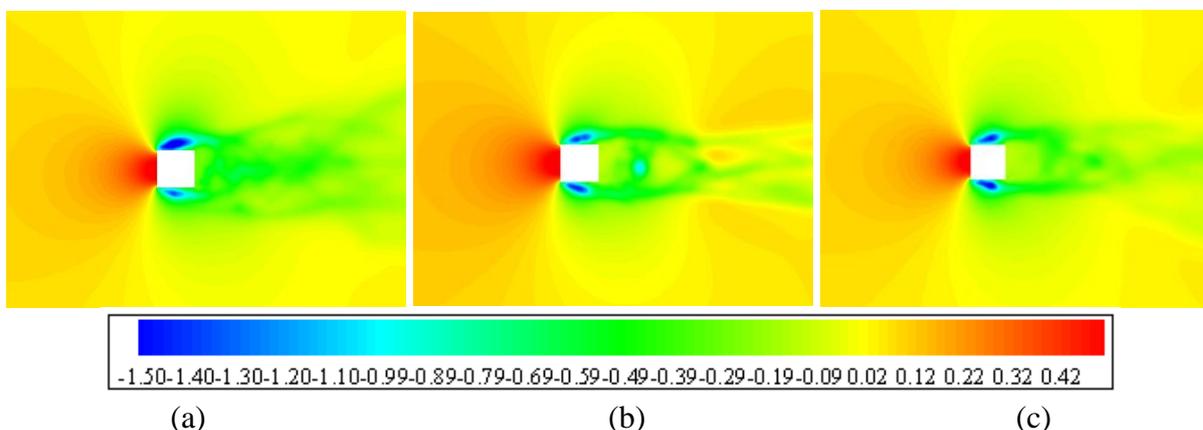


Figura 7.20 Coeficiente de pressão médio em torno do prisma  $R = 1$

A seguir os campos de pressão médios, determinados a partir de 60 segundos e totalizando 40 segundos de média, são expostos na Figura 7.21. Pode-se entender que uma malha mais refinada (c) gera um campo mais suave e simétrico, enquanto que os demais resultados (a e b) apresentam campos não simétricos e mais perturbados..



(a) (b) (c)  
 Figura 7.21 Campos de Pressão para escoamento turbulento – 100 níveis de -1,5 a 0,5: (a) R1re1t; (b) R1re2t; (c) R1re3t

## 7.2.2 Razão $R = 2$

A segunda razão analisada neste trabalho é a de valor  $R = 2$ , cujos lados do prisma são: 2 m na direção X e 1 m na direção Y. A Tabela 7.6 apresenta as constantes físicas e geométricas utilizadas para a simulação dos escoamentos laminar ( $Re_{250}$ ) e turbulento ( $Re_{10^5}$ ), iguais àquelas utilizadas no caso anterior. A Tabela 7.9 traz os números de nós e elementos das malhas para cada nível de refinamento empregado.

Tabela 7.9 Número total de nós e elementos para prisma  $R = 2$

Caso	Número total de nós	Número total de elementos tetraédricos
R2re1l e R2re1t	135476	402672
R2re2l e R2re2t	208396	620508
R2re3l e R2re3t	334808	998424

A Tabela 7.10 abaixo apresenta os coeficientes de arrasto e sustentação, médios e rms, além do número de Strouhal  $S_t$ , calculados pela referência e pelas simulações realizadas neste trabalho. Estes valores foram determinados nos últimos 60 (sessenta) segundos de simulação, pois o escoamento já está bem desenvolvido para ambas malhas, conforme pode ser observado através dos históricos dos coeficientes apresentados na Figura 7.22.

Tabela 7.10 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com  $Re_{250}$  e prisma de  $R = 2$

PARÂMETRO	Islam et al. (2012)	R2re1l	R2re2l	R2re3l
$C_D$ médio	1,300	1,308	1,300	1,295
$C_D$ rms	0,010	0,015	0,014	0,014
$C_L$ rms	0,32	0,357	0,354	0,347
$S_t$	0,155	0,192	0,174	0,161

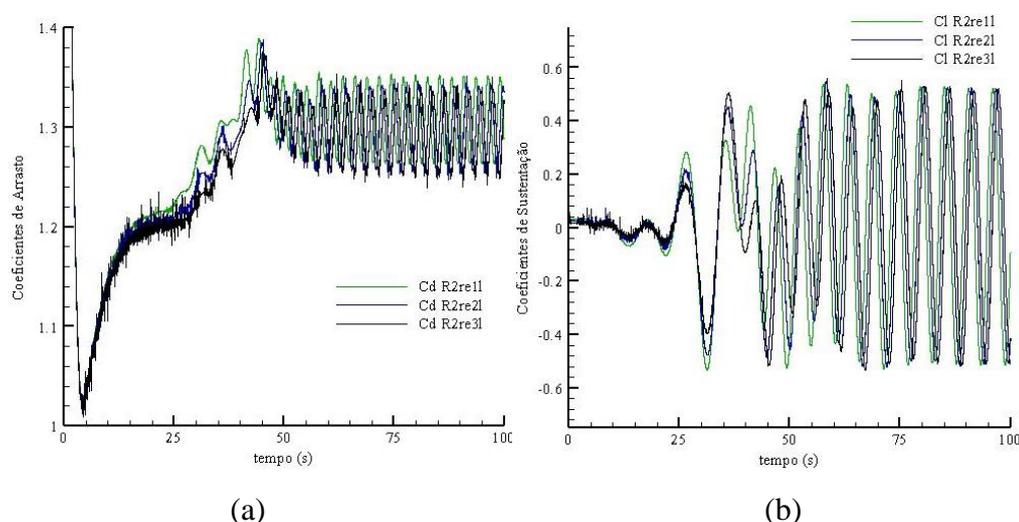


Figura 7.22 Históricos de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ); (b) sustentação ( $C_L$ ) para o Prisma com  $R = 2$  e  $Re_{250}$

A Figura 7.23 a seguir apresenta a componente na direção Z de vorticidade instantânea para Re250 no tempo de 100 segundos.

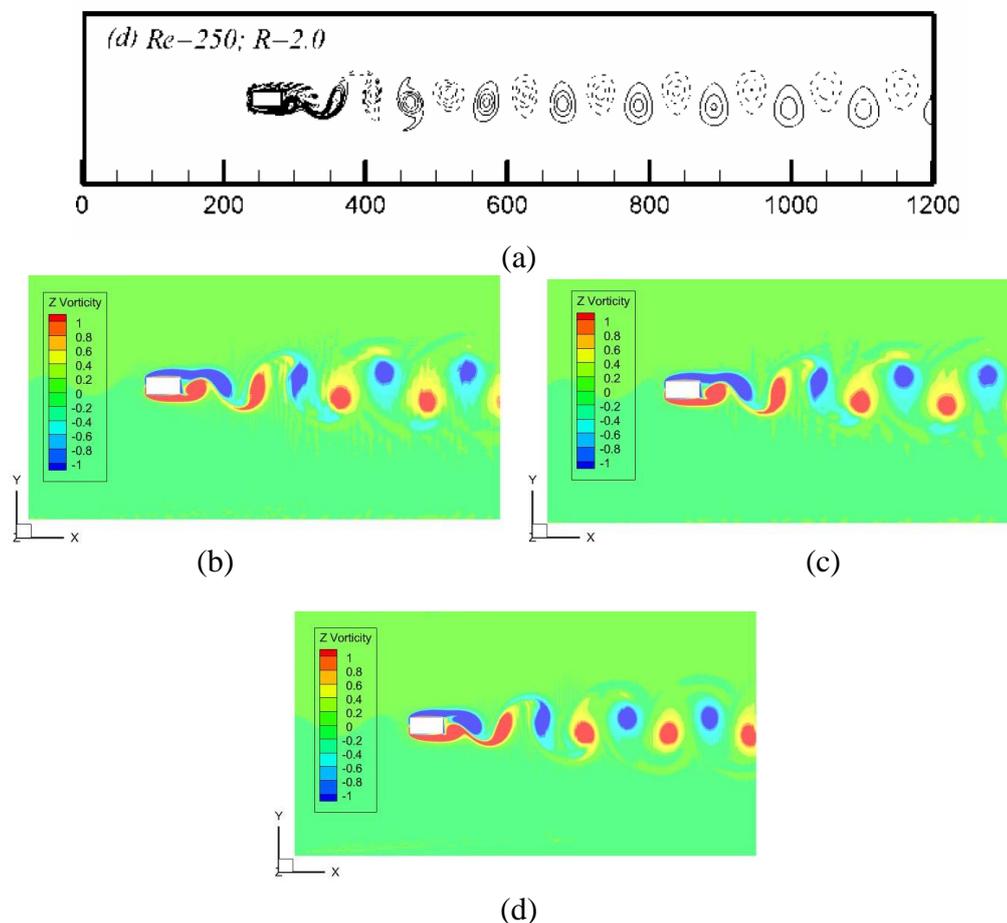


Figura 7.23 Vorticidade Z - prisma  $R = 2$  e  $Re250$ : (a) Islam et al. (2012) p.1039; (b) R2re11; (c) R2re21; (d) R2re31

Comparando com a referência, percebe-se que as estruturas do escoamento estão em acordo, apesar de Islam et al. (2012) apresentarem um maior domínio na esteira do corpo imerso. No entanto, as malhas com menor refinamento não apresentam o campo tão nítido quanto a com mais elementos, revelando que um maior refinamento é influente neste resultado.

A seguir são apresentados os resultados para o escoamento turbulento, cujo número de Reynolds é 100.000, simulado por este trabalho e por Yu e Kareem (1996). A Tabela 7.11 abaixo traz os coeficientes aerodinâmicos calculados a partir do tempo de 50 segundos, pois de acordo com a Figura 7.24, a qual apresenta os históricos, o escoamento já encontra-se desenvolvido desde este instante. Os campos médios foram determinadas a partir do tempo de 60, somando 40 segundos totais de amostragem.

Tabela 7.11 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com  $Re10^5$  e Prisma de  $R = 2$

PARÂMETRO	Numérico LES	Experimental	R2re1t	R2re2t	R2re3t
	(Yu e Kareem, 1996)	(Yu e Kareem, 1996)			
$C_D$ médio	1,162	1,16	1,22	1,156	1,146
$C_D$ rms	0,14	-	0,139	0,137	0,133
$C_L$ rms	-	-	0,606	0,568	0,400
$S_i$	0,18	0,08	0,24	0,20	0,19

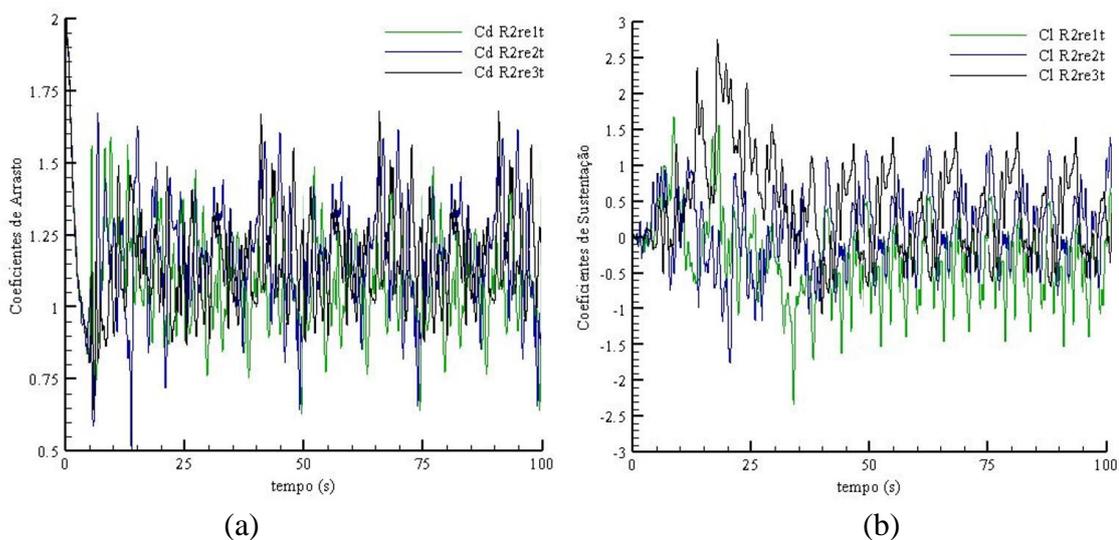


Figura 7.24 Históricos de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ); (b) sustentação ( $C_L$ ) para o prisma com  $R = 2$  e  $Re10^5$

O campo de pressão médio pode ser observado através da Figura 7.25, onde os pontos presentes no eixo  $x$  são relativos aos contornos do prisma. Neste caso, diferente do prisma com razão  $R = 1$ , as duas malhas menos refinadas divergem da solução real, indicando problema de refinamento. Já a terceira malha, mais refinada, apresenta resultado igual à solução da referência.

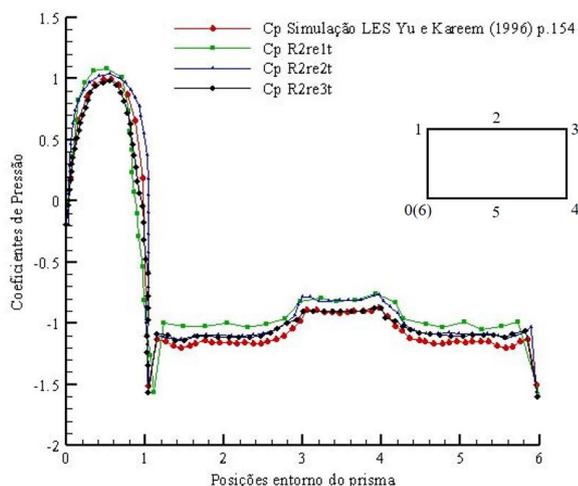


Figura 7.25 Coeficiente de Pressão médio ao longo da superfície do prisma  $R = 2$  e  $Re10^5$

### 7.2.3 Razão $R = 0,5$

A última razão geométrica de prisma analisada foi a de  $R = 0,5$ , apenas para o escoamento laminar com número de Reynolds igual a 250, visto que este caso não foi estudado por Yu e Kareem (1996) (referência do escoamento turbulento). A Tabela 7.12 traz os valores adotados para as constantes físicas e geométricas do problema, já a Tabela 7.13 apresenta o número total de nós e elementos das malhas empregadas.

Tabela 7.12 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento com RE250 e prisma de  $R = 0,5$

PARÂMETRO	VALORES
Massa Específica ( $\rho$ )	1,00 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )	4,0x10 <sup>-3</sup> Ns/m <sup>2</sup>
Velocidade Característica – $V_\infty$ (entrada)	1,00 m/s
Dimensão característica – $D$ (lado do prisma)	1,00 m
Número de Reynolds	250

Tabela 7.13 Número total de nós e elementos para prisma  $R = 0,5$

Caso	Número total de nós	Número total de elementos tetraédricos
R05re1	253.048	754.560
R05re2	330.264	985.752
R05re3	555.261	1.658.880

A Figura 7.26 apresenta os históricos dos coeficientes aerodinâmicos resultantes desta simulação. A partir do tempo 60 segundos calculam-se os coeficientes médios e rms (apresentados na Tabela 7.14), bem como os campos médios, visto que é a partir deste instante que o escoamento se encontra bem desenvolvido.

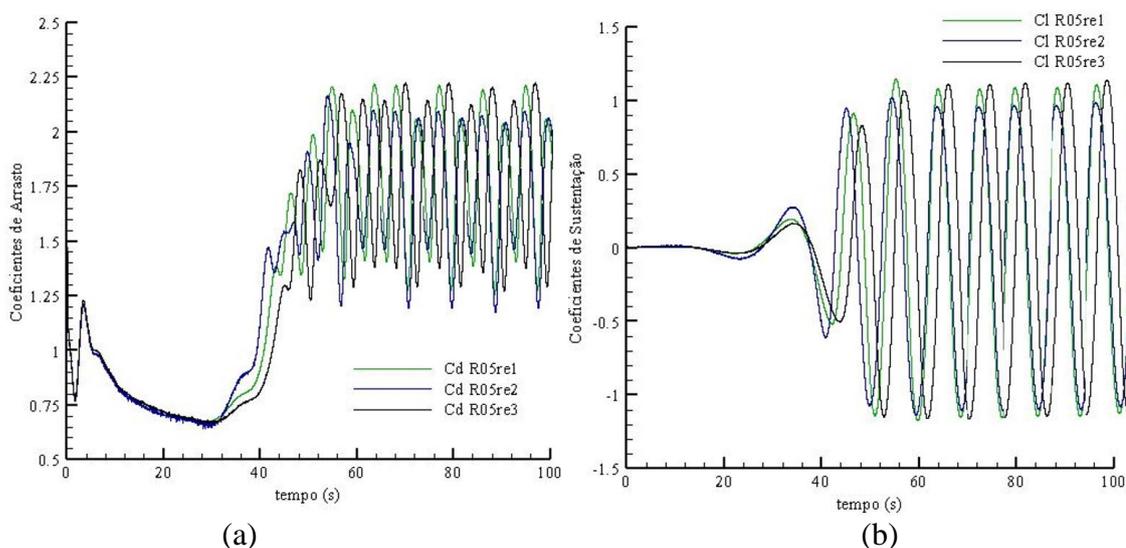
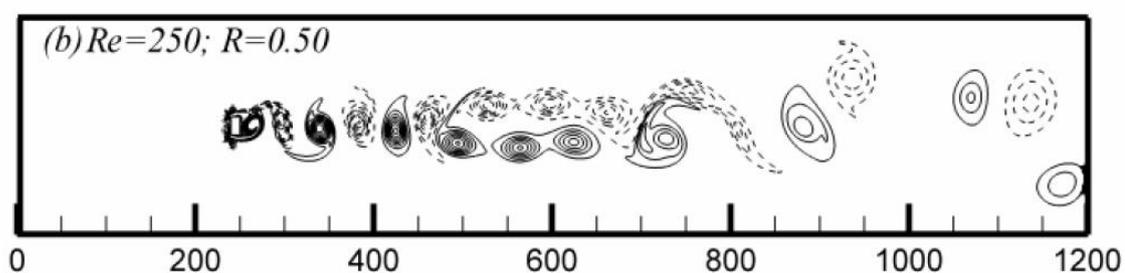


Figura 7.26 Históricos de coeficientes de (a) arrasto ( $C_D$ ); (b) sustentação ( $C_L$ ) para o prisma com  $R = 0,5$  e RE250

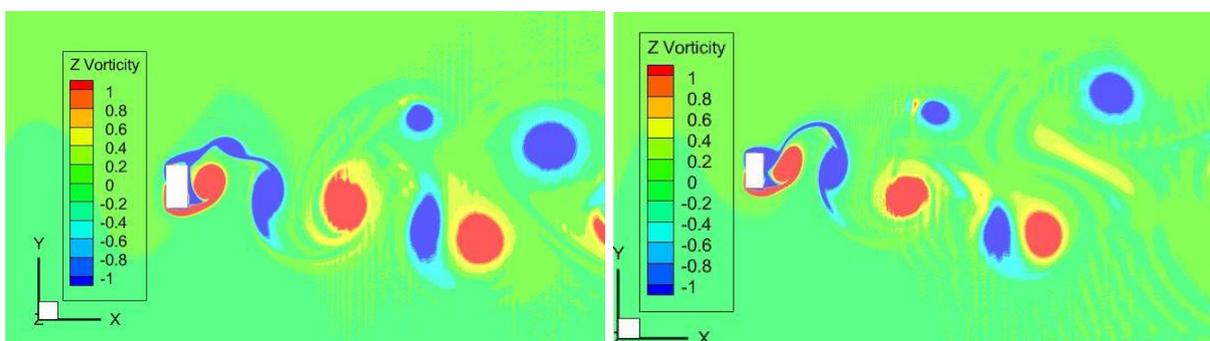
Tabela 7.14 Resultados dos coeficientes aerodinâmicos na análise do escoamento com  $Re_{250}$  e Prisma de  $R = 0,5$

PARÂMETRO	Islam et al. (2012)	R2re1l	R2re2l	R2re3l
$C_D$ médio	2,1	1,809	1,712	1,834
$C_D$ rms	0,19	0,285	0,278	0,288
$C_L$ rms	0,8	0,823	0,738	0,837
$S_t$	0,200	0,232	0,222	0,220

A Figura 7.27 apresenta os campos da componente Z da vorticidade obtidos por Islam et al. (2012) e por esta simulação para os três níveis de refinamento propostos. Neste caso, a malha mais refinada também reproduz melhor o campo de vorticidade da referência.

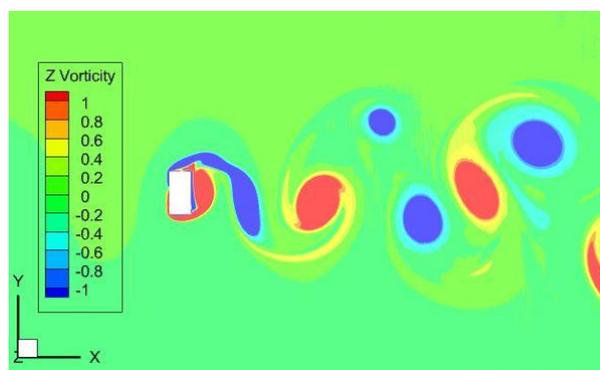


(a)



(b)

(c)



(d)

Figura 7.27 Vorticidade Z prisma  $R = 2$  e  $Re_{250}$ : (a) Islam et al. (2012) p.1039; (b) R05re1; (c) R05re2; (d) R05re3

Percebe-se que as análises dos prismas retangulares e cavidades bi e tridimensionais apresentam soluções satisfatórias e boas concordâncias para verificação do código implementado, indicando que exemplos mais complexos podem ser simulados tanto no plano quanto em análises 3D.

### 7.3 ESCOAMENTOS COM VENTILAÇÃO – CASO BIDIMENSIONAL

Um projeto que vise à ventilação natural impulsionada pelo vento tem como a forma mais eficiente a ventilação cruzada, visto que é a configuração mais representativa (Zhong et al., 2018). No entanto, em grandes cidades, com uma grande densidade de construções e espaços internos reduzidos, por vezes, projetos eficientes de ventilação cruzada são precários. Com o intuito de sancionar essa deficiência, os projetos de ventilação unilateral apresentam-se como uma alternativa aceitável (Zhong et al., 2018).

Este subcapítulo é dividido em duas etapas: a primeira se destina a analisar um caso de ventilação unilateral no plano bidimensional, estudado por Zhong et al. (2018), e apresentar as características do escoamento geradas por essa estratégia de ventilação; a segunda consiste em determinar os campos e a influência do tamanho das aberturas na ventilação cruzada no plano bidimensional, apresentadas anteriormente por Ayad (1999).

#### 7.3.1 Ventilação Unilateral

O escoamento de vento é assumido neste caso como isotérmico e incompressível, estando em regime turbulento. As demais características da malha, domínio e condições de contorno são apresentadas na Figura 7.28, enquanto que as características físicas e geométricas estão presentes na Tabela 7.15. O domínio computacional discretizado em elementos tetraédricos possui 314.174 nós 936.960 elementos, cuja menor dimensão está entorno de  $1,4 \times 10^{-5}$  m, gerando um fator  $y^+$  próximo a 4.968. Cerca de 100 segundos físicos foram simulados.

Tabela 7.15 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento turbulento na ventilação unilateral

PARÂMETRO	VALORES
Massa Específica ( $\rho$ )	1,00 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )	$1,0 \times 10^{-6}$ Ns/m <sup>2</sup>
Velocidade característica – $V_\infty$ (entrada)	10,00 m/s
Dimensão característica – $D$	1,25 m
Constante de Smagorisky ( $C_s$ )	0,1
Número de Reynolds	$1,25 \times 10^7$

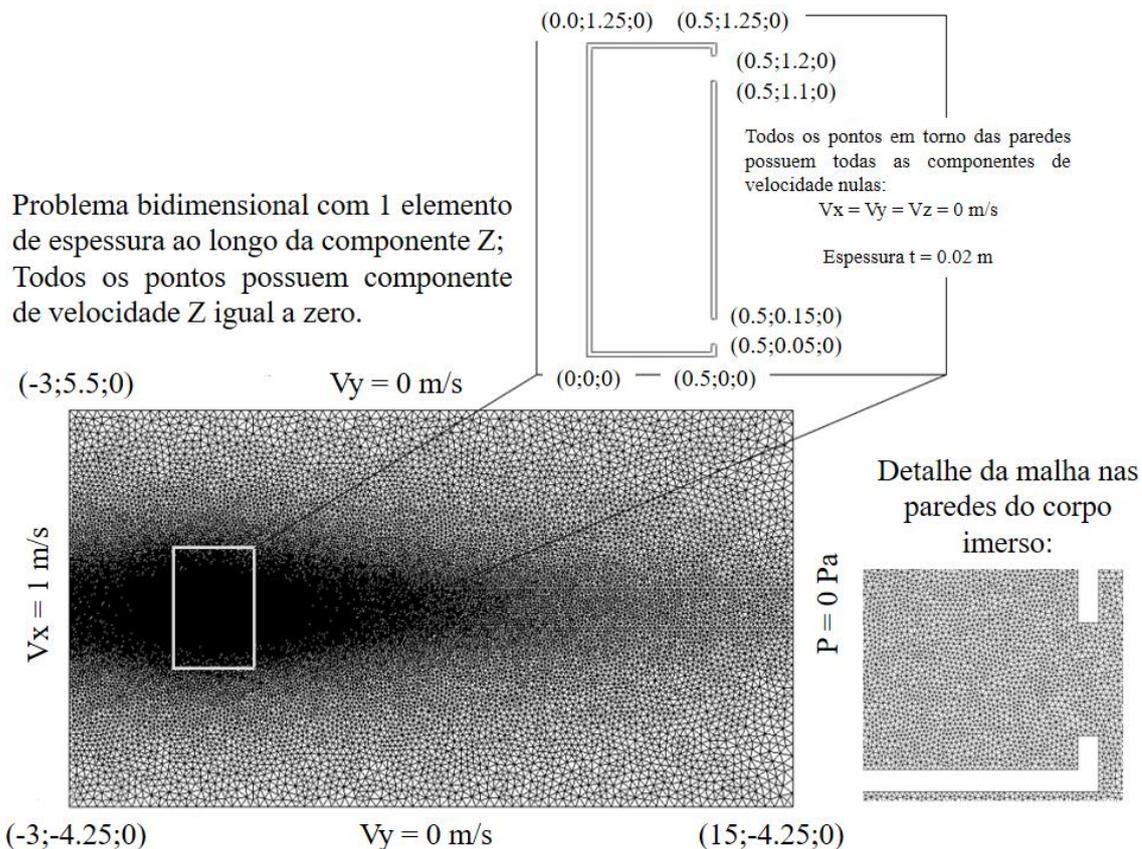


Figura 7.28 Malha utilizada e condições de contorno propostas - Ventilação Unilateral

Para a determinação da vazão de ar interna as seguintes equações são utilizadas:

$$Q' = \frac{Q}{A_{ref} V_{\infty}} \quad (7.2)$$

$$A_{ref} = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{(A_1^2 + A_2^2)}} \quad (7.3)$$

onde  $Q'$  é a vazão única de ventilação, definida pela razão entre a vazão de ventilação  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e o produto da área de referência ou efetiva  $A_{ref}$  ( $\text{m}^2$ ) (Equação 7.3), e  $V_{\infty}$  ( $\text{m/s}$ ) a velocidade de referência. Já os valores de  $A_1$  e  $A_2$  remetem às áreas das duas aberturas existentes no modelo. A vazão de ventilação  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) foi determinada a partir da formulação proposta pela NBR 6123:1988, apresentadas no Capítulo 3 deste trabalho, onde a velocidade de entrada é obtida por meio de medições nas aberturas da edificação nos campos de velocidade média derivados deste presente estudo. Destaca-se que a formulação da norma brasileira é para a determinação

da vazão quando a edificação está sujeita a velocidades altas, mas com a adaptação realizada foi possível obter valores para a comparação com a referência.

A partir do tempo de 75 segundos, os campos médios de pressão e velocidade foram determinados, somando 25 segundos de tempo total de amostragem. A Tabela 7.16 demonstra alguns resultados apresentados por Zhong et al. (2018) referentes a frequências de desprendimento de vórtices e vazão de ventilação, comparados aos determinados neste trabalho a partir do tempo de 50 segundos.

Tabela 7.16 Comparação entre os resultados - Ventilação Unilateral

PARÂMETRO	Zhong et al. 2018	PRESENTE TRABALHO
$Q'$ (m <sup>3</sup> /s)	0,490	0,489
St	0,133	0,125

A comparação dos perfis de velocidade média na direção X, determinados para os posicionamentos  $X = 0,25$  m e  $X = 0,75$  m (conforme o detalhamento presente na Figura 7.29 calculados por este trabalho e por Zhong et al. (2018) são apresentados na Figura 7.30. Ressalta-se que os gráficos são apresentados desde a linha média do interior do modelo de edificação (em  $Y = 0,75$  m) até  $Y = 5$  m (final do domínio) (ver Figura 7.28).

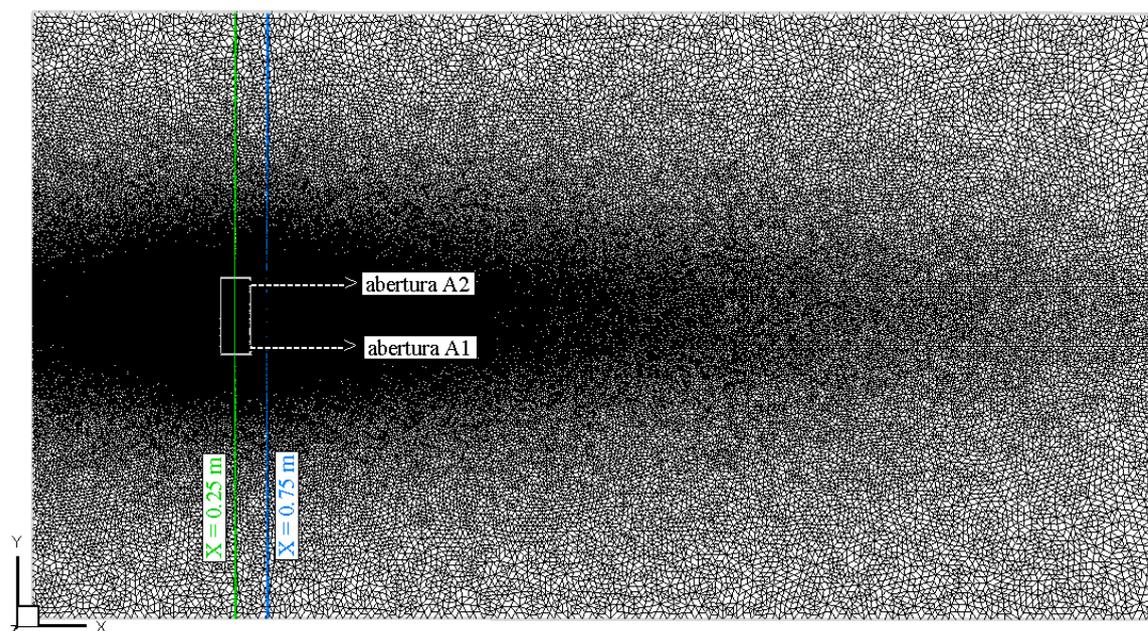


Figura 7.29 Detalhamento para a determinação dos perfis de velocidade

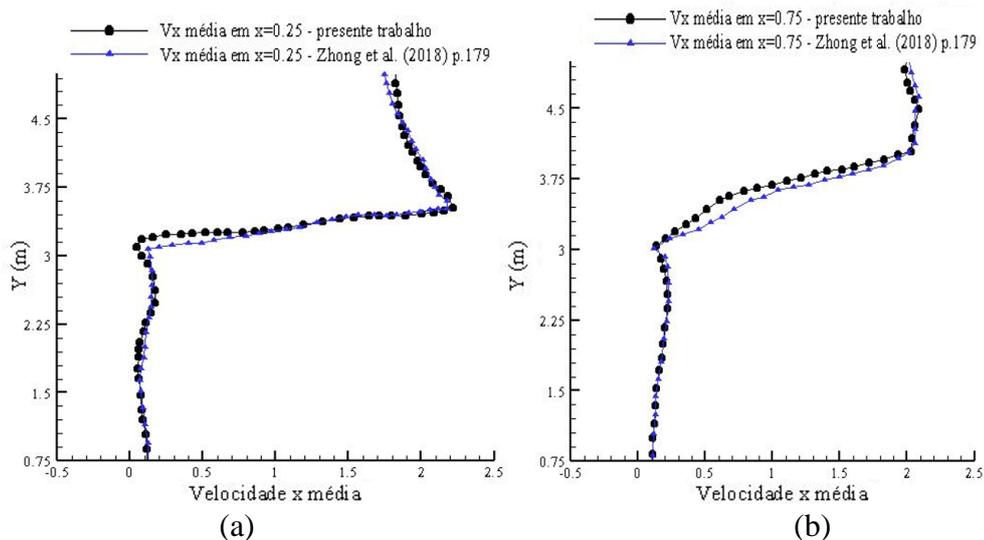


Figura 7.30 Perfis de Velocidades em (a)  $X = 2,5$  m e (b)  $X = 7,5$  m

A Figura 7.31 na sequência mostra os campos relativos a pressão média com linhas de corrente e velocidade média na direção X, obtidos por este trabalho nos últimos 25 segundos de simulação. Nota-se que o tempo de simulação é menor do que o apresentado por Zhong et al. (2018), no entanto o campo já encontra-se desenvolvido e é possível determinar os parâmetros, os quais estão bastante próximos aos dos autores.

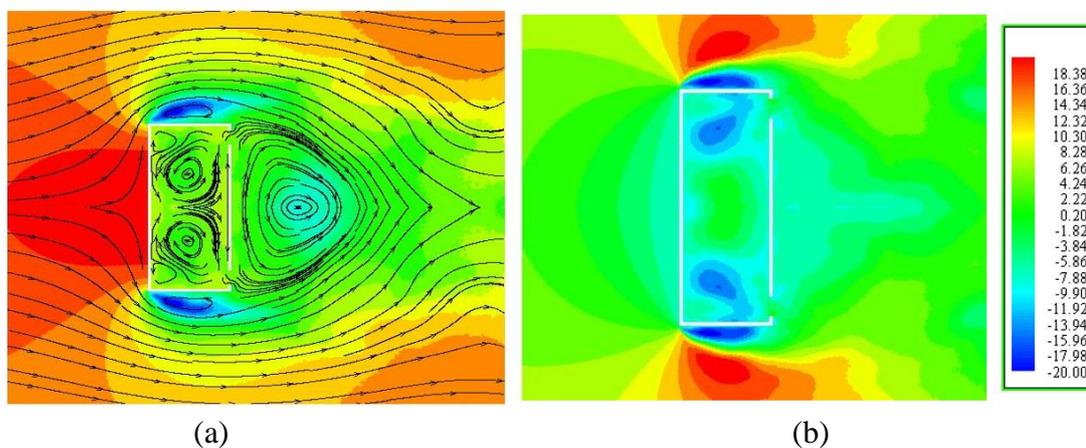


Figura 7.31 Resultados obtidos – 100 níveis de -20 a 20 para (a) campo médio de pressão com linhas de corrente; (b) campo da velocidade média na direção do escoamento

Analisando os coeficientes obtidos entende-se que esta forma de ventilação é eficiente. No entanto, deve-se atentar ao fato de que no interior da edificação não há objetos ou repartições, algo que normalmente encontramos em construções, sejam industriais, rurais ou residenciais. Uma nova análise deve ser realizada, sempre que possível, considerando a disposição desses elementos internos, para depois avaliar o desempenho quanto a ventilação natural. Apesar de

se tratar de um edifício baixo, as configurações de aberturas propostas (na face de sotavento), remetem a um carregamento satisfatório, onde não há a possibilidade de severos acidentes, tendo em vista a distribuição de pressão interna. Contudo, é difícil estabelecer que o vento sempre incidirá nesta face, podendo ocorrer a incidência direta sobre as aberturas, configurando uma situação ruim ao carregamento, já que a sobrepressão se transmitiria ao interior. Assim, ao projetar a ventilação de uma edificação é necessário avaliar esses parâmetros com o intuito de prevenir os possíveis carregamentos nocivos na estrutura. Além disso, deve-se ter em mente que o ideal é estabelecer aberturas em diferentes faces da edificação, a fim de não prejudicar a vida útil da mesma.

### 7.3.2 Ventilação Cruzada

Na sequência serão estudados três casos de ventilação cruzada sujeitos a ventos turbulentos com  $Re_{10.000}$ , de camada limite atmosférica, todos simulados por Ayad (1999). Os três casos simulados diferem entre si apenas pelo posicionamento e dimensão das aberturas, como mostrado na Figura 7.32. O primeiro caso (I) consiste no método clássico de ventilação cruzada: aberturas de dimensões iguais em paredes opostas, o segundo (II) traz o mesmo formato, no entanto a dimensão de abertura de saída é o dobro da de entrada (como discutido anteriormente, esse caso deveria ser analisado porque é capaz de promover uma circulação do ar interno com maior facilidade), já o terceiro caso (III) apresenta aberturas em paredes adjacentes e seu estudo é de grande relevância, pois quando a ventilação cruzada é promovida em edificações, essa é a configuração mais usual.

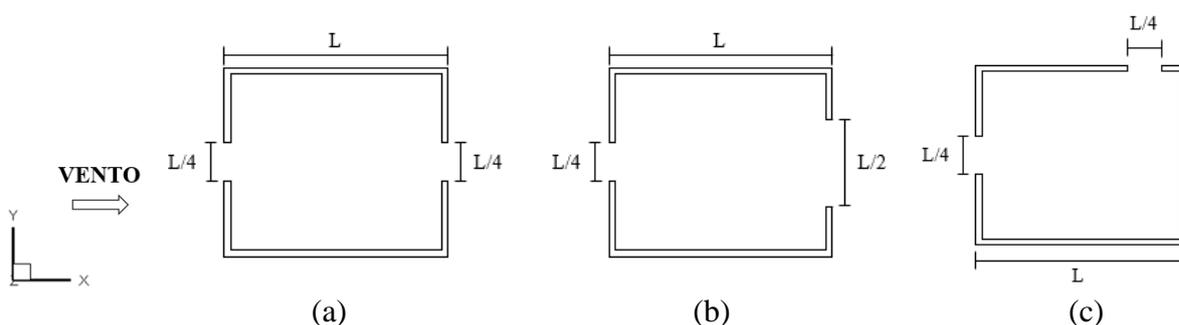


Figura 7.32 Aberturas e dimensões analisadas, ventilação cruzada: (a) caso I; (b) caso II; (c) caso III

A Figura 7.33 apresenta as condições de contorno e iniciais, além do domínio computacional do problema de estudo, variando apenas a geometria do corpo para cada caso. Já a Tabela 7.17 traz as constantes físicas e geométricas utilizadas na análise e simulação dos casos de ventilação cruzada.

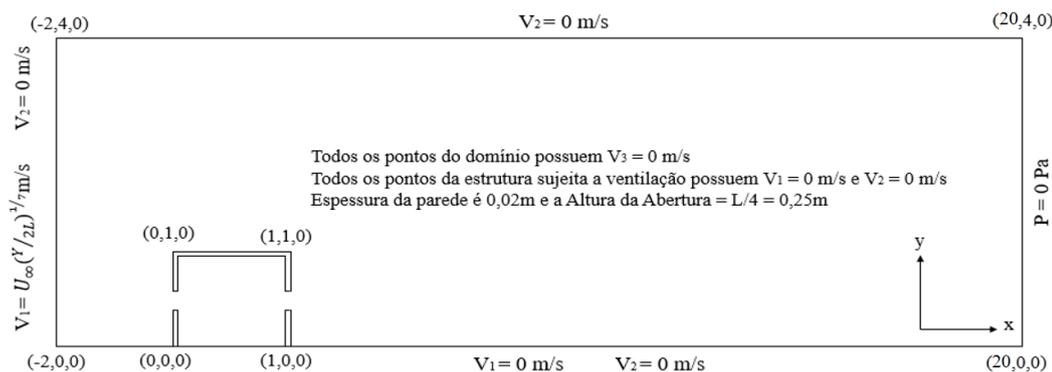


Figura 7.33 Geometria proposta e condições de contorno – ventilação cruzada

Tabela 7.17 Constantes físicas e geométricas utilizadas na análise do escoamento turbulento na ventilação cruzada

PARÂMETRO	VALORES
Massa Específica ( $\rho$ )	1,00 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )	1,0x10 <sup>-4</sup> Ns/m <sup>2</sup>
Velocidade Característica – $V_\infty$ (entrada)	1,00 m/s
Dimensão característica – $D$	1,0 m
Constante de Samagorisky ( $C_s$ )	0,15
Tempo total de simulação (físico)	120 s
Número de Reynolds	1,0 x 10 <sup>4</sup>

Os casos apresentam diferentes malhas de elementos tetraédricos, sendo que o primeiro possui 478.372 nós e 1.427.232 elementos, o segundo tem 433.282 nós e 1.292.184 elementos, ao passo que o terceiro chega a 552.917 nós e 1.650.873 elementos. Deve-se observar que essa variação ocorre conforme a demanda de elementos a fim de se reproduzir os escoamentos de forma satisfatória. O caso (III) apresenta uma abertura na entrada e outra no topo, provocando um escoamento mais complexo e, por isso, exigindo um maior grau de refinamento nessa região, quando comparado aos casos anteriores. Os menores elementos encontrados estão na ordem de  $5 \times 10^{-3}$  m para os três casos, sendo observados no interior do modelo de edificação analisado e na região de esteira, garantindo um fator  $y_+$  de aproximadamente 2,9528.

A velocidade na face de entrada do domínio segue a lei potencial, mostrada na sequência, como indica Ayad (1999):

$$U(z) = U_\infty \left( \frac{z}{2L} \right)^{1/7} \quad (7.4)$$

onde  $V_\infty$  corresponde à velocidade de referência, de valor igual a 1 m/s,  $Z$  é a cota do nó em relação à altura, determinada nesta simulação pelo eixo  $Y$ , e  $L$  remete à dimensão característica.

Os casos são comparados com as simulações realizadas por Ayad (1999) através das linhas de corrente no interior (Figura 7.34, Figura 7.35 e Figura 7.36).

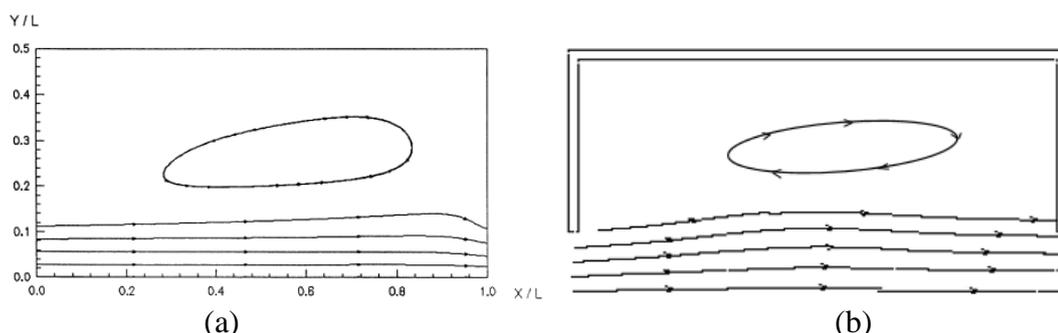


Figura 7.34 Linhas de corrente - caso (I): (a) Ayad (1999) p. 58; (b) presente trabalho

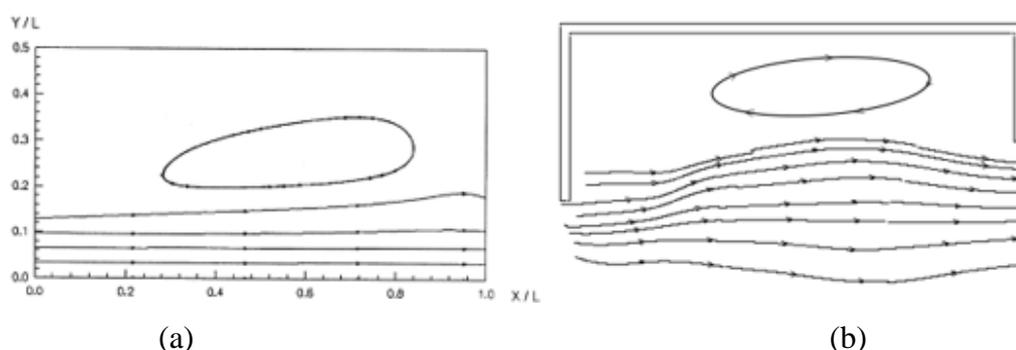


Figura 7.35 Linhas de corrente, caso (II): (a) Ayad (1999) p. 59; (b) presente trabalho

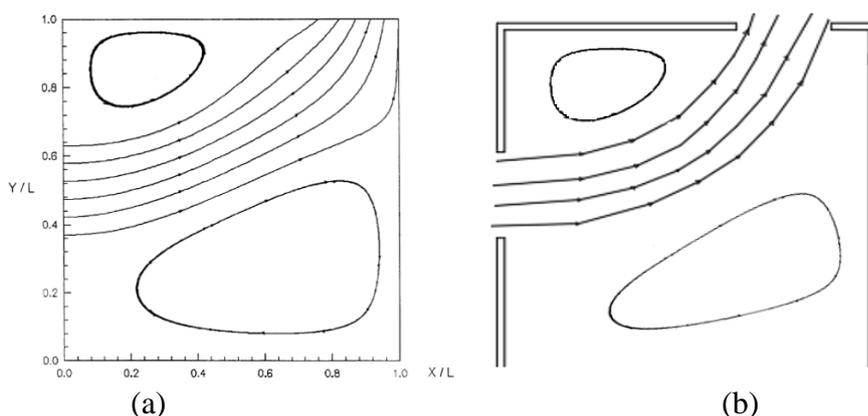


Figura 7.36 Linhas de corrente, caso (III): (a) Ayad (1999) p. 61; (b) presente trabalho

Os campos da componente Z de vorticidade instantânea para o tempo de 120 segundos são mostrados na sequência para os três casos (Figura 7.37). Como se pode perceber através da intensidade dos vórtices no interior dos modelos, aberturas que promovem a ventilação cruzada em paredes opostas das edificações são mais adequadas. Ainda, o caso (II) apresenta-se como

o método mais eficiente quanto a circulação, visto que as aberturas de saída maiores que as de entrada promovem uma melhor distribuição da velocidade internamente. O caso (III), com abertura em paredes adjacentes, também se apresentou como um método favorável de ventilação cruzada, apesar de ter sido menos eficaz, o que pode ser percebido pelos vórtices menos intensos no interior do modelo.

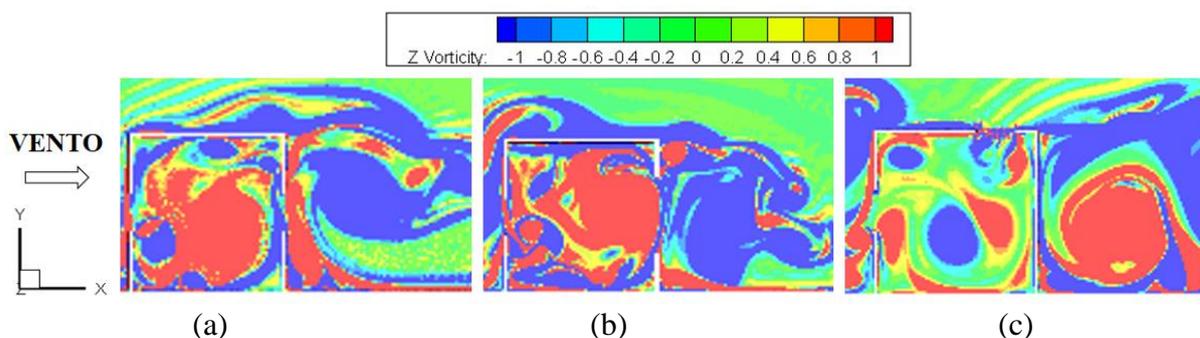


Figura 7.37 Campos de vorticidade instantânea: (a) caso (I), aberturas iguais e opostas; (b) caso (II), aberturas diferentes e opostas; (c) caso (III) aberturas em paredes adjacentes

A vazão de ventilação ( $Q$ ), determinada em  $\text{m}^3/\text{s}$ , foi calculada de acordo com a formulação presente no anexo D da NBR6123:1988, conforme apresentado no Capítulo 3 deste trabalho. Os valores referentes a diferença de pressão nas arestas das aberturas foram determinados através dos campos de pressão médios desta simulação. Os resultados para as três configurações são apresentados na Tabela 7.18, que evidencia a potencialidade superior do caso (II) em relação a ventilação. Assim, para um projeto eficaz de ventilação natural deve-se priorizar esse tipo de configuração: abertura a sotavento maior que a de entrada (na face de barlavento), garantindo um escoamento mais satisfatório com maior abrangência de áreas internas ventiladas.

Tabela 7.18 Taxas de ventilação para os casos (I), (II) e (III)

PARÂMETRO	CASO (I)	CASO (II)	CASO(III)
Vazão de ventilação média $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0,0815	0,0877	0,0580
Área efetiva de entrada ( $\text{m}^2$ )	0,177	0,177	0,177
Raiz da variação do coeficiente de pressão nas aberturas ( $\sqrt{2 \Delta P_e - \Delta P_i /\rho}$ )	0,6164	0,6633	0,4387

Pela determinação da vazão de ar no interior das residências é possível prever se a forma proposta de ventilação natural foi elaborada corretamente, isso porque, como visto anteriormente, a taxa mínima exigida por habitante é de  $0,01\text{m}^3/\text{s}$  (AIVC, 1996). Essa relação garante a correta troca de ar, eliminando poluentes e possíveis contaminantes, além de colaborar com o conforto térmico interno. Observando as vazões calculadas para cada um dos casos,

percebe-se que é possível a presença de 8 pessoas no modelo (I) e no modelo (II) e 5 no (III), evidenciando que a ventilação natural em paredes adjacentes é menos eficiente quando comparada à ventilação cruzada de paredes opostas para vento incidindo a  $0^\circ$  na edificação. Para garantia deste valor, simulações experimentais em túneis de vento ou numéricas são capazes de demonstrar o melhor posicionamento das aberturas, bem como as relações entre as áreas, obtendo o sistema mais eficiente e adequado para cada edificação, de acordo com diferentes direções de incidência do vento (normal, paralela, oblíqua). Reitera-se que nesses casos também não foram utilizados objetos ou repartições internas, indicando que esses índices podem sofrer alterações.

#### 7.4 ANÁLISE DE ESCOAMENTO SOBRE GALPÃO INDUSTRIAL – MODELO BIDIMENSIONAL

Esta seção trata da análise do escoamento de vento sobre um modelo bidimensional de galpão industrial ensaiado experimentalmente em túnel de vento por Loredou-Souza (1992). Nestas análises, o escoamento é tratado como sendo isotérmico e sem transporte de massa, estando em regime turbulento. Estes primeiros exemplos são simulados inicialmente no plano bidimensional, com um corte longitudinal (vista em planta), a fim de obter-se uma primeira aproximação para o padrão de escoamento ao redor e no interior da edificação. Através do ajuste da constante de *Smagorinsky* espera-se obter resultados similares aos obtidos experimentalmente com as análises em modelo tridimensional. Foram testados dois valores para a constante de *Smagorinsky*  $C_S$ : 0,1 e 0,15, sendo que o melhor resultado foi obtido considerando-se  $C_S = 0,1$ .

Estes exemplos são importantes para se entender como as cargas devidas ao vento afetam as estruturas, especialmente quando este é turbulento. Ao todo, setenta e nove casos foram simulados por Loredou-Souza (1992), sendo que para este trabalho foram selecionados os dez casos cujas aberturas apresentam formatos de “portões” e cujos resultados apresentam as piores combinações de ações nas estruturas, além de dois casos extra propostos, somando 12 exemplos simulados numericamente. Serão analisadas e comparadas as pressões internas resultantes dos ensaios experimentais, numéricos e determinadas conforme a NBR6123:1988. Destaca-se que a análise das pressões é realizada através do coeficiente de pressão interna, o qual, devido às superfícies planas, é igual ao coeficiente de forma interno ( $C_i$ ) (ver Capítulo 2). As características físicas e geométricas usadas neste exemplo são apresentadas na Tabela 7.19.

Tabela 7.19 Constantes físicas e geométricas para análise do escoamento turbulento com galpões imersos

PARÂMETRO	VALORES
Massa Específica ( $\rho$ )	1,2249 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )	1,3124x10 <sup>-4</sup> Ns/m <sup>2</sup>
Velocidade Característica $-V_\infty$ (entrada)	30,00 m/s
Dimensão característica $-D$	0,50 m (0°) 1,0 m (90°)
Constante de Samagorisky ( $C_s$ )	0,1
Tempo total de simulação (físico)	100 s
Número de Reynolds	1,4 x 10 <sup>5</sup>

Na Figura 7.38 será apresentado o detalhamento das malhas utilizadas para as simulações, bem como as condições de contorno consideradas. As direções de incidência do vento utilizadas na análise são 0° (ou 180°) e 90°. Quando o vento de 90° é simulado, o domínio computacional ao longo do eixo Y estende-se desde - 6,0 m até 7,0 m e a estrutura do galpão é rotada em 90° no sentido horário. O detalhamento apresentado abaixo é válido para todas as configurações, contudo, dependendo do caso, haverá ou não a presença de aberturas, identificadas através das letras A, B, C, D, E e F. As malhas foram construídas igualmente, mantendo o tamanho do menor elemento constante e igual a  $3,0 \times 10^{-4}$  m para que o fator  $y^+$  estivesse em torno de 4,10868.

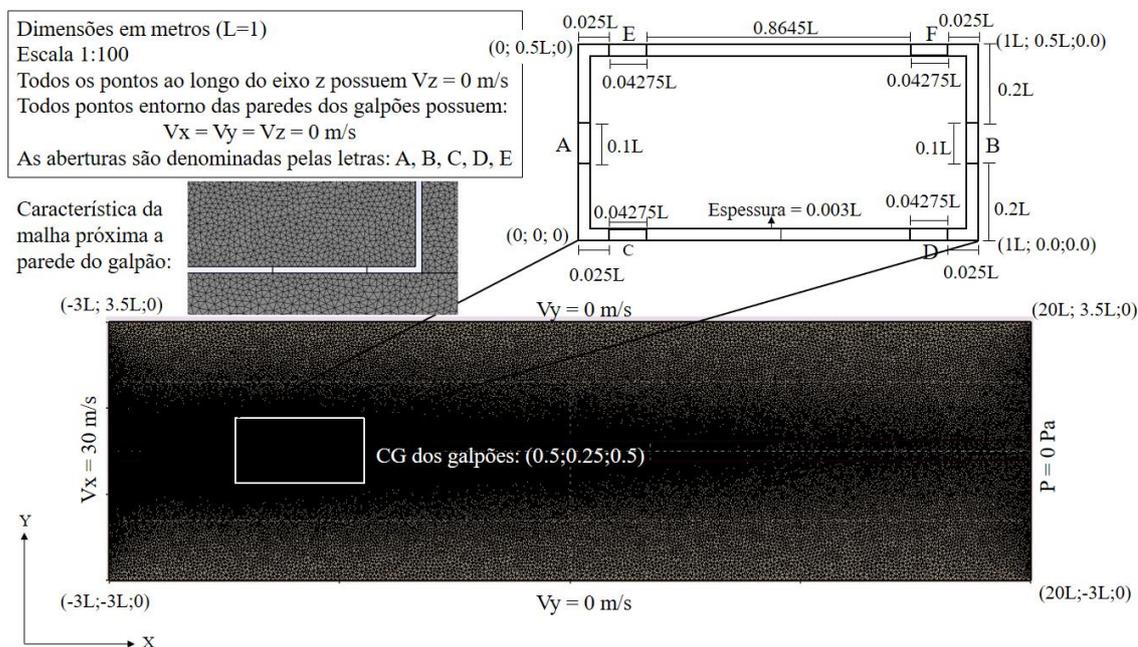


Figura 7.38 Domínio computacional, geometria da malha, dimensões da edificação e condições de contorno

Os casos simulados neste trabalho são denominados conforme a ordem de avaliação, independente de vento ser a 0° (180°) ou 90°. Para Loredou-Souza (1992), o nome é definido

pelas aberturas, mantendo-se o mesmo para as diferentes direções do vento. As malhas foram construídas com quantidades de nós e elementos semelhantes às que obtiveram os melhores resultados nas simulações presentes no item 7.2 para os prismas retangulares. A seguir na Tabela 7.20, são apresentadas as características das aberturas para cada caso, bem como a direção do vento, o número do caso correspondente na simulação de Loredou-Souza (1992) e as características da malha de elementos finitos tetraédricos.

Tabela 7.20 Casos analisados e parâmetros das malhas

CASO (Presente Trabalho)	CASO (Loredou-Souza, 1992)	DIREÇÃO DO VENTO	ABERTURAS	Número total de Nós	Número Total de Elementos
galp01	-	0°	-	235.534	702.741
galp02	-	90°	-	354.254	1.058.664
galp03	Caso 1	0°	A	394.872	1.177.347
galp04	Caso 2	0°	A e B	394.872	1.177.545
galp05	Caso 18	0°	A, D e F	394.872	1.177.526
galp06	Caso 18	90°	A, D e F	498.942	1.490.088
galp07	Caso 22	0°	A, C, D, E e F	394.872	1.177.707
galp08	Caso 22	90°	A, C, D, E e F	498.942	1.490.268
galp09	Caso 22	180°	A, C, D, E e F	394.872	1.177.707
galp10	Caso 76	90°	C, D, E e F	498.942	1.490.070
galp11	-	90°	C e D	407.570	1.216.104
galp12	-	90°	D	407.570	1.216.014

Os primeiros dois casos são exemplos de estruturas impermeáveis (todas as aberturas fechadas), as quais exigem apenas a análise da distribuição da pressão externa. A seguir nas Figura 7.39 e Figura 7.40 são apresentados os 3 resultados referentes a distribuição da pressão externa, para a simulação numérica, túnel de vento e valores normativos. Para a comparação utiliza-se a seção I de tomadas de pressão resultantes das análises em túnel de vento.

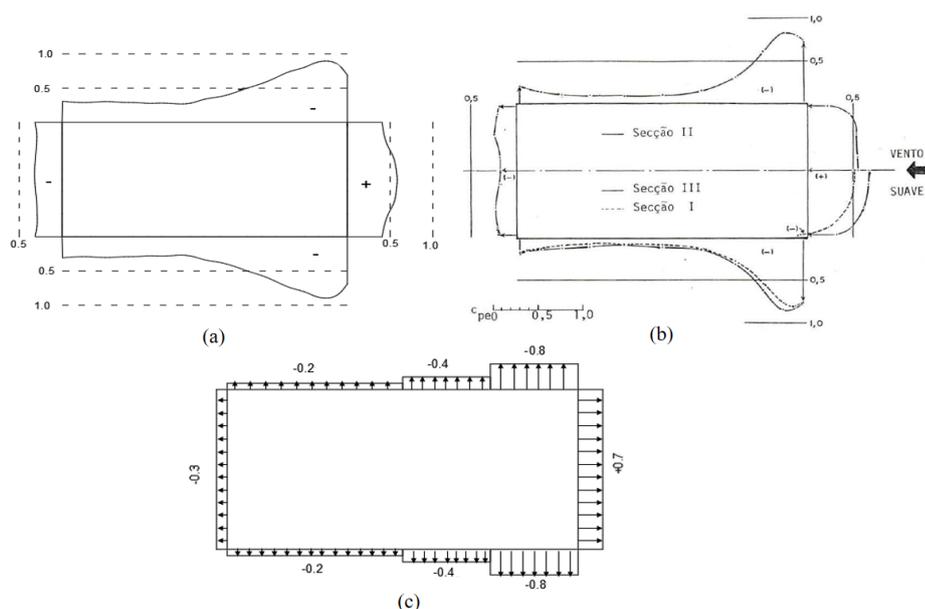


Figura 7.39 Coeficientes de Pressão Externa a 0° - (a) presente trabalho, (b) Loredou-Souza (1992) e (c) calculado pela NBR6123:1988

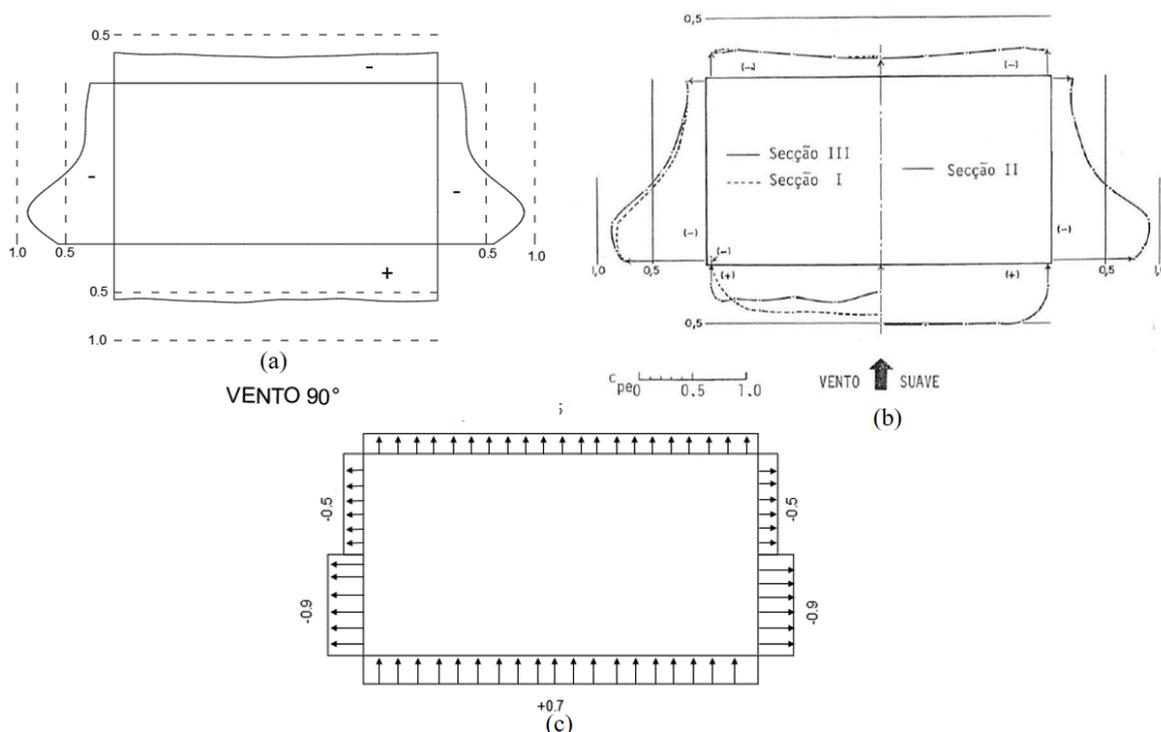


Figura 7.40 Coeficientes de Pressão Externa a 90° - (a) presente trabalho, (b) Loredou-Souza (1992) e (c) calculado pela NBR6123:1988

As pressões externas relativas ao modelo simulado foram tomadas conforme as recomendações de Loredou-Souza (1992), com distância semelhante às utilizadas para obtenção das pressões internas (Figura 7.42), mas a partir de pontos no contorno externo. Na Figura 7.41 os campos da componente Z de vorticidade instantânea no plano XY são apresentados para o tempo de 100 segundos.

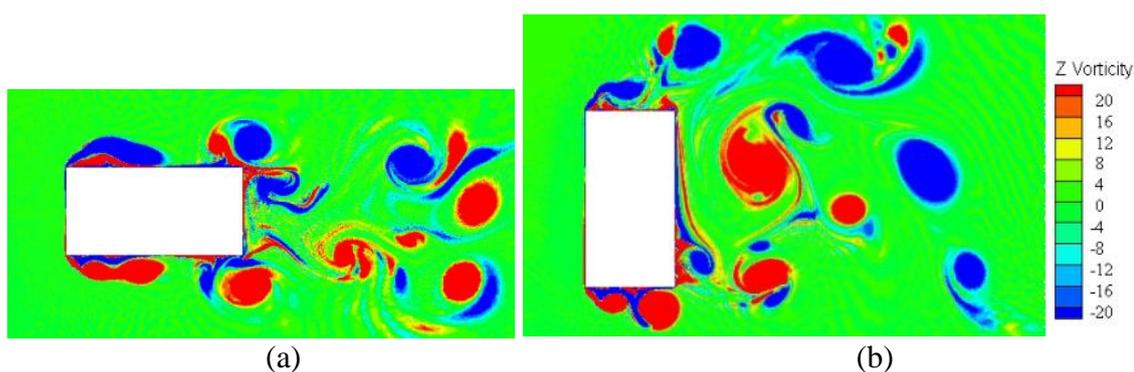


Figura 7.41 Campos de vorticidade instantânea para galpões sem aberturas – presente trabalho: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°

De maneira geral, os resultados apresentam boa concordância entre as simulações em túnel de vento, indicando que as malhas propostas são suficientes para simulação dos exemplos. Portanto, os demais casos podem ser gerados com o mesmo domínio computacional e mesmo tamanho de elemento em regiões próximas às paredes da edificação. Note que os resultados

apresentados pela norma brasileira são muito próximos aos obtidos por ambas as simulações, remetendo a valores adequados para a determinação dos esforços nas estruturas em geral. As faces de barlavento (onde o vento incide) apresentam as maiores sobrepressões, ao passo que as sucções são obtidas nas paredes de sotavento e laterais. Portanto, a compreensão dessas ações externas, para diferentes ângulos de incidência dos ventos, é fundamental ao projeto de ventilação natural e, por consequência, para o dimensionamento das aberturas.

A Figura 7.42 apresenta as tomadas de pressões internas localizadas nos mesmos pontos utilizados por Loredou-Souza (1992). Para a determinação do coeficiente de pressão interna (valor médio), uma área de influência foi determinada para cada ponto, com o intuito de obter-se resultados mais próximos àqueles obtidos em túnel de vento. Depois um valor médio foi determinado para fins de comparação. O tempo total de simulação foi de 100 segundos e os campos médios foram determinados a partir do tempo de 60 segundos. A Tabela 7.21 apresenta os resultados relativos aos coeficientes calculados por Loredou-Souza (1992), NBR6123:1988 (item 6.2) e presente trabalho (última coluna). De acordo com Loredou-Souza (1992), coeficientes positivos indicam sobrepressão, ao passo que negativos, sucção.

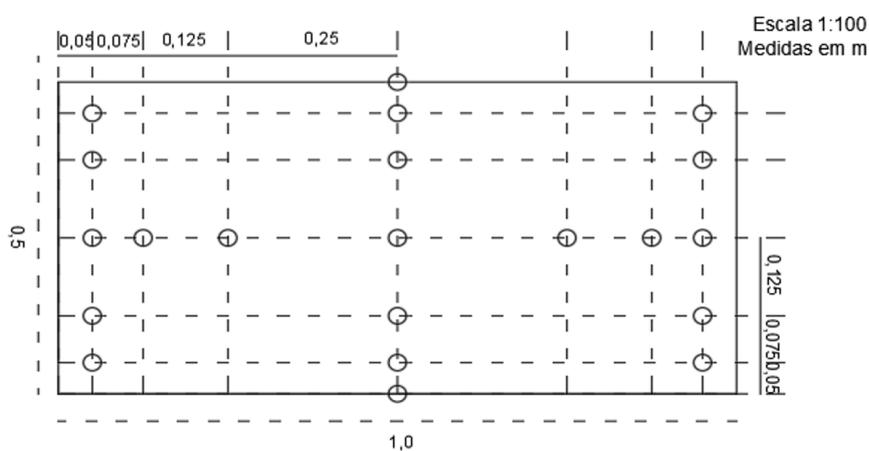


Figura 7.42 Tomadas de pressões (adaptado de Loredou-Souza, 1992)

Tabela 7.21 Coeficientes para os 10 casos

CASO	100Ci médio		100Ci extremos		100Ci	100Ci médio
	(Loredou-Souza, 1992)		(Loredou-Souza, 1992)		(NBR 6123:1988)	
galp03	50		50	52	80	51
galp04	19		16	26	20	18
galp05	29		26	36	30	23
galp06	-25		-30	-16	-20	-23
galp07	-10		-16	-1	-15	-12
galp08	-15		-20	-8	-15	-14
galp09	-29		-32	-28	-30	-29
galp10	0		-3	4	20	1
galp11	-		-	-	80	34
galp12	-		-	-	80	42

As piores combinações se devem aos modelos *galp03* para vento a  $0^\circ$  e *galp12* para vento a  $90^\circ$ . Este fato ocorre devido à presença de aberturas apenas na face de barlavento, onde uma grande sobrepressão é transmitida ao interior. O campo de pressão médio desses casos é apresentado na Figura 7.43, onde zonas em vermelho indicam sobrepressão e em azul sucção. O modelo *galp12* será utilizado em simulações da seção posterior, a fim de elaborar a teoria de controle PID para adaptação do *spoiler*, conforme as condições instantâneas do escoamento.

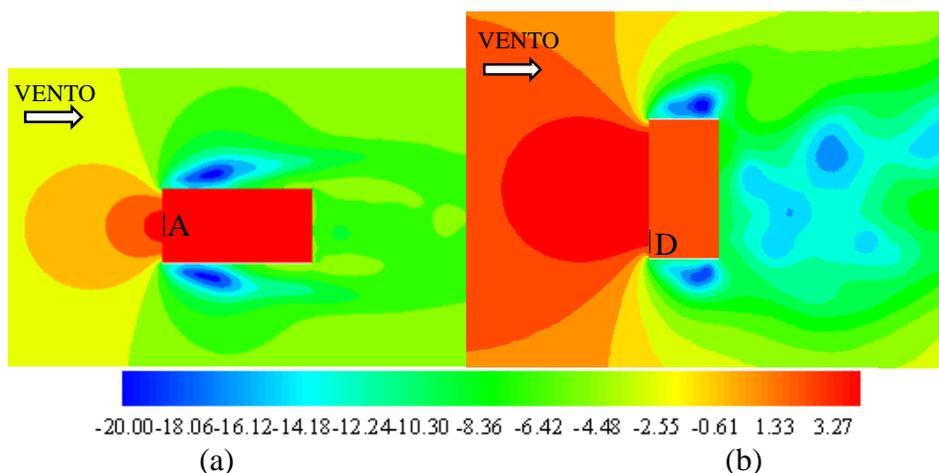


Figura 7.43 Campo de pressão médio do modelo – 100 níveis de -20 a 4: (a) *galp03*; (b) *galp12*

O modelo *galp09* representa a situação mais favorável externa e internamente, cujas ações remetem à melhor combinação de aberturas, transmitindo sucção às paredes internas (ver campo de pressão médio na Figura 7.44a). Já o modelo *galp11* é um caso proposto com duas aberturas na face de barlavento e, como dito na seção anterior, promove uma grande sobrepressão no interior. Apesar de este caso apresentar uma circulação interna satisfatória, a disposição dos objetos e divisões internas devem ser estudados conjuntamente. O campo de pressão com linhas de corrente, referentes ao modelo *galp11*, é apresentado na Figura 7.44b.

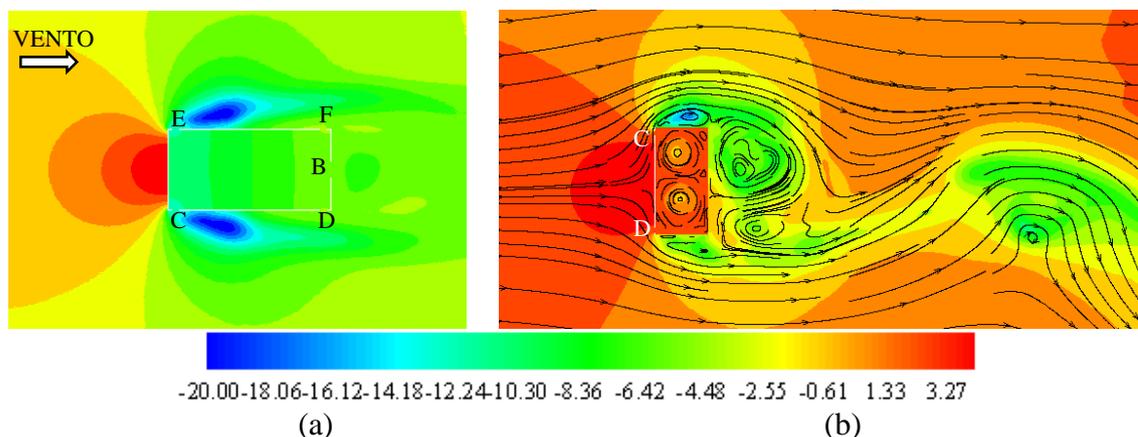


Figura 7.44 Campos de pressão: (a) *galp09*; (b) *galp11*

A seguir (Tabela 7.22) visualiza-se um comparativo entre os coeficientes médios e rms das configurações analisadas, bem como a vazão de ventilação, a qual foi determinada conforme as recomendações da NBR6123:1988 (ver Capítulo 2). As diferenças de pressões existentes na equação foram obtidas pelos campos médios em pontos de contornos externos e internos de cada abertura, sendo que o coeficiente de vazão foi mantido em 0,61 e todos os índices foram normalizados de acordo com a altura da abertura no plano tridimensional.

Tabela 7.22 Coeficientes e vazão de ventilação

CASO (Presente Trabalho)	Coeficiente médio de Arrasto $C_{Dm}$	Coeficiente rms de Arrasto $C_{Drms}$	Coeficiente médio de Sustentação $C_{Lm}$	Coeficiente rms de Sustentação $C_{Lrms}$	Vazão de ventilação $Q$ (m <sup>3</sup> /s)
galp01	1,135	0,151	-0,049	0,262	-
galp02	2,563	0,727	-1,015	2,692	-
galp03	1,190	0,150	-0,030	0,314	0,0084
galp04	0,362	0,088	0,009	0,319	0,0168
galp05	0,219	0,195	0,002	0,264	0,0144
galp06	2,154	0,553	0,976	1,658	0,0156
galp07	0,938	0,244	-0,073	0,303	0,0319
galp08	1,748	0,550	1,425	1,192	0,0280
galp09	2,056	0,137	-0,00008	0,277	0,0157
galp10	1,913	0,510	0,321	2,195	0,0073
galp11	2,259	0,620	0,046	0,513	0,0072
galp12	2,534	0,230	0,363	0,158	0,0036

De acordo com as Tabela 7.21 e Tabela 7.22, as melhores combinações de aberturas foram apresentadas pelos modelos *galp07* e *galp08*, cujos coeficientes indicam uma sucção sendo transmitida ao interior, além de excelentes índices quanto a ventilação natural. Os modelos *galp06* e *galp09* apresentam valores intermediários quanto a vazão de ventilação e a distribuição de pressão. Os casos *galp04* e *galp05* também são considerados eficazes para a ventilação, mas uma sobrepressão é observada no interior, podendo causar prejuízos ao sistema de coberturas e por este motivo estas configurações não devem ser as primeiras opções em projetos. As piores combinações de aberturas para o carregamento da cobertura (por transmitirem uma elevada sobrepressão ao interior) também remetem aos índices insatisfatórios quanto a ventilação natural, mesmo apresentado uma circulação interna abrangente, como nos casos *galp10* e *galp11*, os quais estão sujeitos a ventilação cruzada e unilateral, respectivamente. Já os casos *galp03* e *galp12*, devem ser, sempre que possível, evitados, pois suas aberturas levam a transmissão das mais elevadas sobrepressão ao interior, prejudicando as estruturas do telhado e paredes laterais.

Reitera-se a necessidade de avaliar as edificações com divisões internas, pois elas alteram significativamente a circulação e a distribuição de pressão no interior, bem como ângulos oblíquos de vento incidindo sobre as edificações. Portanto, este modelo é apenas uma forma simplificada para obtenção de algumas recomendações iniciais ao projeto.

## 7.5 ANÁLISE DE ESCOAMENTO SOBRE GALPÃO INDUSTRIAL COM SPOILER – APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE

As análises apresentadas neste item remetem a um modelo de galpão industrial com características semelhantes às aquelas empregadas por Loredou-Souza (1992), com vento atuante a  $90^\circ$  sobre a edificação. As geometrias são apresentadas em duas configurações: uma sem abertura (com paredes impermeáveis) e outra com uma abertura a barlavento da edificação, indicando um “portão”, semelhantes aos casos *galp02* e *galp12* da seção anterior, respectivamente. Aqui, serão estudados como modelos bidimensionais obtidos a partir de um corte transversal aplicado sobre a edificação (ver Figura 7.45).

Esses exemplos merecem destaque em função dos efeitos que as forças resultantes provocam na estrutura, especialmente na cobertura. Além disso, com essas duas geometrias, será possível entender o comportamento dos *spoilers* na redução da carga de cobertura e até eliminação dos picos de pressão nas arestas de telhado, a fim de elaborar a teoria de controle PID para o acionamento do dispositivo.

Na Figura 7.45 são apresentadas as características do domínio computacional e condições de contorno utilizadas nas simulações, além de um breve detalhamento da malha utilizada no entorno do corpo. O perfil de velocidade é uniforme na entrada com  $V_\infty = 30$  m/s e o número de Reynolds é igual a  $1,4 \times 10^5$ . Ressalta-se que os efeitos de camada limite atmosférica na entrada, com perfis de entrada de velocidade não uniformes, são importantes, mas não foram alvo deste estudo. As estruturas das malhas utilizadas nas simulações apresentam o tamanho do menor elemento em torno de  $2 \times 10^{-4} L$ , indicando um fator  $y^+$  próximo a 2,739, adequado para capturar os efeitos de um escoamento turbulento usando a metodologia LES. Os menores elementos da malha sofreram uma diminuição em seu tamanho, a partir de constatações de simulações anteriores, tendo em vista os efeitos necessários a serem capturados pelos *spoilers*, que devido a suas pequenas dimensões e grande mobilidade, necessitaram de elementos menores para tal fim.

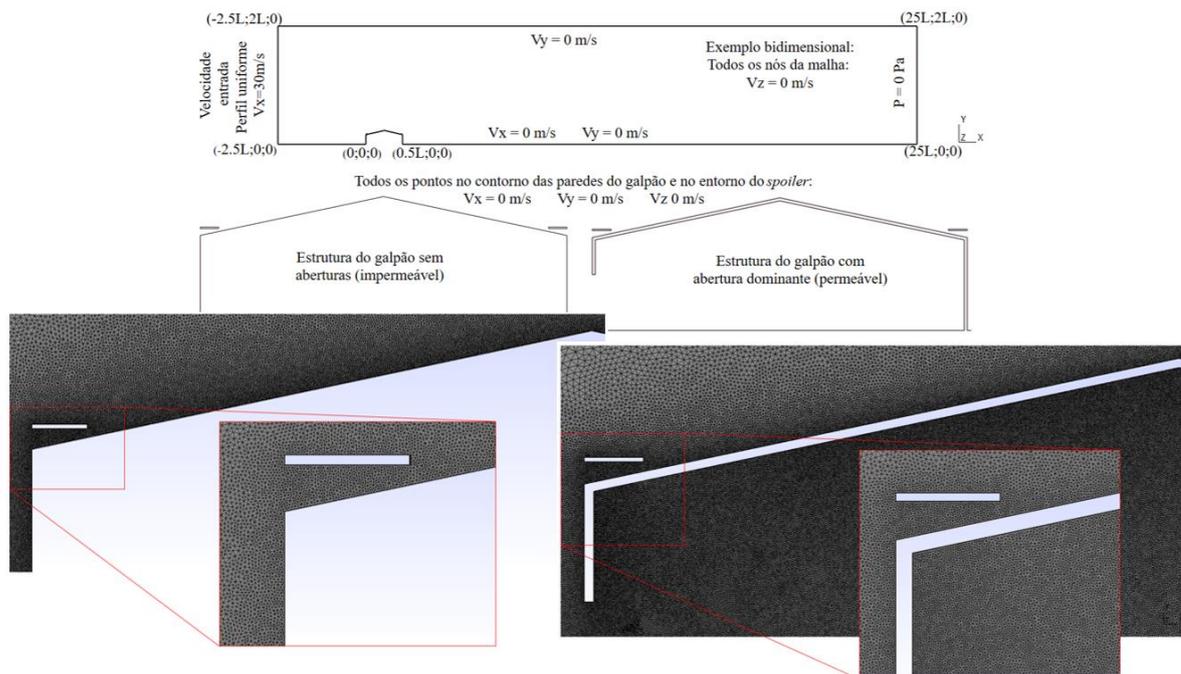


Figura 7.45 Características geométricas e condições de contorno para as simulações com *spoiler* – detalhamento da malha próxima ao galpão

A Figura 7.46 apresenta o detalhamento da geometria do galpão e do *spoiler* proposto, conforme as recomendações indicadas por Li et al. (2018) e Mooneghi e Kargarmoakhar (2016). O dispositivo é estudado com o formato retangular. O eixo de rotação do dispositivo (localizado nas arestas) e a amplitude de ângulos propostos são discutidos na sequência.

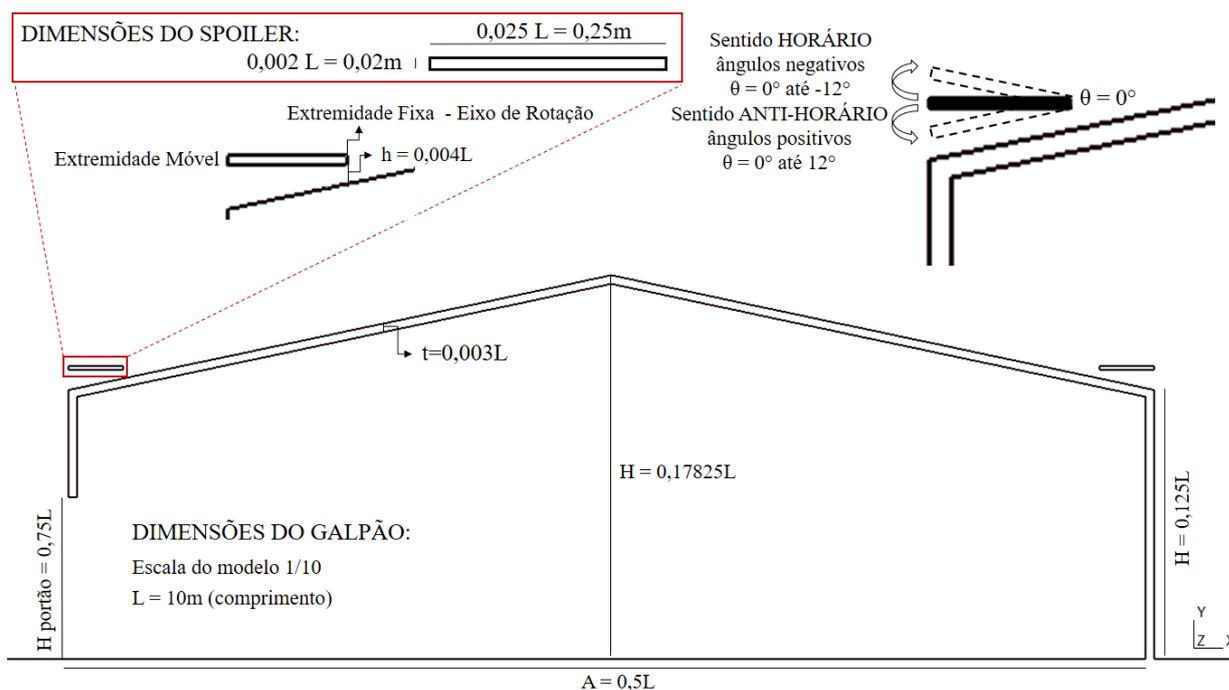


Figura 7.46 Detalhamento da estrutura do galpão e dos *spoilers*

A placa móvel que representa o *spoiler* é estudada como geometria de corpo rígido com articulação em uma das extremidades, sendo a rotação entorno do eixo Z do sistema de coordenadas adotado. Para este estudo entende-se que há pouco efeito resultante da placa localizada na água a sotavento da edificação e, por esta razão, somente os resultados dos efeitos do dispositivo à barlavento são considerados. Além disso, o *spoiler* à sotavento foi mantido fixo no ângulo de  $0^\circ$ , visto que, conforme Li et al. (2018), esta disposição não provoca efeito nocivo à estrutura, fato que pode ser observado pelos resultados apresentados a seguir. A necessidade de manter o dispositivo nessa aba deve-se ao fato de não ser possível prever que o vento incidirá sempre sobre somente um lado da edificação e, para não prejudicar a estrutura, a manutenção de sua orientação paralela com a horizontal é o ideal.

A inclinação do apêndice leva a uma modificação no escoamento, pois promove a dissipação dos vórtices de canto. Neste sentido, há necessidade de fixar uma das extremidades do dispositivo com o intuito de permitir sua rotação. Para obtenção da articulação com melhor desempenho, três análises foram realizadas para os ângulos de  $4^\circ$ ,  $8^\circ$  e  $12^\circ$  com cada extremidade fixada e rotação no sentido anti-horário (ver Figura 7.47).

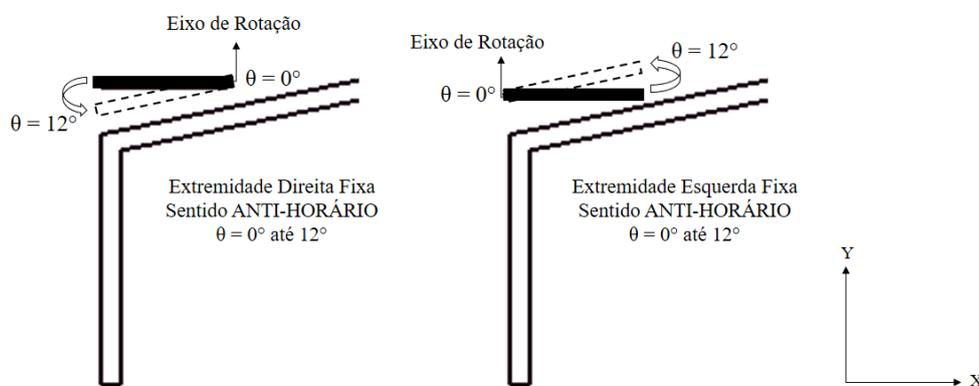


Figura 7.47 Propostas de extremidade rotação do dispositivo

A Figura 7.48 apresenta o campo de vorticidade instantânea referente à componente Z no tempo de 50 segundos, para o ângulo de  $4^\circ$ . Analisando a figura percebe-se que os vórtices mais numerosos presentes em (b) levam a um efeito mais nocivo à cobertura por serem mais intensos, promovendo uma sucção maior. Ademais, a carga de sucção presente no telhado aumenta em aproximadamente 15% em relação ao caso (a). Por estas razões, definiu-se o eixo de rotação na ponta direita da placa, quando esta é localizada a barlavento.

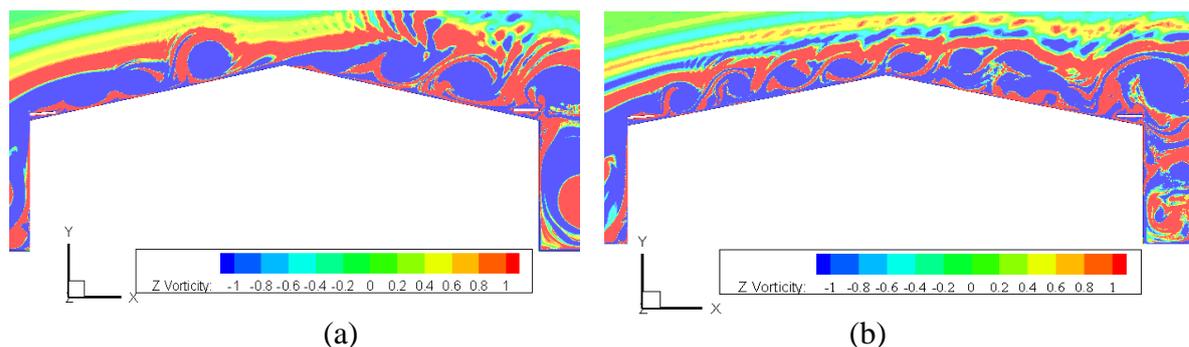


Figura 7.48 Campos de vorticidade de escoamentos com *spoilers* – variação da extremidade de rotação da placa a barlavento: (a) extremidade direita fixa; (b) extremidade esquerda fixa

Após a definição da extremidade de rotação, análises com variações de  $2^\circ$  foram realizadas a partir da horizontal ( $0^\circ$ ) até  $12^\circ$  (*spoiler* paralelo ao telhado), com a rotação no sentido anti-horário para a articulação na ponta direita. Porém, à medida que o dispositivo se tornava paralelo ao telhado, havia aumento na carga atuante sobre a cobertura para ambos os casos (com e sem abertura). Então, com a intenção de mitigar as cargas, a mesma variação de ângulo foi proposta, mas rotando o *spoiler* no sentido horário até  $12^\circ$ , onde os resultados se mostraram ainda mais efetivos e satisfatórios, sendo indicados pelo sinal negativo dos ângulos (exemplo:  $-2^\circ$ ). Na Figura 7.47, apresentada anteriormente, é possível entender as rotações através das indicações mostradas no detalhamento. Assim, 28 casos foram simulados nesta etapa do trabalho, onde os resultados da sequência são fundamentais para a elaboração da teoria de controle PID e representam um estudo inicial, intitulado *análise estática*, cujas diversas contribuições para a determinação de parâmetros são obtidas.

As Tabela 7.23 e Tabela 7.24 apresentam os coeficientes médios das componentes de forças nas direções X e Y (indicados na Figura 7.47) e os coeficientes de pressão média ao longo das águas e da cumeeira, além do número de *Strouhal* referente ao *spoiler*, determinado a partir da frequência de desprendimento de vórtice, dimensão característica ( $D = 0,125L$ ) e velocidade de referência. Os parâmetros foram calculados a partir do instante referente ao tempo de 40 segundos, pois o escoamento já se encontrava desenvolvido nesta altura. Os coeficientes médios das águas de cobertura foram determinados em função de 10 pontos equidistantes ao longo delas, para a edificação com abertura os pontos foram medidos no interior e exterior das águas como forma de obter o correto valor da pressão agindo sobre elas. O tempo total de simulação desses problemas está em torno de 70 segundos físicos. A nomenclatura é realizada de acordo com o tipo de estrutura (sa – sem abertura ou ca – com abertura), rotação do *spoiler* (sh – sentido

horário ou sa – sentido anti-horário) e ângulo. Deste modo, os casos *sa0000* e *ca0000* são edificações sem e com abertura, mas sem *spoiler*.

Tabela 7.23 Coeficientes médios - estrutura do galpão sem aberturas

CASO	Ângulo rotação <i>spoiler</i>	$C_{ym}$ água a barlav.	$C_{xm}$ água a barlav.	$C_{pm}$ água a barlav.	$C_{ym}$ água a sotav.	$C_{xm}$ água a sotav.	$C_{pm}$ água a sotav.	$C_p$ cumeeira	$St$ <i>spoiler</i>
sa0000	-	2,534	-0,411	-2,7065	1,264	0,503	-1,213	-2,219	-
sash12	-12°	1,274	-0,250	-0,400	1,910	0,403	-0,679	-0,707	0,68
sash10	-10°	1,143	-0,225	-0,400	1,785	0,378	-0,542	-0,679	0,55
sash08	-8°	1,033	-0,203	-0,433	1,632	0,347	-0,690	-0,703	0,50
sash06	-6°	1,236	-0,243	-0,613	1,794	0,380	-1,215	-0,803	0,45
sash04	-4°	1,348	-0,267	-0,573	1,910	0,403	-0,845	-0,686	0,36
sash02	-2°	1,277	-0,254	-0,478	1,787	0,380	-0,577	-0,857	0,24
sash00	0°	1,614	-0,351	-0,624	1,722	0,363	-0,827	-1,240	0,11
sasa02	2°	1,597	-0,321	-0,625	1,989	0,419	-0,909	-1,847	0,12
sasa04	4°	1,865	-0,377	-0,673	1,739	0,367	-0,690	-0,930	0,10
sasa06	6°	2,129	-0,433	-0,812	1,744	0,368	-0,442	-1,120	0,07
sasa08	8°	2,024	-0,408	-0,900	1,719	0,363	-0,736	-1,320	0,04
sasa10	10°	2,082	-0,419	-0,673	1,622	0,343	-0,936	-1,264	0,05
sasa12	12°	2,043	-0,414	-0,696	1,703	0,358	-0,671	-1,660	0,05

Tabela 7.24 Coeficientes médios - estrutura do galpão com aberturas

CASO	Ângulo rotação <i>spoiler</i>	$C_{ym}$ água a barlav.	$C_{xm}$ água a barlav.	$C_{pm}$ água a barlav.	$C_{ym}$ água a sotav.	$C_{xm}$ água a sotav.	$C_{pm}$ água a sotav.	$C_p$ cumeeira	$St$ <i>spoiler</i>
ca0000	-	3,049	-0,521	-1,214	2,555	0,539	-1,177	-1,666	-
cash12	-12°	1,752	-0,356	-0,492	2,314	0,495	-0,861	-1,083	0,56
cash10	-10°	1,721	-0,350	-0,495	2,333	0,495	-0,854	-0,824	0,44
cash08	-8°	1,723	-0,351	-0,491	2,308	0,491	-0,859	-1,056	0,38
cash06	-6°	1,710	-0,348	-0,748	2,277	0,484	-0,862	-1,030	0,38
cash04	-4°	1,710	-0,349	-0,696	2,344	0,500	-1,084	-1,089	0,32
cash02	-2°	1,763	-0,359	-0,588	2,362	0,501	-0,928	-1,079	0,20
cash00	0°	1,953	-0,407	-0,767	2,416	0,513	-1,148	-1,066	0,14
casa02	2°	2,190	-0,452	-0,826	2,456	0,519	-0,988	-1,007	0,11
casa04	4°	2,629	-0,544	-1,398	2,194	0,463	-0,974	-1,354	0,05
casa06	6°	2,450	-0,500	-0,993	2,243	0,474	-0,926	-1,561	0,06
casa08	8°	2,436	-0,485	-0,958	2,380	0,502	-0,860	-1,048	0,07
casa10	10°	2,569	-0,527	-1,051	2,260	0,477	-0,927	-1,293	0,04
casa12	12°	2,516	-0,513	-1,168	2,257	0,477	-0,952	-1,445	0,05

Ao analisar os dados presentes nas tabelas, percebe-se que a água de sotavento não apresenta grandes modificações na carga sentida à medida que a variação do ângulo do *spoiler* presente a barlavento é proposta. Portanto, as ações resultantes desta aba são relevantes ao dimensionamento, mas para a rotação do dispositivo considera-se apenas as ações resultantes na água de barlavento, a qual apresenta alterações significativas dependendo do ângulo que o perturbador está sujeito. A manutenção do *spoiler* localizado a sotavento no ângulo de 0° não

altera as pressões presentes na cobertura, contudo, há necessidade da inserção deste dispositivo, pelo fato de não se conseguir prever os ventos dominantes, mas não há necessidade de rotação quando o vento incidir sobre o outro lado da edificação.

Os coeficientes apresentados em destaque remetem às menores cargas atuantes sobre a água de cobertura a barlavento, demonstrando que os ângulos ideais do dispositivo ( $-8^\circ$  para edificação sem abertura e  $-4^\circ$  para com abertura) devem ser aqueles indicados pela rotação no sentido horário nas duas estruturas propostas. Além disso, a inclinação deve variar a partir da horizontal ( $0^\circ$ ) até 80% da inclinação total das águas no sentido horário, visto que a variação entre esses coeficientes é mínima. Ressalta-se que apenas a presença do dispositivo já altera o campo de pressão e as forças existentes nas coberturas e mesmo considerando os piores ângulos de desempenho do *spoiler*, os coeficientes médios das forças são reduzidas em cerca de 16% (sentido anti-horário). Já as inclinações para as quais o comportamento do apêndice apresenta os resultados mais satisfatórios, a redução pode chegar a níveis de 45% (*sash08* e *cash04*).

A Figura 7.49 apresenta os coeficientes das força nas direções Y e X que atuam diretamente no *spoiler* localizado à barlavento, para todos os ângulos simulados.

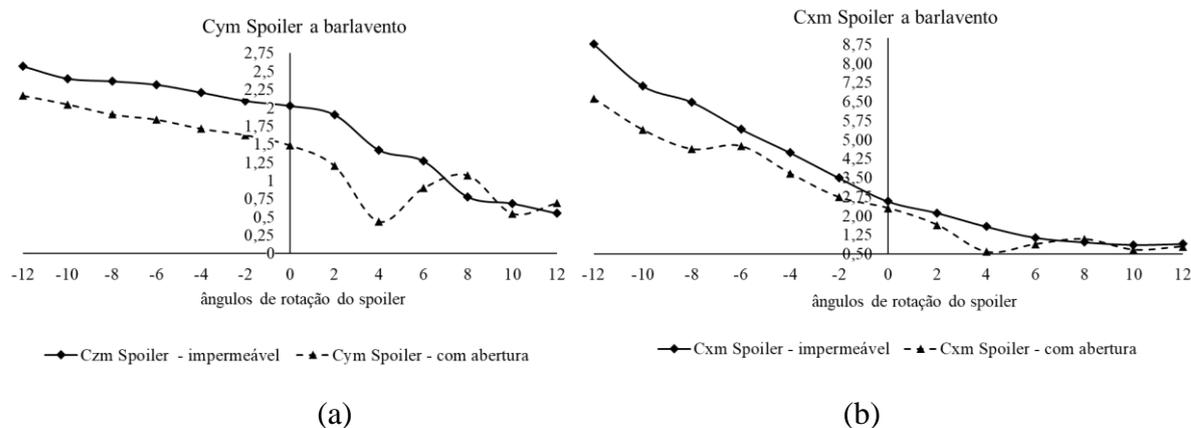


Figura 7.49 Coeficiente médios da força (a) direção y e (b) direção x atuante no *spoiler* a barlavento para ambas configurações e ângulos propostos

Os resultados apresentados nos gráficos demonstram que as forças resultantes, atuantes sobre o *spoiler*, dependem diretamente de sua inclinação. Nota-se um comportamento reverso do observado na água de cobertura. Isso ocorre porque as forças de ascensão geradas pelo escoamento incidente, antes atuantes sobre o canto do telhado (sem a presença do dispositivo ou com rotações anti-horárias), incidem agora diretamente sobre o *spoiler*. Segundo Li et al.

(2018), esta ação não é muito discutida e apresentada pelos pesquisadores da área, mas serve como ferramenta básica e fundamental aos projetos, principalmente quanto a escolha do material (rígido) e ao sistema de fixação referentes ao *spoiler*.

A Figura 7.50 apresenta o coeficiente de sustentação médio atuante na água da cobertura à barlavento, para cada ângulo de inclinação do *spoiler*.

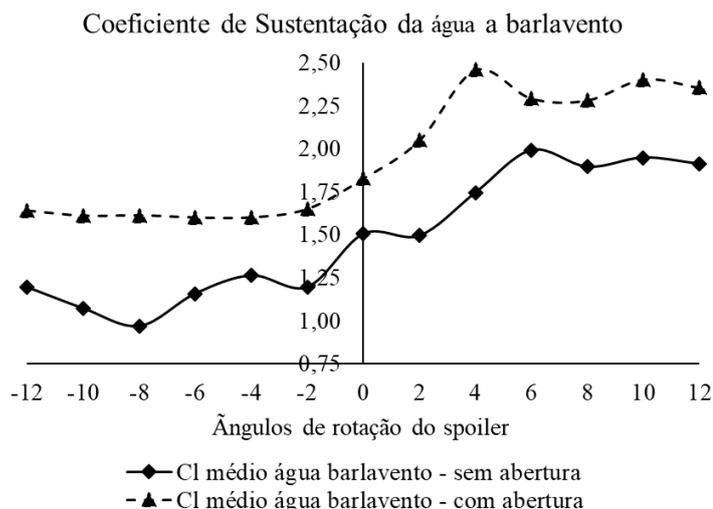


Figura 7.50 Coeficiente de sustentação atuante na água da cobertura a barlavento para caso sem e com abertura – presente trabalho

As Figura 7.51 e Figura 7.52 trazem os campos de pressões instantâneos para  $t = 70$  segundos considerando todas as inclinações dos *spoilers* analisados para as configurações sem e com abertura, respectivamente. Cada caso é nomeado conforme as características apresentadas na Tabela 7.23 e na Tabela 7.24. Na Figura 7.52, um corte na linha superior das aberturas foi realizado para focar a análise nas ações que aparecem nas coberturas. Em ambas as figuras observa-se que para ângulos negativos do dispositivo (rotação no sentido horário) há um alívio na pressão que atua sobre a cobertura, diferentemente das inclinações positivas, isso porque, nos primeiros casos, os vórtices gerados passam acima do telhado e, no ponto onde antes havia a separação do escoamento e um grande pico de sucção (aresta superior esquerda, na divisão entre parede e cobertura), há sobrepressão, ideal para evitar os acidentes e/ou possíveis falhas estruturais. Os resultados mais nocivos à estrutura remetem ao caso com abertura à barlavento, fato que era esperado devido à grande sobrepressão interna gerada pela presença da abertura. Ainda, reitera-se o fato de que a presença do *spoiler*, em qualquer um dos casos, alivia a pressão sentida pelas águas de cobertura, já que essas são mais intensas sem a presença do mesmo (ver casos *sa0000* e *ca0000*).

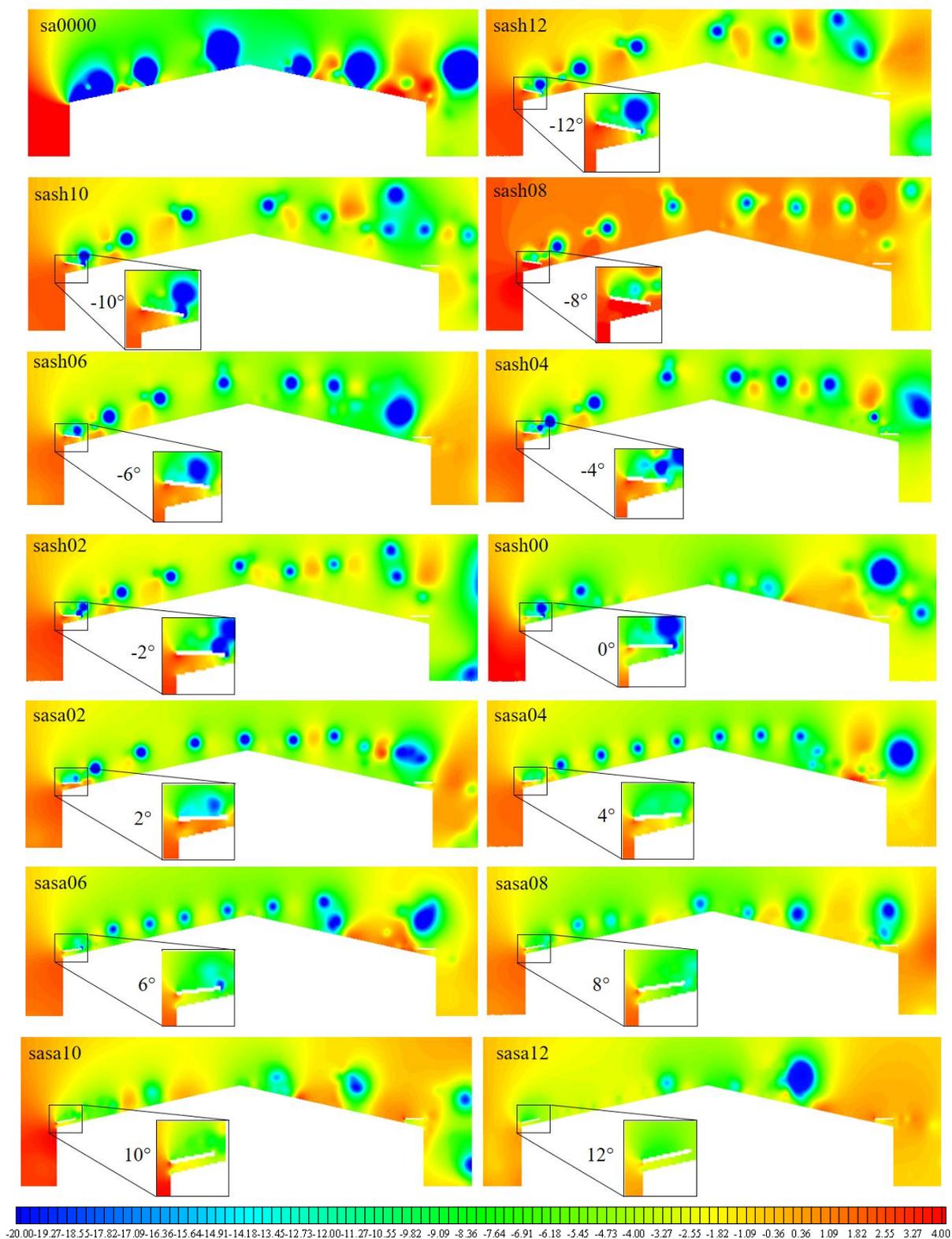


Figura 7.51 Campos de Pressão instantâneos em  $t = 70$  segundos casos sem abertura – 100 níveis de -20 a 4 Pa.

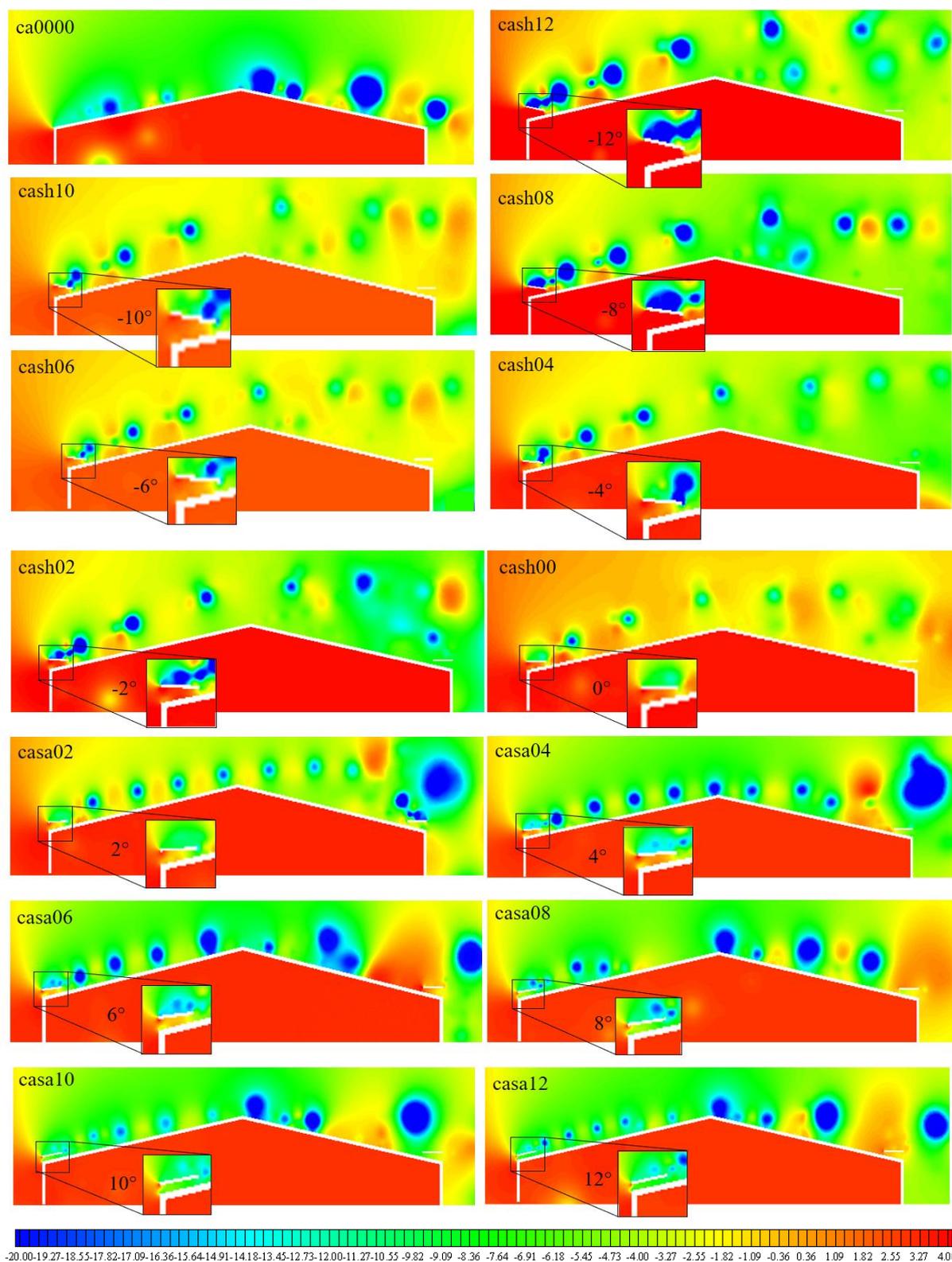


Figura 7.52 Campos de Pressão instantâneos em  $t = 70$  segundos casos com abertura – 100 níveis de -20 a 4 Pa.

A seguir (Figura 7.53) é demonstrado o percentual de redução dos coeficientes de pressão médios sobre a água de barlavento e cumeeira para as duas geometrias, tomado em relação às configurações com e sem *spoiler*. Nota-se que os níveis mais altos de mitigação, para ambos os

coeficientes e edificações, são alcançados com ângulos quando a rotação se dá no sentido horário. Este fato ocorre porque esses ângulos possibilitam a inexistência do pico de sucção, antes encontrado na aresta do telhado e, ainda, desviam os vórtices a um plano superior ao da cobertura. Além disso, os melhores percentuais foram obtidos com a estrutura permeável, indicando que a presença do perturbador é essencial para mitigação da carga de pressão nas coberturas, cuja diminuição do coeficiente  $C_{pm}$  atinge média de 85%. Com os ângulos positivos (giro no sentido anti-horário), os picos de sucção ainda existem, mas menos intensos, quando comparados à configuração sem o dispositivo. Embora os resultados tenham sido menos eficientes com os ângulos positivos, mais uma vez, demonstra-se que todos são capazes de diminuir os elevados carregamentos percebidos na edificação isolada.

Com as observações anteriores, entende-se que a água a barlavento é a mais afetada com a mudança de inclinação do dispositivo perturbador, assim a função principal do controle proposto está em torno da rotação automática do *spoiler* a partir das cargas percebidas nesta água. A Tabela 7.25 apresenta a relação entre os coeficientes das forças médias tomadas como base para as análises que seguem.

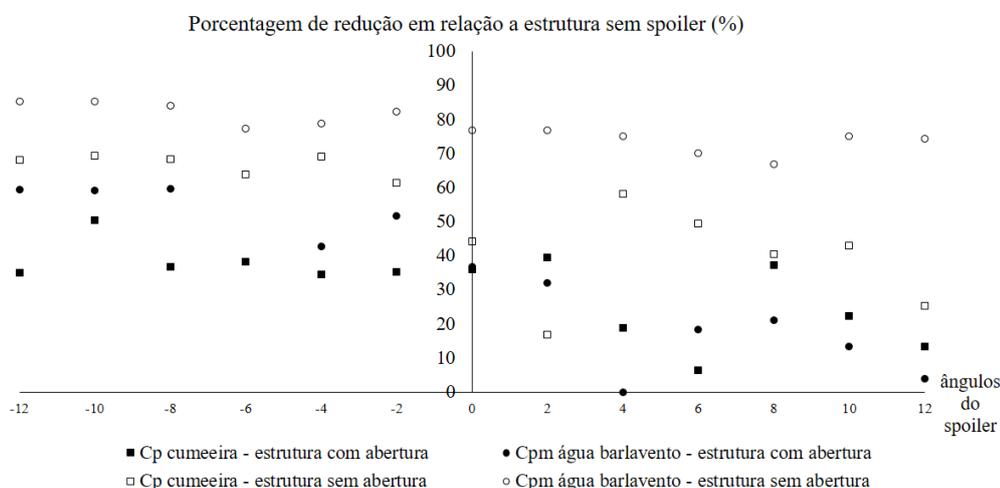


Figura 7.53 Porcentagem de redução do  $C_p$  em relação as estruturas sem *spoiler*

Tabela 7.25 Coeficientes das forças médias ideais para as estruturas com e sem abertura – *análise estática*

Coeficientes de forças médias ideais	SEM ABERTURA (ângulo -8°)	COM ABERTURA (ângulo -4°)
$C_x$ spoiler	6,4767	3,6738
$C_y$ spoiler	2,366	1,7143
$C_x$ água barlavento	-0,203	-0,349
$C_y$ água barlavento	1,033	1,710

O coeficiente médio da força na direção Y e a distribuição da pressão média na água de referência para a configuração sem abertura foram os dados iniciais utilizados para a determinação dos parâmetros da teoria de controle PID. A partir deles foi possível obter a elaboração da curva de ganho proporcional  $K_p$  (ver Figura 7.54), onde é apresentado o erro relativo entre os coeficientes médios da água de barlavento, obtidos através da *análise estática* (ver Figura 7.51), e o coeficiente ideal (Tabela 7.25), para cada ângulo simulado. Após, a mesma relação foi utilizada para obtenção dos parâmetros da estrutura com abertura.

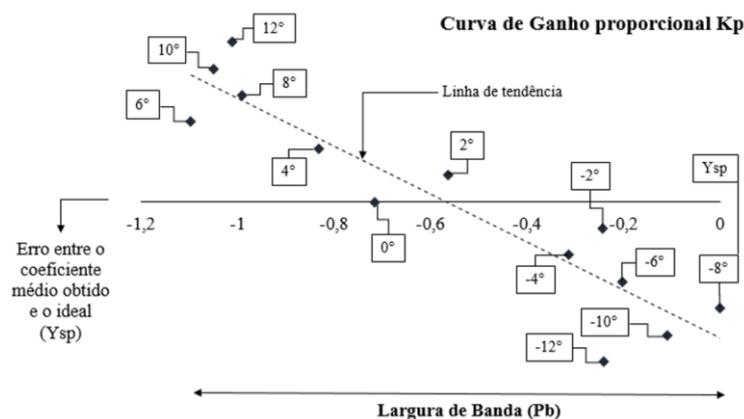


Figura 7.54 Curva de ganho  $K_p$

Na Figura 7.54 é apresentado, também, uma linha de tendência relativa aos erros obtidos. A partir deles, a largura de banda ( $P_b$ ) é obtida, a qual estabelece a amplitude máxima entre os erros e permite a primeira determinação do parâmetro fundamental no desenvolvimento da teoria de controle: a constante de ganho ( $K_p$ ), razão entre a amplitude de ângulos estudada ( $-12^\circ$  a  $12^\circ$ ) e a largura de banda.

Neste contexto, a necessidade da obtenção dos demais parâmetros, existentes nas equações do controle PID, como: velocidade angular ideal do dispositivo e tempo necessário para mudança de inclinação, levou à *análise dinâmica* do *spoiler*. Esta consiste na modificação rápida da inclinação do apêndice, ocasionando uma pequena perturbação. Simulações com diferentes valores de velocidades foram realizadas, mas aquela em que a placa, partindo de  $0^\circ$ , modificou seu ângulo até o “ideal”, provocando uma leve perturbação, foi  $\omega = -0,013963$  rad/s, a qual produz um deslocamento angular de  $-0,8^\circ$  a cada segundo físico. A partir de 40 segundos é permitida a rotação do *spoiler* até atingir valor próximo a  $-8^\circ$  para a estrutura sem abertura e  $-4^\circ$  para a com abertura. Tomados como referências devido à análise estática, estes valores são atingidos depois de transcorridos 10 e 5 segundos, para cada caso. Na Figura 7.55 é possível compreender a modificação do ângulo pelo corte apresentado. Já na Figura 7.56, podem ser

observados os históricos dos coeficientes na água a barlavento das configurações obtidos pela análise dinâmica, juntamente com aqueles sem a presença do *spoiler*.

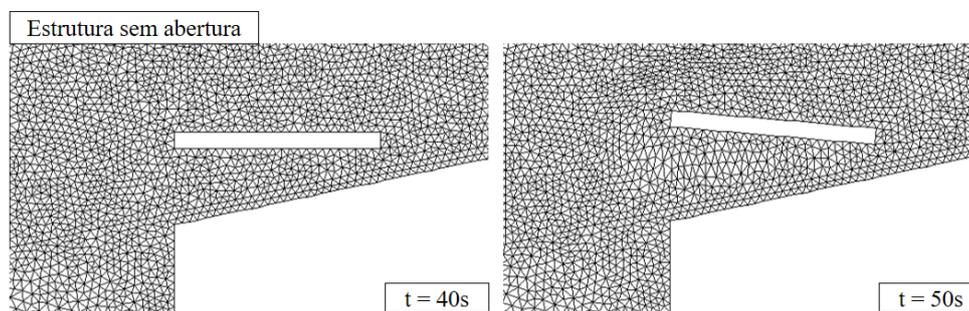


Figura 7.55 Perturbação do *spoiler* – análise dinâmica

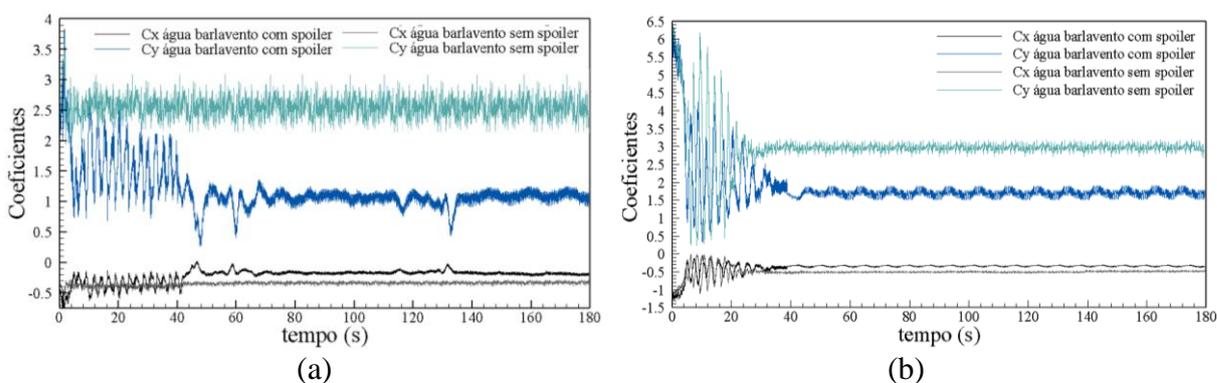


Figura 7.56 Histórico dos coeficientes médios das forças nas direções X e Y sobre a água da cobertura a barlavento: (a) sem abertura; (b) com abertura

Os resultados derivados da análise dinâmica, para a estrutura impermeável, apresentam a partir de 50 segundos uma média constante e muito próxima ao valor tomado como base para a formulação. Esta média é observada mais rapidamente na estrutura permeável, visto que ela é atingida após transcorridos 45 segundos do início do movimento. A seguir, na Tabela 7.26 são apresentados os parâmetros utilizados como base para a aplicabilidade das equações do controle. O período de amostragem é o tempo necessário para a rotação de  $0,8^\circ$  do *spoiler*, de acordo com a velocidade angular ideal. O tempo derivativo remete ao tempo necessário para a modificação da inclinação até o ângulo de referência ser obtido e o tempo integral, ao tempo necessário até atingir a estabilização, ou seja, apresentar uma velocidade angular muito pequena, a ponto de variar cerca de  $2^\circ$  do valor ideal. Embora, conforme Hägglund e Åström (2005), essas primeiras análises representem apenas um ponto de partida, sendo necessária a calibração do modelo, não houve necessidade de grandes modificações, indicando que as análises estática e dinâmica foram eficazes para a implementação do controle.

Tabela 7.26 Parâmetros Teoria de Controle PID

PARÂMETRO	Estrutura Impermeável	Estrutura com aberturas
Tempo integrativo de análise ( $T_i$ )	50 segundos	25 segundos
Tempo derivativo ( $T_d$ )	10 segundos	5 segundos
Coefficiente adimensional ( $N$ )	8	8
Constante Derivativa ( $c$ )	0,1	0,1
Período de amostragem ( $h$ )	1 segundo	1 segundo
Largura de banda ( $P_b$ )	1,096	0,920
Valor ideal ( $Y_{sp}$ )	1,033	1,710
Constante de ganho ( $K_p$ )	0,382	0,456
Ângulo com erro zero ( $ub$ )	-8°	-4°

A seguir na Figura 7.57 os passos utilizados para a implementação da teoria de controle são demonstrados.

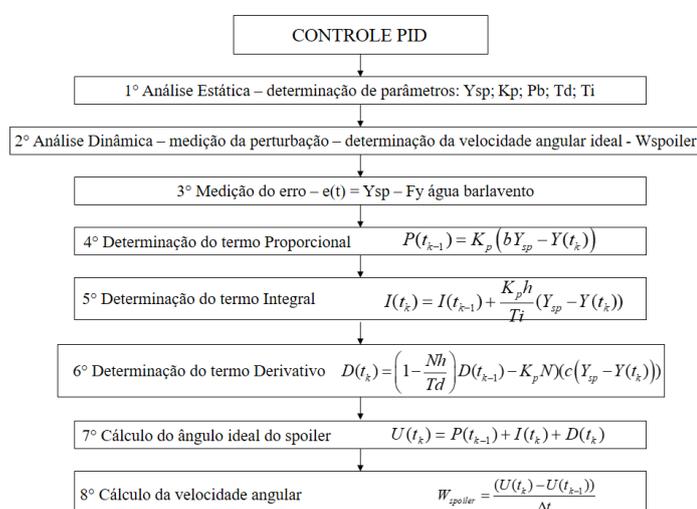


Figura 7.57 Passos para desenvolvimento da teoria de controle PID

Na sequência (Figura 7.58) é possível visualizar os históricos dos coeficientes das forças medidas na água à barlavento, considerando a aplicação do controle PID na variação do ângulo do dispositivo com o passar do tempo, devido às avaliações das características do escoamento.

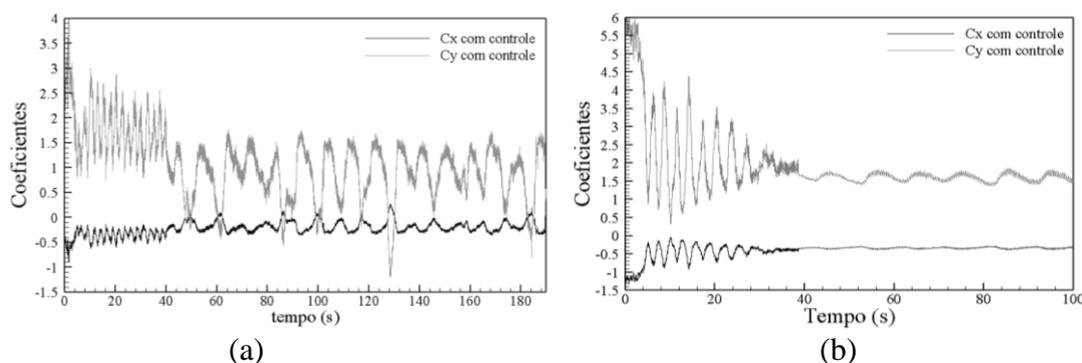


Figura 7.58 Histórico dos coeficientes médios das forças nas direções X e Y sobre a água da cobertura a barlavento com aplicação do controle PID para a estrutura: (a) sem abertura; (b) com abertura

O histórico evidencia que o valor desejável dos coeficientes é atingido à medida que o controle passa a agir na estrutura (após 40 s). A média anterior a 40 s é semelhante aos coeficientes da água a barlavento com um *spoiler* fixo no ângulo de  $0^\circ$  (*spl308* e *spl321*). Na Figura 7.59 é possível compreender a variação da inclinação do dispositivo com o passar do tempo para a estrutura impermeável. Nota-se que a partir de 85 segundos o escoamento estabiliza e o ângulo ideal do *spoiler* se mantém constante entre  $-8^\circ$  e  $-10^\circ$ , sendo que neste instante já transcorreu o tempo integral, parâmetro que supõem o tempo máximo para atingir a estabilidade do controle.

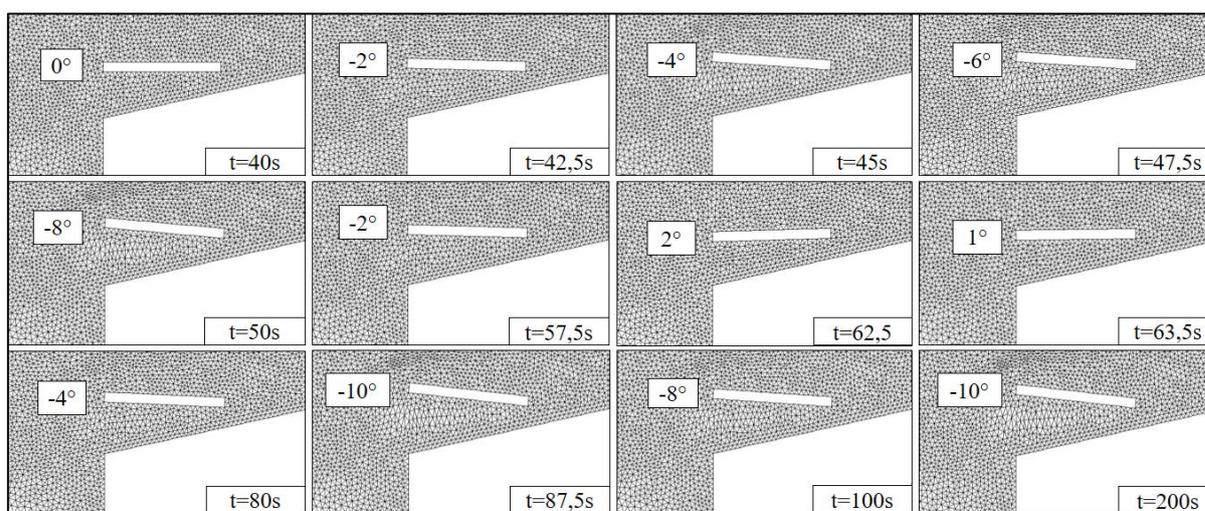


Figura 7.59 Histórico do movimento do *spoiler* – estrutura impermeável

Através da Figura 7.60 os históricos dos parâmetros de avaliação do controle, para o caso impermeável, são apresentados.

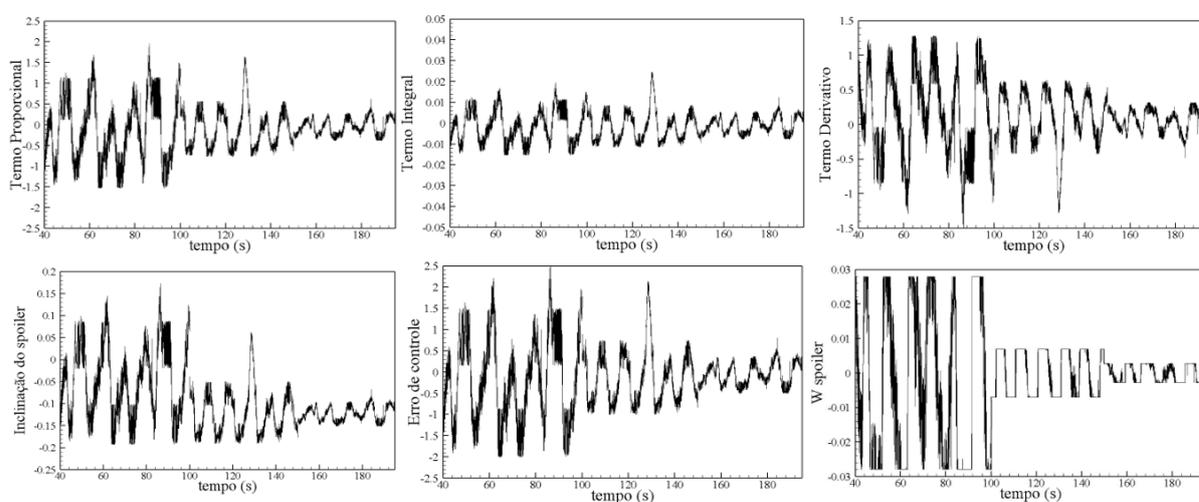


Figura 7.60 Histórico dos parâmetros da teoria de controle PID – estrutura sem abertura

O principal parâmetro das equações da teoria de controle PID é o erro, tomado como a diferença entre o parâmetro ideal de coeficiente (determinado pela análise estática) e o medido instantaneamente na água de barlavento. Este fator possui tendência de diminuição da amplitude à medida que o *spoiler* tende a estabilizar em um valor de inclinação próximo ao de referência. Transcorrido o tempo integral de 50 segundos, ou seja, depois de 90 segundos é possível notar esse decréscimo, embora seja mais acentuado a partir de 150 segundos, momento a partir do qual a inclinação torna-se pouco variável em relação ao valor ideal ( $-8^\circ$ ). Como todos os parâmetros são determinados a partir do erro de controle, a mesma tendência é percebida em todos os gráficos. Este fato confirma que o ângulo ideal para esta estrutura está muito próximo ao proposto pela análise estática. Além disso, a velocidade angular do apêndice também diminui sua amplitude de variação com o passar do tempo.

Deste modo, o controle PID incorporado à rotação do apêndice é essencial para diminuição das cargas ascensionais presentes no telhado, principalmente tratando-se de edificações baixas e leves. Em ambas configurações analisadas o alívio na pressão é percebido e torna-se maior à medida que o controle é acionado, atingindo as inclinações ideais.

Na seção seguinte, análises tridimensionais serão apresentadas considerando as configurações impermeáveis com vento incidente a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , bem como um caso relativo ao modelo *galp12* isolado e com a presença do *spoiler* acionado pelo controle.

## 7.6 ANÁLISE DE ESCOAMENTO SOBRE GALPÃO INDUSTRIAL COM SPOILER E CONTROLE PID – MODELO TRIDIMENSIONAL

Esta última etapa do estudo é destinada a demonstrar os resultados obtidos pela simulação numérica tridimensional referente ao modelo de galpão industrial estudado por Loredou-Souza (1992). Trata-se da análise dos casos *galp01*, *galp02* e *galp12* (da seção 7.4), em um escoamento tridimensional, onde os dois primeiros são utilizados com o intuito de avaliar as pressões externas, por tratar de edificações impermeáveis, onde a malha foi proposta como maneira de reproduzir com exatidão os resultados experimentais. O modelo *galp12* (edificação com uma abertura a barlavento e vento a  $90^\circ$ ) será estudado posteriormente com a inserção do *spoiler* acionado pelo controle, no entanto, entender seu comportamento isolado é essencial para avaliar as contribuições do dispositivo na mitigação de pressões. As condições de contorno, detalhamento do domínio computacional e da malha no entorno do corpo imerso são

apresentados na Figura 7.61, enquanto que as constantes físicas e geométricas estão demonstradas na Tabela 7.27. O tamanho do menor elemento próximo ao corpo e esteira foi mantido próximo a  $5 \times 10^{-4}L$ , resultando um fator  $y^+$  igual a 4,801. O tempo físico total das simulações sem a aplicação do controle está entorno de 70 segundos, pois o escoamento já estava desenvolvido neste instante. A dimensão  $L$  foi simulada com valor igual a 1, tendo em vista que o modelo levará a uma escala de 1:100 em relação ao modelo com escala real.

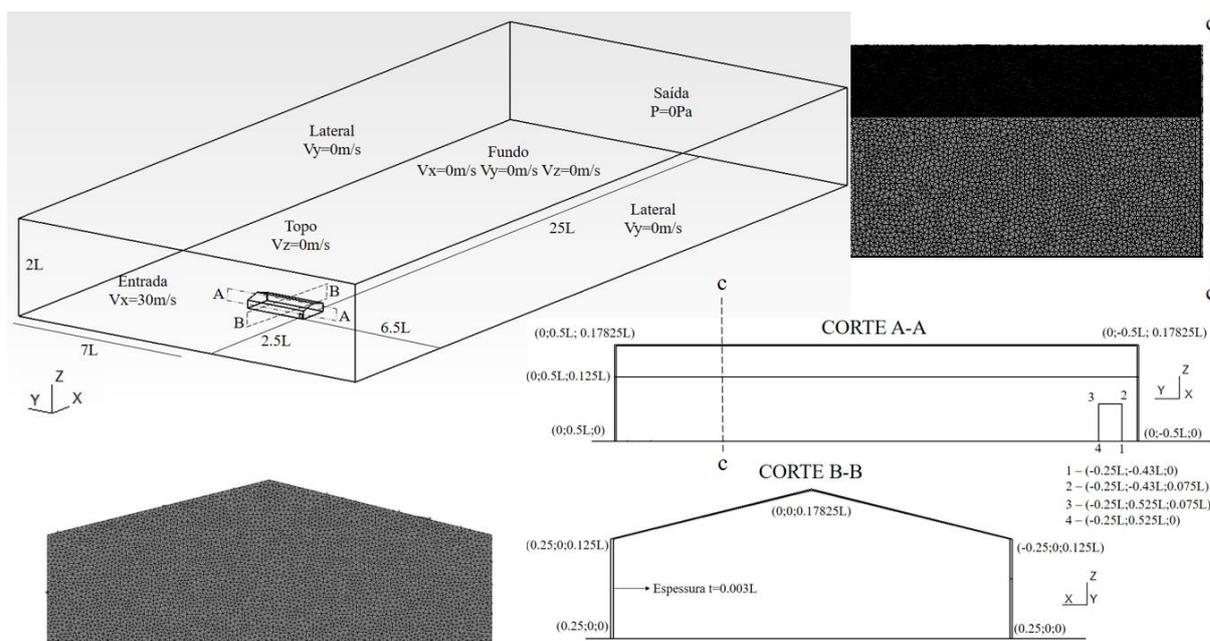


Figura 7.61 Características do domínio computacional e do galpão imerso – caracterização da malha externa do corpo nos cortes

Tabela 7.27 Constantes físicas e geométricas utilizadas na simulação tridimensional dos galpões

PARÂMETROS	VALORES
Massa específica ( $\rho$ )	1,2249 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade Dinâmica ( $\mu$ )	$3,8196 \times 10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup>
Velocidade Característica ( $V_{\infty}$ )	30,00 m/s
Dimensão característica ( $D$ )	0,17825 m
Constante de Samagorisky ( $C_s$ )	0,1
Número de Reynolds	$1,4 \times 10^5$

A seguir será apresentada uma série de comparações entre os resultados obtidos pelas simulações numéricas tri e bidimensionais deste trabalho, além das experimentais em túnel de vento, realizadas por Loredo-Souza (1992). Analisando os primeiros dois casos simulados tridimensionalmente, comparações entre os coeficientes de pressão externos são mostradas na Figura 7.62 e na Figura 7.63. A vista em planta remete ao corte situado a  $Z = 0,05 L$ , de onde os pontos de pressão foram extraídos, mesma altura da seção I, utilizada pela referência.

Percebe-se que os coeficientes obtidos na simulação 3D são mais próximos aos do túnel de vento, uma vez que os derivados da análise bidimensional são levemente superiores.

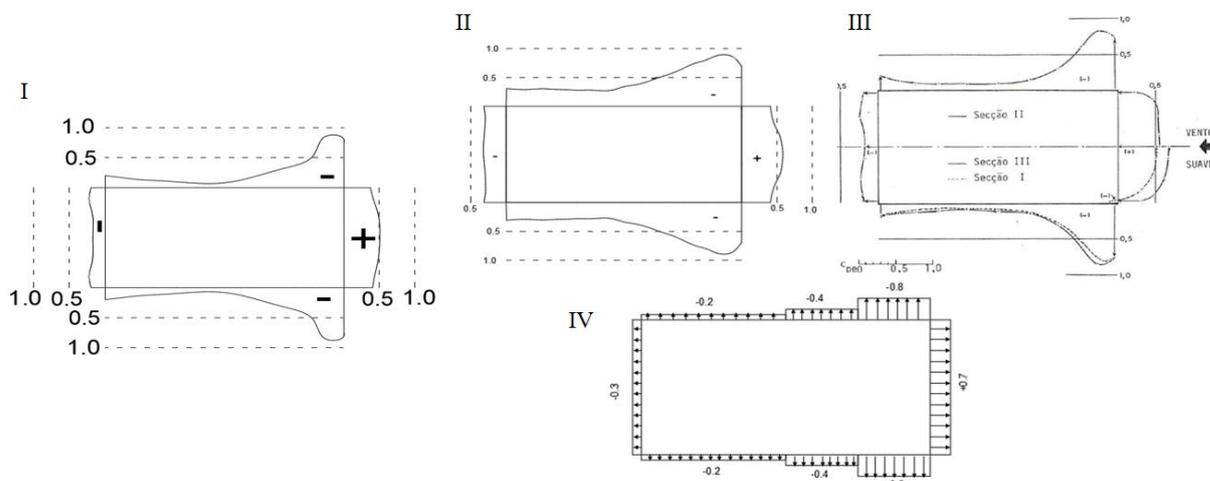


Figura 7.62 Comparação coeficientes de pressão externa para vento a  $0^\circ$ : I. corte em  $Z = 0,05 L$ ; II. simulação 2D (*galp01*); III. Loredo-Souza (1992); IV. obtidos pela NBR 6123:1988

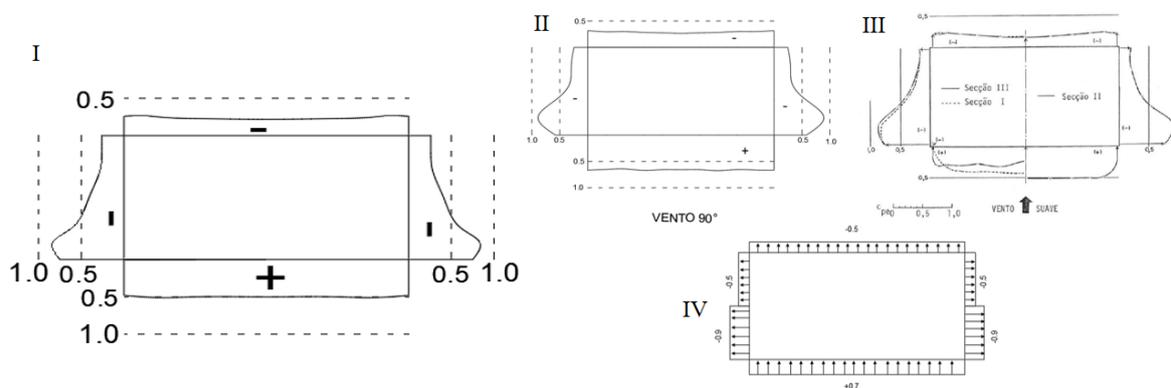


Figura 7.63 Comparação coeficientes de pressão externa para vento a  $90^\circ$ : I. corte em  $Z = 0,05 L$ ; II. simulação 2D (*galp02*); III. Loredo-Souza (1992); IV. obtidos pela NBR 6123:1988

O terceiro caso simulado (GP3D03) refere-se a um galpão semelhante ao *galp12* proposto anteriormente. Neste caso, a distribuição da pressão interna apresentou um valor para o coeficiente ( $100C_i$ ) médio, determinado a partir dos pontos expostos na Figura 7.42, igual 40 e, como visto, a norma brasileira recomenda um valor aproximado de 80, enquanto que o resultado obtido pela análise bidimensional foi de 42. A Figura 7.64 apresenta o campo de pressão obtido para o caso GP3D03, através dos cortes em  $Y = 0.45 L$ ,  $Y = -0.45 L$  (centro da abertura) e  $Z = 0.05 L$ . Observa-se que esta configuração de aberturas transmite ao interior uma grande sobrepressão, extremamente prejudicial ao telhado da edificação. No entanto, como

forma de minimizar os riscos e tentar evitar falhas estruturais, a mesma estrutura com o *spoiler* acionado pelo controle PID será avaliada posteriormente.

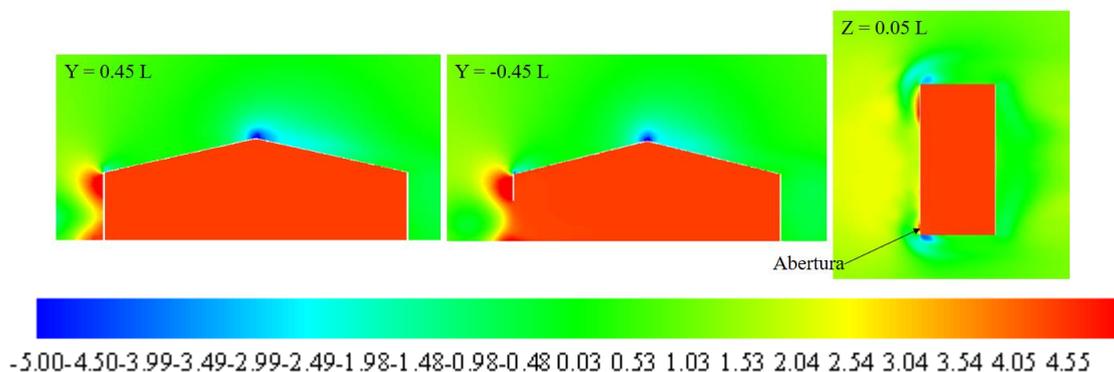


Figura 7.64 Caso GP3D03 campo de pressão – 200 níveis de -5 a 5  
Pa – cortes em  $Y = 0.45 L$ ;  $Y = -0.45 L$  e  $Z = 0.05 L$

A Tabela 7.28 traz uma comparação entre os valores dos coeficientes médios de arrasto e sustentação das paredes da estrutura para as três primeiras simulações realizadas nesta seção. Já a Tabela 7.29 apresenta a comparação e a diferença entre as medições dos coeficientes médios das forças nas direções paralelas (X) e perpendiculares (Z) ao escoamento que atua sobre a cobertura dos galpões (com vento incidindo a  $90^\circ$ ), considerando os resultados obtidos pelas simulações com corte BB, utilizadas para estudo do *spoiler* na seção anterior. Destaca-se que o quarto exemplo simulado nesta seção é denominado GP3D04 e corresponde a uma estrutura com abertura e *spoiler* inicialmente com inclinação a  $0^\circ$ , sem a aplicação do controle. Os coeficientes do estudo tridimensional apresentados a seguir foram determinados a partir de cortes (conforme exposto na Figura 7.61). Devido à pequena diferença entre os coeficientes resultantes das análises tri e bidimensional entende-se que o ajuste da constante de *Smagorinsky* foi adequado para a captação dos efeitos tridimensionais derivados da turbulência do vento.

Tabela 7.28 Comparação entre os coeficientes médios das paredes para simulações bi e tridimensionais

Estruturas – paredes externas	$C_{DM}$	$C_{LM}$	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
Galpão 3D $0^\circ$ (GP3D01)	1,047	-0,019	-
Galpão 2D $0^\circ$ ( <i>galp01</i> )	1,135	-0,049	-
Galpão 3D $90^\circ$ (GP3D02)	2,291	-0,350	-
Galpão 2D $90^\circ$ ( <i>galp02</i> )	2,563	-1,015	-
Galpão 3D com abertura $90^\circ$ (GP3D03)	2,360	0,295	0,0035
Galpão 2D com abertura $90^\circ$ ( <i>galp12</i> )	2,534	0,363	0,0036

Tabela 7.29 Comparação entre os coeficientes médios do sistema de cobertura para as simulações bi e tridimensionais

Estruturas	Água Barlavento			Água Sotavento			Cp cumeeira
	Czm	Cxm	Cpm	Czm	Cxm	Cpm	
Galpão 3D 90° (GP3D02)	2,406	-0,405	-2,514	1,162	0,585	-1,131	-2,216
Galpão 2D 90° ( <i>spl300</i> )	2,534	-0,411	-2,706	1,264	0,503	-1,213	-2,219
Diferença	5,32%	1,48%	7,64%	8,78%	14,02%	7,25%	0,14%
Galpão 3D com abertura 90° (GP3D03)	2,991	-0,579	-1,217	2,383	0,519	-1,114	-1,585
Galpão 2D com abertura 90° ( <i>spl314</i> )	3,049	-0,521	-1,214	2,555	0,539	-1,177	-1,666
Diferença	1,40%	10,02%	2,47%	7,22%	3,85%	5,65%	5,11%
Galpão 3D com <i>spoiler</i> a 0° (GP3D04)	1,931	-0,405	-1,022	2,412	0,396	-1,187	-1,109
Galpão 2D com <i>spoiler</i> a 0° ( <i>spl321</i> )	1,953	-0,407	-0,767	2,416	0,513	-1,148	-1,066
Diferença	0,10%	0,50%	24,95%	0,17%	29,55%	3,29%	4,03%

A seguir na Figura 7.65 os campos de pressão, obtidos pelas sobre os galpões estruturas com vento agindo a 0° (GP3D01) e 90° (GP3D02), podem ser visualizados.

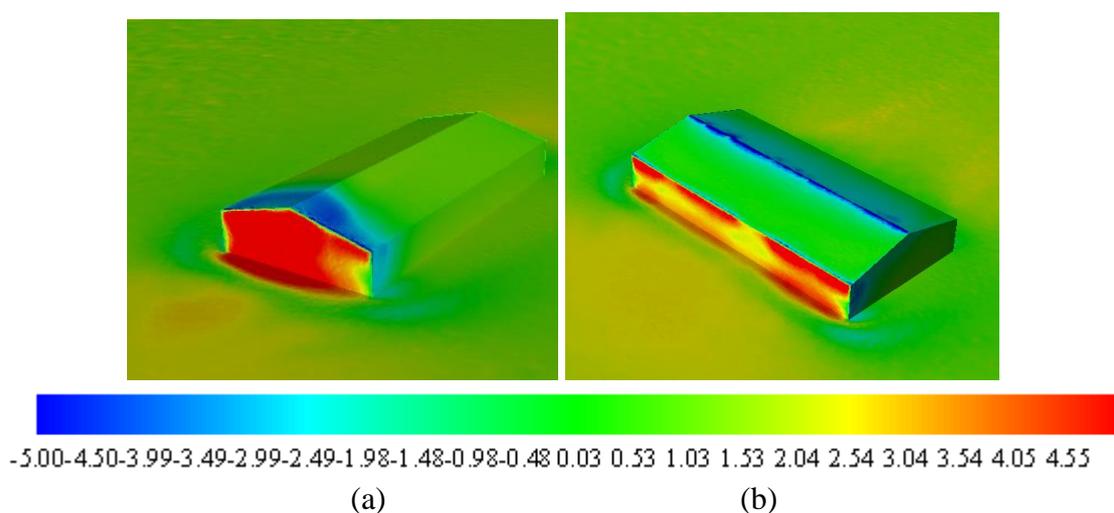


Figura 7.65 Campo de pressão – 200 níveis de -5 a 5: (a) GP3D01; (b) GP3D02

Na Figura 7.66 e na Figura 7.67 são apresentadas as linhas de corrente obtidas para os casos impermeáveis com vento a 0° e 90°, considerando a vista em planta e a tridimensional. O primeiro caso, com vento incidente a 0°, perturba mais o escoamento pela geometria da fachada a barlavento da edificação. Este caso leva ao surgimento de um pico de sucção forte agindo sobre a cobertura (Figura 7.65 a), especialmente próximo à parede de barlavento da edificação. Se houvesse uma abertura na parede referente à fachada frontal, o carregamento sobre ao telhado seria ainda maior.

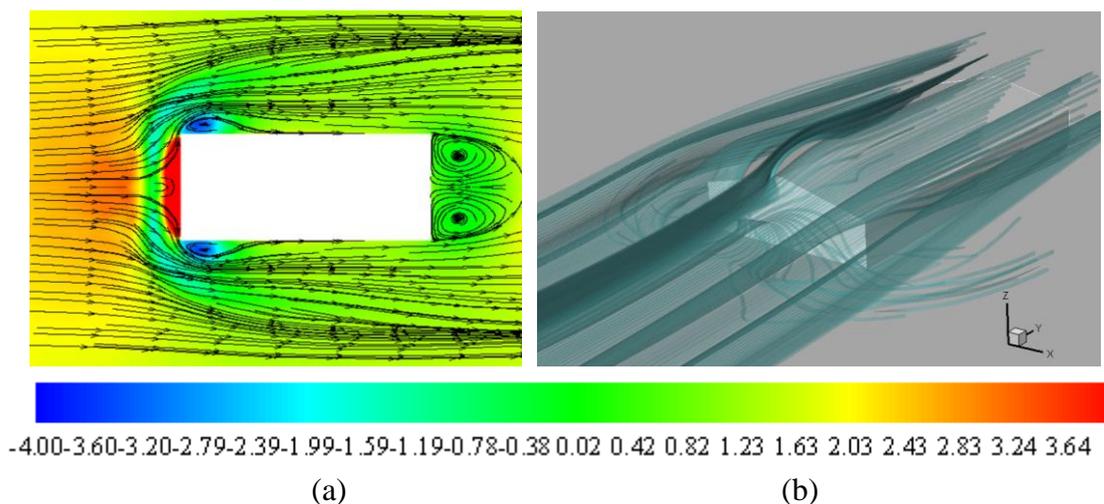


Figura 7.66 Linhas de corrente caso GP3D01: (a) Corte  $Z = 0,05 L$ ;  
(b) vista tridimensional

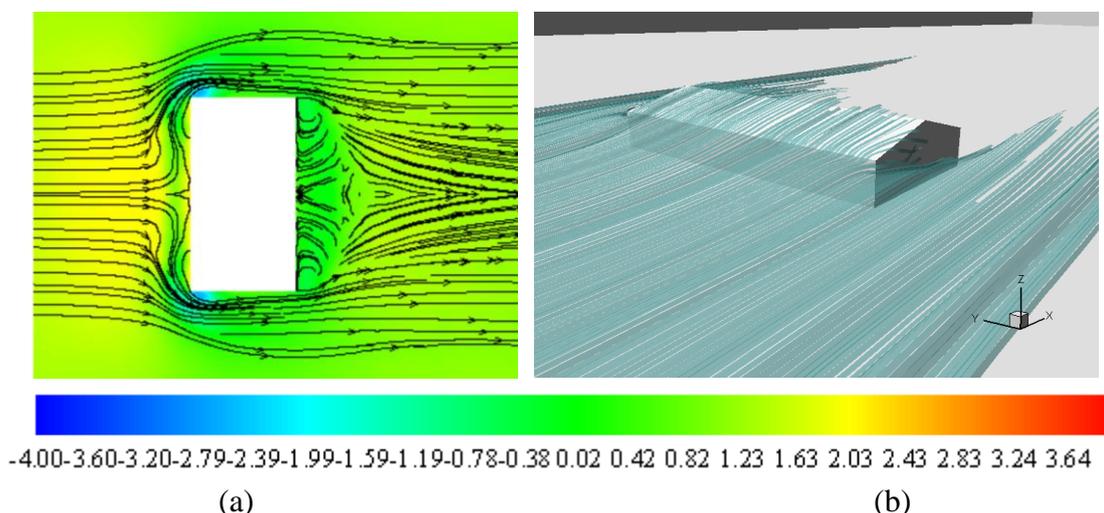
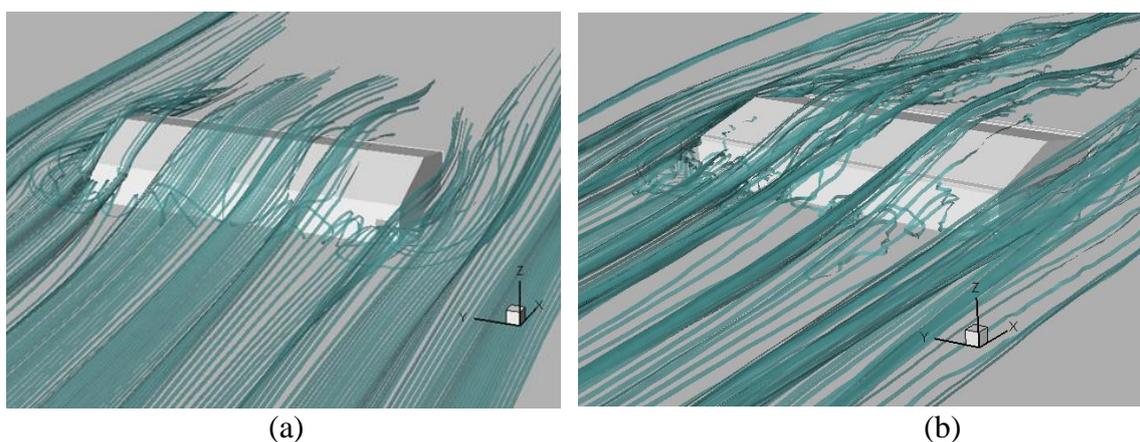


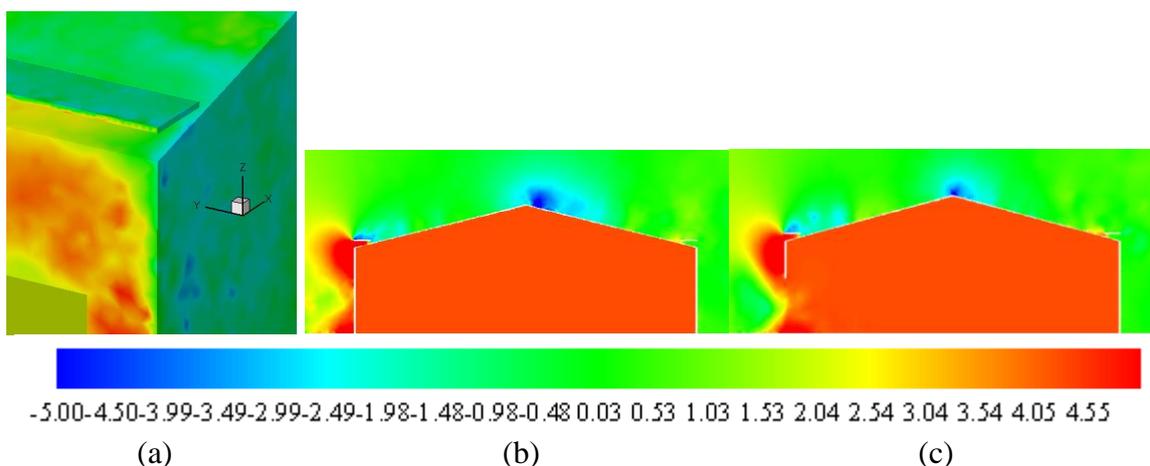
Figura 7.67 Linhas de corrente caso GP3D02: (a) Corte  $Z = 0,05 L$ ;  
(b) vista tridimensional

Com as imagens apresentadas é possível identificar que nos pontos onde ocorre a separação do escoamento (aresta do telhado na fachada de barlavento e cumeeira) existem picos de sucção. A introdução do dispositivo mitigador visa minimizar esses efeitos, levando a um alívio na carga na cobertura. Como os resultados entre as simulações tridimensionais e bidimensionais são coerentes, utilizam-se as mesmas equações e parâmetros da estrutura com aberturas para o controle PID nesta seção. Inicialmente, considera-se que o escoamento esteja plenamente desenvolvido em 20 segundos, quando o *spoiler* inicia seu movimento de rotação a partir da carga sentida na água de barlavento. As linhas de corrente observadas na Figura 7.68 Figura 7.68 remetem aos casos sem (GP3D03) e com (GP3D04) o dispositivo mitigador. Destaca-se que o *spoiler* desvia o escoamento para um plano superior ao da cobertura, no entanto, como

pode-se perceber pelo campo de pressão da Figura 7.69 (em 20 segundos), a inclinação a  $0^\circ$  ainda permite a existência de alguns efeitos nocivos na estrutura de cobertura, apesar de gerar uma sobrepressão sobre a aresta do telhado, onde antes havia sucção. Ademais, o dispositivo inserido na água a sotavento não altera o escoamento, tendo que ser adicionado somente nos casos onde a direção principal de incidência do vento é modificada.



(a) (b)  
Figura 7.68 Linhas de corrente: (a) GP3D03; (b) GP3D04



(a) (b) (c)  
Figura 7.69 Caso GP3D04: campo de pressão (a) vista tridimensional – 200 níveis de -10 a 10; (b) corte em  $Y = 0.045 L$  – 200 níveis de -5 a 5; (c) corte em  $Y = -0.045 L$  – 200 níveis de -5 a 5 Pa

Em ambas as estruturas a cumeeira é bastante afetada, mas a partir do movimento do dispositivo, com os vórtices desviados a um plano superior, obtém-se um alívio de carga nesta área. Além disso, inicialmente o *spoiler* com inclinação a  $0^\circ$  não é capaz de minimizar o efeito de sucção existente no canto detalhado pela Figura 7.69 a, enquanto que no restante do comprimento se mostra muito efetivo eliminando o pico de sucção da região. A Figura 7.70 apresenta os históricos dos coeficientes de forças sobre a água de barlavento para a edificação com *spoiler* e acionamento do controle (modelo GP3D04), onde se pode notar que a média dos

coeficientes diminuí a partir da estabilização do ângulo ideal obtido pela simulação juntamente com o controle PID. Destaca-se que o processo de estabilização se sucedeu de forma mais rápida no modelo tridimensional, mas o ângulo ideal continuou entre  $-4^\circ$  e  $-6^\circ$  (rotação no sentido horário). Entretanto, os valores médios dos coeficientes após o acionamento do controle reduziram 22% em relação a componente vertical ( $C_z$ ), mas se mantiveram semelhantes para a componente paralela ( $C_x$ ), quando comparados a análise no plano, evidenciando a boa qualidade obtida com as análises bidimensionais.

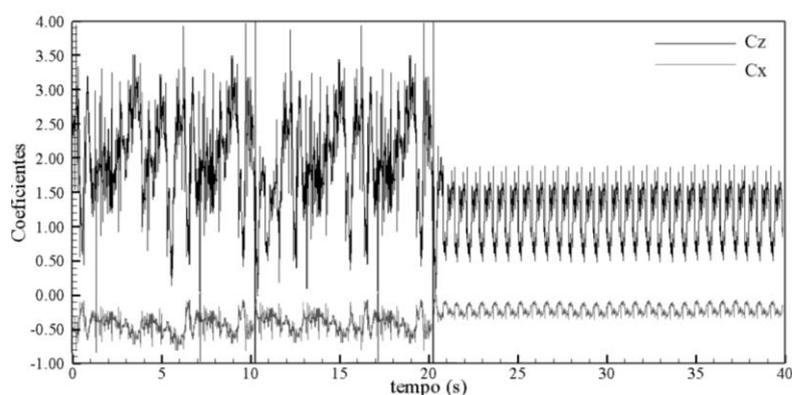


Figura 7.70 Histórico dos Coeficientes de forças nas direções Z e X existentes sobre a água de barlavento

A Figura 7.71 apresenta campos de pressão através de cortes em  $Y = -0.45L$ , para evidenciar o efeito do movimento do *spoiler* sobre a água a barlavento da edificação, considerando os modelos GP3D03 e GP3D04 antes e após a ação do controle. Percebe-se a existência de alguns pontos nocivos à estrutura do telhado, mesmo após o movimento do dispositivo, no entanto, são bem menos intensos quando comparados a estrutura isolada, garantindo a eficiência do modelo proposto para a mitigação das elevadas pressões percebidas pela cobertura da edificação.

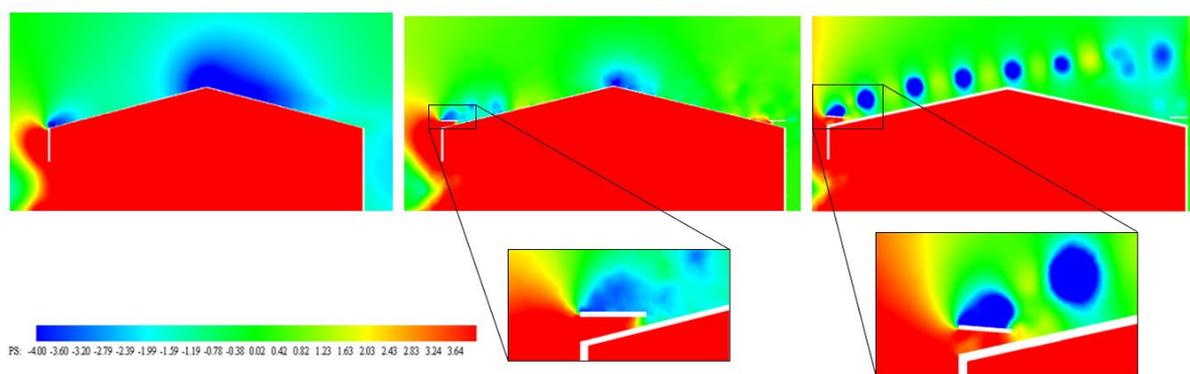


Figura 7.71 Efeito tridimensional do *spoiler* na água de barlavento – 200 níveis de -4 a 4 Pa

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho os escoamentos foram tratados como fluidos newtonianos incompressíveis, sem transporte de massa e isotérmicos. O algoritmo com método CBS semi-implícito mostrou-se adequado para simulações envolvendo ventilação e determinação de cargas de vento em edificações baixas, tipo industriais. A discretização em elementos finitos foi realizada por meio de elementos tetraédricos lineares, cujos altos refinamentos de malha exigidos reforçou a necessidade de utilização do processamento em paralelo utilizando diretivas de paralelização OpenMP.

O estudo da ventilação natural nas edificações é um tema complicado a ser considerado em projetos, uma vez que sua aplicabilidade acaba sendo defasada devido a não existência de normativas brasileiras com orientações detalhadas sobre o tema. Todavia, é necessário estabelecer as mínimas condições de ventilação para manter os ambientes salubres e arejados (ver NBR1575-1:2003) sem que haja gasto de energia não renovável para tal fim. Manter uma ventilação correta pode acarretar mais benefícios quando se relacionam as distribuições de pressões internas resultantes da circulação permanente às pressões externas.

Quando uma edificação está sujeita a ventilação natural através de elementos permanentemente abertos podem ocorrer modificações na carga estrutural. É de conhecimento geral que grande parte dos projetos de Engenharia Civil, principalmente tratando-se de edifícios baixos, possuem as ações derivadas da incidência do vento como aquelas mais significativas em coberturas. Assim, ao se retomar os primeiros problemas de pesquisa: *“como é possível determinar a influência da ventilação natural na distribuição de pressões internas nas edificações?”* a resposta deve basear-se na análise de difentes ângulos de incidência do vento atingindo as edificações com diversas combinações de aberturas permanentes, o que permite compreender o efeito dessas duas questões na distribuição de pressão interna. Dessa forma, também é possível entender *“como a disposição das aberturas pode auxiliar na mitigação das elevadas pressões atuantes no sistema de cobertura”*, bastando identificar as aberturas que, após as análises, permitiram um efeito satisfatório em relação a distribuição de pressões (transmitindo sucção ao interior), mesmo quando sujeitas a diferentes direções de vento, e obtiveram ótimos índices para avaliação da ventilação natural.

Neste estudo essas análises, partindo de duas direções principais de incidência do vento, foram realizadas para uma edificação de um galpão industrial. A avaliação quanto a ventilação natural requer a determinação de parâmetros como: vazão de ventilação e taxa de renovação do ar, que podem obedecer valores informados pelo guia AIVC (1996) para cada tipo de construção. Ademais, mesmo calculando a vazão de ventilação a partir da norma brasileira, o ideal é compreender não somente a situação com velocidades altas, mas realizar estudos de ventilação quando a edificação estiver sujeita a “ventos calmos”.

Algumas análises de modelos de edificações foram realizadas para compreender o efeito das diferentes formas de ventilação natural. Após as simulações, percebe-se que os índices mais satisfatórios foram atingidos quando a edificação estava sujeita a ventilação cruzada e, principalmente, quando as aberturas de saída do ar eram maiores que as de entrada, por permitirem um escoamento mais abrangente no interior. Por outro lado, a ventilação unilateral é uma das alternativas menos eficientes, mas muito adotada nas construções. Como forma de obter os índices necessários a fim de garantir a ventilação, as aberturas, localizadas na mesma parede, devem ser espessadas em, no mínimo, duas vezes a sua largura delas.

Assim, quando possível, deve-se preferir a disposição de aberturas em diferentes paredes da edificação, avaliando como as divisões internas influenciam no padrão do escoamento e nos índices. Ademais, ressalta-se que as direções de incidência do vento (normal, paralela e oblíqua) devem ser todas avaliadas, tendo em vista que são constantemente alteradas ao longo da vida útil das construções. Com as diretrizes apresentadas, este trabalho pretendeu servir como um estudo inicial a respeito do tema de ventilação natural, sendo necessárias mais investigações, como forma de obter todas as etapas detalhadas que um projeto deve seguir. Além disso, o estudo da ventilação e circulação do escoamento pode contribuir, quando avaliado a níveis de altas velocidades, também na forma como a distribuição das pressões internas se apresentam.

Aberturas acidentais ou mesmo permanentes, dependendo da localização, podem prejudicar o carregamento da estrutura, quando sujeita a ventos fortes, ao transmitirem uma sobrepressão ao interior. Desta maneira, o estudo a partir de galpões industriais (simulados em túnel de vento por Loredou-Souza, 1992) foi utilizado para avaliação da ventilação, mas também para a aplicabilidade de *spoilers* na cobertura, acionados a partir das formulações do controle PID, como forma de mitigar as cargas presentes nessas estruturas.

Todavia, para estabelecer os parâmetros necessários às equações da teoria de controle, duas análises foram necessárias: a estática e a dinâmica. A primeira consistiu em estudar, a partir de um modelo bidimensional, com corte transversal, como as cargas agiam sobre a estrutura dependendo da inclinação fixa proposta para o *spoiler*. Edificações com e sem abertura foram estudadas para entender o comportamento do apêndice frente a essas duas situações.

O eixo de rotação foi definido na aresta mais interna em relação à cobertura, por apresentar maiores alívios de pressão na cobertura quando comparado ao caso com eixo na aresta externa. As rotações no sentido anti-horário, partindo da horizontal ( $0^\circ$ ) até se obter uma inclinação paralela ao telhado ( $12^\circ$ ), pioraram o desempenho do *spoiler* à medida que alcançavam o limite de  $12^\circ$ . Já as rotações no sentido horário (ângulos negativos) obtiveram os melhores resultados ao desviar os vórtices, antes agindo sobre a cobertura, para um plano acima desta. Além disso, promoveram no canto de separação, onde antes eram percebidos elevados picos de sucção, um efeito de sobrepressão. Os *spoilers* presentes a barlavento da edificação alteraram de forma mais eficiente as cargas presentes na cobertura, uma vez que as placas à sotavento precisam ser inseridas quando não há previsão da direção predominante do vento. Concluiu-se, deste modo, que as pressões sentidas pela água a sotavento não são muito modificadas com a alteração da inclinação do dispositivo a barlavento. Assim, apenas as cargas da água de barlavento tiveram seus efeitos considerados para elaboração da teoria de controle. Os ângulos ideais para a estrutura impermeável ficaram em torno de  $-8^\circ$ . Já quando apresenta abertura, todos os ângulos negativos (sentido horário) são adequados devido à pouca variação dos efeitos, embora recomenda-se que fique em torno de  $-4^\circ$  a  $-6^\circ$ .

Diferentes situações podem expor o dispositivo, dependendo das características em que o escoamento é encontrado. Mas entende-se que o simples fato da inserção do *spoiler* provoca redução nos coeficientes médios das forças na cobertura em cerca de 16% para os piores resultados de inclinação (rotações no sentido anti-horário) e até de 45% de efetividade nos ângulos de melhor desempenho (rotações no sentido horário). Embora os picos de sucção possam inexistir com os ângulos de rotação horária, com as demais inclinações são minimizados em 80%. Além disso, os coeficientes de pressão média atuantes na água de barlavento apresentaram redução de 85% (estrutura permeável) e 50% (estrutura impermeável), considerando a rotação horária do *spoiler*, comparando em relação a edificação isolada e sem o perturbador. As configurações de edificação com abertura apresentam cargas mais elevadas

no telhado, no entanto, a eficácia do dispositivo é idêntica às estruturas sem abertura, como era esperado para os testes realizados.

Neste momento, a segunda análise (dinâmica) foi realizada, a qual consistia na pequena perturbação do sistema promovendo, a partir de uma velocidade angular prescrita, o movimento da placa até atingir o ângulo ideal, conforme apresentado nas simulações anteriores. A partir destas simulações chegou-se na velocidade ideal de movimento da placa ( $\omega = -0,013963$  rad/s), assim como os tempos necessários para que a mudança de inclinação ocorresse sem prejuízo ao sistema: para o caso sem abertura, 10 segundos, e com abertura, 5 segundos. O tempo necessário para a estabilização do sistema também foi considerado nas equações do controle PID.

Após a formulação completa da teoria foi proposto nas mesmas edificações a alteração da inclinação do dispositivo a partir do acionamento do controle PID, derivado das condições percebidas do escoamento. Tomando como base um escoamento em regime turbulento e um vento de perfil de velocidades uniforme atingindo a estrutura paralelamente, o efeito do movimento do *spoiler* no plano bidimensional foi o ideal para a mitigação das cargas na cobertura. As inclinações foram alteradas até que as condições limites fossem respeitadas, oscilando em torno dos valores ideais e, desta maneira, minimizaram o efeito das pressões atuantes sobre a águas do telhado das duas edificações.

Por fim, uma análise tridimensional foi proposta, considerando os casos de edificações impermeáveis com vento incidindo a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , para avaliação da pressão externa. A qual demonstrou a eficácia dos modelos bidimensionais ao serem comparados com as análises de túneis de vento e tridimensionais para este tipo de escoamento e edificação estudada. Um estudo tridimensional com a edificação com abertura e *spoiler* acionado pelo controle PID também foi realizado e os resultados sugeriram que o *spoiler* presente a barlavento desempenha papel preponderante no alívio do carregamento na cobertura e que este modelo de acionamento automático é fundamental como forma de gerar estruturas inteligentes e adaptáveis, que resultem em menores probabilidades de falhas estruturais. Deste modo, provou-se que o modelo estudado e proposto por este trabalho foi eficiente para mitigar as pressões induzidas pelo vento nas coberturas de edificações baixas.

Contudo, apesar dos resultados terem sido satisfatórios, algumas questões permanecem e devem ser melhor compreendidas, como sugestões para futuros trabalhos:

- Quanto a ventilação natural é necessário entender o efeito da temperatura internamente, como forma de satisfazer o conforto térmico dos habitantes; avaliar os efeitos de corredores de vento no entorno das edificações e como o transporte de partículas, como poluentes e poeira, se distribuem internamente. Através da teoria de controle de aberturas, propor uma edificação inteligente, que adapte a abertura e fechamento das janelas com o intuito de promover uma correta ventilação natural, a partir de efeitos da temperatura e vento incidente, respeitando as melhores combinações, para evitar a sobrecarga das paredes e coberturas;
- Propor diferentes tamanhos e quantidade de *spoilers* nas coberturas, sem que haja a necessidade de uma placa única ao longo de todo o comprimento da aba do telhado, apenas nos pontos mais críticos, como demonstrado na Seção 7.6. Simular o *spoiler* como um corpo deformável, através de elementos de casca, para melhor representar o comportamento estrutural do dispositivo. Propor diferentes formatos para o dispositivo, como uma forma mais aerodinâmica (arredondada) para evitar o efeito das altas cargas de elevação, além de entender o efeito do *spoiler* em edificações com diferentes inclinações das águas de cobertura.
- Simular o efeito do vento incidindo a  $45^\circ$  nas estruturas e como esta direção oblíqua afeta o desempenho do apêndice e da ventilação natural;

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, M. A. **Simulação numérica de tornados usando o método dos elementos finitos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ALMINHANA, G.W. **Estudo comparativo numérico-experimental das características aerodinâmicas de uma edificação alteada empregando distintas modificações de forma na seção transversal**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

<sup>a</sup> ALMINHANA, G.W.; BRAUN, A.L.; LOREDO-SOUZA, A.M. A numerical study on the aerodynamic performance of building cross-sections using corner modifications, **Latin American Journal of Solids and Structures**, vol.15(7), pp. 1–18, 2018.

<sup>b</sup> ALMINHANA, G.W.; BRAUN, A.L.; LOREDO-SOUZA, A.M. A numerical-experimental investigation on the aerodynamic performance of CAARC building models with geometric modifications, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol.180, pp. 34–48, 2018.

AIR INFILTRATION AND VENTILATION CENTRE. **A guide to energy efficient ventilation**. 1a ed. Document AIC –TN-VENTGUIDE, 1996.

ALY, A-M; BRESOWAR, J. Aerodynamic mitigation of wind-induced uplift forces on low-rise buildings: A comparative study. **Journal of Building Engineering**, vol.5, pp. 267-276, 2016.

ALY, A-M; CHOKWITTHAYA, C.; POCHE, R.; Retrofitting building roofs with aerodynamic features and solar panels to reduce hurricane damage and enhance eco-friendly energy production. **Sustainable Cities and Society**, vol. 35, pp. 581-593, 2017.

ARINAMI, Y.; AKABAYASHI, S-I.; TOMINAGA, Y.; SAKAGUCHI, J. Performance evaluation of single-sided natural ventilation for generic building using large-eddy simulations: Effect of guide vanes and adjacent obstacles. In: **Jornal Building and Environment**, n.154, p. 68-80, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. São Paulo, 2007a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-4**: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas. São Paulo, 2007a.

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

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers**, 2nd ed., Instrument Society of America, Research Triangle Park-NC 1995.

AYAD, S. S. Computational study of natural ventilation. In: **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, n.82, p.49-68, 1999.

AZZI, Z.; MORAVEJ, M.; HABTE, F.; ELAWADY, A.; CHOWDHURY, A. Roof Uplift under Cornering Winds and Wind Uplift Mitigation. **American Association for Wind Engineering Workshop**, p. 9, 2018.

BABUSKA, I. The finite element method with Lagrangian multipliers. **Numerische Mathematik**, vol. 20, pp. 179-192, 1973.

BANKS, D. **The Suction Induced by Conical Vortices on Low Rise Buildings with Flat Roofs**, Ph.D. dissertation, Colorado State University, 2000.

BARROSO, C. W. **Aplicação do Modelo CBS em Problemas da Engenharia do Vento Computacional**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BASKARAN, A.; STATHOPOULOS, T. Roof corner wind loads and parapet configurations. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol.29, pp.79–88, 1998.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Ventilação Natural em Edificações**. Editora Procel Edifica, 1ª ed., Rio de Janeiro, 2010.

BITSUAMLAK G. T., WARSIDO, W.; LEDESMA, E.; CHOWDHURY, A. G. Aerodynamic Mitigation of Roof and Wall Corner Suctions Using Simple Architectural Elements. **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 139(3), pp. 386-408, 2013.

BLESSMANN, J. **Pressão Interna**. Editora UFRGS, 3ª ed., Porto Alegre, 2013.

BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento**. Editora UFRGS, 4ª ed., Porto Alegre, 2001.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das estruturas**. Editora UFRGS, 3ª ed., Porto Alegre, 2011.

BLESSMANN, J. **Ação do vento em Telhados**. Editora UFRGS, 2ª ed., Porto Alegre, 2009.

BLOCKEN, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 129, pp. 69-102, 2014.

BOUFFANAIS, R. DEVILLE, M. O., LERICHE, E. Large-eddy simulation of the flow in a lid-driven cubical cavity. **Physics of Fluids**, vol. 19, 2007.

BRAUN, A. L. **Um modelo para simulação numérica da ação do vento sobre seções de ponte**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

BRAUN, A. L. **Simulação Numérica na Engenharia do Vento Incluindo Efeitos de Interação Fluido-Estrutura**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Rio Grandes Sul, Porto Alegre, 2002. Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2007.

BRUNO, L.; KHRIS, S. The validity of 2D numerical simulations of vertical structures around a bridge deck, *Math. Comput. Model*, vol. 37, pp.795-828, 2003.

CHENG, J.; QI, D.; KATAL, A.; WANG, L.; STATHOPOULOS, T. Evaluating Wind-driven natural ventilation potential for early building design. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 182, pp. 160-169, 2018.

CHIARELLO, J. A. **Ventilação Natural por Efeito Chaminé – Estudo de Modelo Reduzido de Pavilhões Industriais**, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

CHORIN, A. J. Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation*, vol. 22, pp. 745-762, 1968.

CODINA R.; VÁZQUEZ, M.; ZIENKIEWICZ, O. A general algorithm for compressible and incompressible flows. Part III: the semi-implicit form. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 27, pp. 13-32, 1998.

DONEA, J.; GIULIANI, S.; HALLEUX, J. P. An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 33, p. 689–723, 1982.

GEUZAIN, C.; REMACLE, J.-F. *Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(11), pp. 1309-1331, 2009.

GERMANO, M.; PIOMELLI, U.; MOIN, P.; CABOT, W. H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids*, vol. 3, pp. 1760-1765, 1991.

GHIA, U.; GHIA, K. N.; SHIN, C., T. High-Re solutions for incompressible flow using Navier-Stokes equations and multigrid method. *Journal of Computational Physics*, vol. 48, pp 387-411, 1982.

GIVONI, B. **Basic study of ventilation problems in housing in hot countries**: final report, sponsored by the ford foundation. Haifa Technion – Building Research Station, Israel Institute of Technology, 1962.

GULLBREKKEN, L.; UVSLØKK, S.; KVANDE, T.; PETTERSSON, K.; TIME, B. Wind pressure coefficients for roof ventilation purposes. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, vol. 175, pp. 144-152, 2018.

HÄGGLUND, T.; ASTRÖM, K. J. **Advanced PID Control**, Instrument Society of America, Research Triangle Park-NC 2005.

HIRT, C.W.; AMSDEN, A.A.; COOK, J.L. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds. **Journal of Computational Physics**, v. 14, p. 227-253, 1974.

HOLMES, J. D., **Wind Loading of Structures**. 3a ed. CRC Press, 2015.

HU, C-H.; OHBA, M.; YOSHIE, R. CFD modelling of unsteady cross ventilation flows using LES. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 96, pp. 1692-1706, 2008.

HUANG, P.; XINLAI, P.; GU, M. Aerodynamics devices to mitigate rooftop suction on a gable roof building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 135, pp. 90-104, 2014.

HUGHES, T.J.R.; LIU, W.K.; ZIMMERMANN, T.K. Lagrangian-Eulerian finite element formulation for incompressible viscous flows. **Computer Method in Applied Mechanics and Engineering**, v. 29, p. 329-349, 1981.

HULSURE, S.; MAURYA, R. S. Numerical Investigation of Wind Driven Natural Ventilation in a Mega Warehouse Building. **International Journal of Fluids Engineering**, vol. 11, pp. 1-23, 2019.

IQBAL, Q. M. Z.; CHAN, A. L. S. Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross-buildings: Effect of building shape, separation and orientation. **Building and Environment**, vol. 101, pp. 45-63, 2016.

ISHIHARA, T.; OH, S.; TOKUYAMA, Y. Numerical study on flow fields of tornado-like vortices using the LES turbulence model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 4, p. 239-248, 2011.

ISLAM, S. U.; ZHOU, C. Y.; SHAH, A.; XIE, P. Numerical simulation of flow past rectangular cylinders with different aspect ratios using the incompressible lattice Boltzmann method. **In: Journal of Mechanical Science and Technology**, vol.26, p.1027-1041, 2012.

IZADYAR, N.; MILLER, W.; RISMANCHI, B.; GARCIA-HANSEN, V. Impacts of façade openings' geometry on natural ventilation and occupants' perception: A review. **Building and Environment**, v.170, p.613-631,2020.

KARAVA, P. **Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation**. Quebec, Canadá: 2008. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy (Building Studies)) – The Department of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University Montreal, Quebec, Canada.

KAREEM A.; KIJEWski T.; TAMURA Y. Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, **Wind and Structures**, vol. 2(3), pp.201–251, 1999.

KLEIN, G. M. **Determinação dos Efeitos da Vizinhança na Eficiência dos Sistemas de Ventilação Natural em Pavilhões industriais**. 2012, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KOPP, G. A.; MANS, C.; SURRY, D. Wind effects of parapets on low buildings: Part 4. Mitigation of corner loads with alternative geometries. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol 93, pp. 873-888, 2005.

LETAN, R.; DUBOVSKY, V.; e ZISKIND, G. Passive ventilation heating by natural convection in a multi-storey building. In: **Building and Environment**, n.38, p.197-208, 2003.

LESOINNE, M.; FARHAT, C. Geometric conservation laws for flow problems with moving boundaries and deformable meshes, and their impact on aeroelastic computations. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 134(1-2) pp. 71-90, 1996.

LI, G.; GAN, S.; LI, H. Wind pressure mitigation on gable roofs for low-rise buings using spoilers. In: **Journal Structure Engineering**, vol.144, 2018.

LILLY, D. K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. **Physics of Fluids**, vol. 4, p.633-635, 1992.

LIU, Z.; YU, Z.; CHEN, X.; CAO, X.; ZHU, F. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations. **Building and Environment**, vol. 169, pp. 1-20, 2020.

LOREDO-SOUZA, A. M. **Influência do tipo de abertura e das características do vento simulado na pressão interna em um pavilhão industrial**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande doSul, Porto Alegre, 1992.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: MÖLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Org.).

Turbulência. **Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas**, Porto Alegre, v. 4, p. 137-163, 2004.

MADALOZZO, D. M. S. **Simulação Numérica da Dispersão de Poluentes em Zonas Urbanas Considerando Efeitos Térmicos**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande doSul, Porto Alegre.

MAKOWSKI, D. G. **Ação do vento em coberturas isoladas**, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

MASUYAMA, Y.; UEMATSU, Y.; NAKAMURA, O.; OKUDA, Y.; Characteristics of local wind forces on the edges of signboards installed on the rooftops of buildings. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, vol. 206, pp 104299-104315, 2020.

MOONEGUI, M. A.; KARGARMOAKHAR, R. Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review. In: **Journal of Building Engineering**, n.6, pp. 225-235, 2016.

MURAKAMI, S. Overview of turbulence models applied in CWE–1997. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 74, pp. 1-24, 1997.

NATALINI, B.; NATALINI, M. B. Wind loads on buildings with vaulted roofs and side walls – A review. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 161, pp. 9-16, 2017.

NITHIARASU, P. An efficient artificial compressibility (AC) scheme based on the characteristic based split (CBS) method for incompressible flows. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, vol. 56, pp. 1815-1845, 2003.

NITHIARASU, P.; LEWIS, W. R.; SEETHARAMU, K. N. **Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Mass Transfer**, 2<sup>th</sup>ed., Wiley Series in Computational Mechanics, 2016.

NUNES, D. A. **Estudo da Ventilação Natural por Efeito do Vento em Pavilões Industriais Utilizando Modelos Reduzidos**, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O'DWYER, A. **PI and PID Controller Tuning Rules**, 2<sup>a</sup> ed., Imperial College Press, 2006.

OGATA, K. **Modern Control Engineering**, 5<sup>th</sup> ed., Pearson Prentice Hall, New York, 2010.

OMRANI, A.; GARCIA-HANSEN, V.; CAPRA, B.; DROGEMULLER, R. Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools. In: **Building and Environment**, vol.116, pp. 182-194, 2017.

PERÉN, J. I.; VAN HOOFF, T.; LEITE, B. C. C.; BLOCKEN, B. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric openings positions: Impacto of roof angle and opening location. In **Building and Environment**, vol.85, pp. 263-276, 2015.

PINDADO, S.; MESEGUER, J. Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 91, pp. 1133–1139, 2009.

PRASAD, D.; ULIATE, T.; AHMED, M.R. Wind loads on low-rise building models with different roof configurations. **International Journal of Fluid Mechanics Research**, vol. 36(3), pp.231–243, 2009.

RAJAGOPALAN, P. Advances in Wind tunnel and CFD analysis. **In: Building Design in Hot-Humid climates**, vol.1 , pp.151-164, 2019.

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **In: ASME Journal of Fluid Engineering**, vol. 29, pp. 123-162,1997.

ROBERTSON, A.P. Effect of eaves detail on wind pressures over an industrial building, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 38, pp. 325–333, 1991.

ROSSA, A. L. **Um esquema semi-implícito para a simulação numérica de escoamentos incompressíveis não-isotérmicos via o M.E.F. usando a técnica de Taylor-Galerkin**, 2000. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

SALES, G. L. **Diagrama de Ventilação Natural: Ferramenta de Análise do Potencial da Ventilação Natural no Estudo Preliminar de Projeto**. Brasília: UNB, 2016. Tese de Doutorado, PPGAU/UNB, Brasília, 2016.

SANGALLI, L. A. **Análise Numérica da Ação do Vento sobre Pontes com Sistemas de Controle de Vibrações**. 2019. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SANGALLI, L. A.; BRAUN, A. L. A fluid-structure interaction model for numerical simulation of bridge flutter using sectional models with active control devices. Preliminary results. **Journal of Sound And Vibration**, v. 477, p. 115338, 2020.

SCHLICHTING, H. **Boundary-layer Theory**. 9ª ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations, I, the basic experiment. **Monthly Weather Review**, vol. 91, pp. 99-135, 1963.

STRAW, M. P. **Computational and measurement of Wind induced ventilation**. United Kingdom: University of Nottingham, 2000. PhD thesis, United Kingdom, 2000.

SUARIS, W.; IRWIN, P. Effect of roof-edge parapets on mitigating extreme roof suctions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol 98, pp. 483-491, 2010.

SURRY, D.; LIN, J.X. The effect of surroundings and roof corner geometric modifications on roof pressures on low-rise buildings, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** vol. 58, pp.113–138, 1995.

TEIXEIRA, P. R. F. **Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o Método dos**

**Elementos Finitos.** Porto Alegre: UFRGS, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

TEZDUYAR, T. E.; MITTAL, S.; SHIH, R. Time-accurate Incompressible Flow Computations with Quadrilateral Velocity-Pressure Elements. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 87, pp.363-384, 1991.

THOMAS, P.D.; LOMBARD, C.K. **Geometric conservation law and its application to flow computations on moving grids.** AIAA JI 17, 1030 (1979).

TOMINAGA, Y.; BLOCKEN, B. Wind tunnel of flow and dispersion in cross-ventilated isolated buildings: Impact of opening positions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 155, pp. 74-88, 2016.

TONG, Z.; CHEN, Y.; MALKAXI, A. Defining the Influence Region in neighborhood-scale CFD simulations for natural ventilation design. **In: Applied Energy**, vol. 182, pp. 625-633, 2016.

YU, D.; KAREEM, A. Two-dimensional simulation of flow around rectangular prisms. **In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 62, p.131-161, 1996.

WU, F. **Full-scale study of conical vortices and their effects near corners**, Texas Tech University. Lubbock, Texas, 2000.

ZHENG, J.; TAO, Q.; LI, L. Wind Pressure Coefficient on a Multi-Storey Building with External Shading Louvers. **Applied Sciences**, vol. 10, pp. 1127-1130, 2020.

ZHONG, H-Y.; ZHANG, D-D.; LIU D.; ZHAO, F-Y.; LI, Y.; WANG, H-Q. Two-dimensional numerical simulation of wind driven ventilation across a building enclosure with two free apertures on the rear side: Vortex shedding and “pumping flow mechanism”. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, n.179, p.449-462, 2018.

ZHU, D. Study on Facade Openings Design Method Responding to Urban Ventilation Issue in High Density Cities. **In: Procedia Engineering**, vol.169, pp. 133-141, 2016.

ZIENKIEWICZ, O. C.; CODINA, R. A general algorithm for compressible and incompressible flow. Part I: The split characteristic-based scheme. **International Journal for Numerical Methods in Fluid**, vol. 20, pp. 869-885, 1995.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; NITHIARASU, P. **The Finite Element Method for Fluid Dynamics**. 7. ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2014.

## APÊNDICE A - FORMULAÇÃO DOS ELEMENTOS ADOTADOS

Neste trabalho foi utilizado um modelo tridimensional de elementos tetraédricos. A Figura A.1 mostra as numerações locais dos nós.

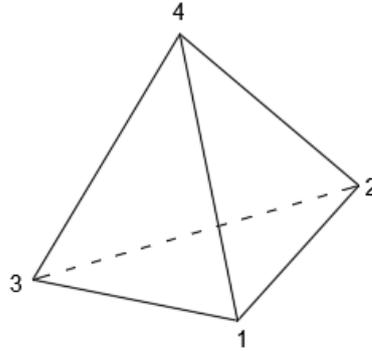


Figura A.1: Elemento tetraédrico

As funções de interpolação do elemento tetraédrico linear são demonstradas em função de coordenadas de volume, as quais cumprem a seguinte condição:

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = 1 \quad (\text{A.1})$$

As coordenadas cartesianas de um ponto no interior do elemento podem ser expressas em função das de volume de acordo com as equações da sequência:

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i x_i \quad (\text{A.2})$$

$$y = \sum_{i=1}^4 N_i y_i \quad (\text{A.3})$$

$$z = \sum_{i=1}^4 N_i z_i \quad (\text{A.4})$$

onde  $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$  são as coordenadas nodais e as coordenadas de volume  $N_i$  são definidas por:

$$N_i = \frac{1}{6\Omega_e} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z)$$

$$a_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad b_i = - \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad c_i = \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{vmatrix} \quad d_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_l & y_l & 1 \end{vmatrix} \quad (\text{A.5})$$

A permutação cíclica nos índices  $i, j, k$  e  $l$  é adotada. Assim, o volume do elemento  $\Omega_e$  pode ser definido através da aplicação do teorema de Laplace sobre a matriz:

$$\Omega_e = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (\text{A.6})$$

As derivadas das coordenadas de volume em relação às coordenadas cartesianas são apresentadas na sequência:

$$\frac{\partial N_i}{\partial x} = \frac{b_i}{6\Omega_e} \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial y} = \frac{c_i}{6\Omega_e} \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial z} = \frac{d_i}{6\Omega_e} \quad (\text{A.9})$$

Para integração das matrizes de elemento do modelo CBS adota-se aqui as seguintes fórmulas para integrais de volume e área (ou superfície):

$$\int_{\Omega_e} N_1^\alpha N_2^\beta N_3^\gamma N_4^\delta dV = 6\Omega_e \frac{\alpha! \beta! \gamma! \delta!}{(\alpha + \beta + \gamma + \delta + 3)!} \quad (\text{A.10})$$

$$\int_{A_e} N_1^\alpha N_2^\beta N_3^\gamma dA = 2A_e \frac{\alpha! \beta! \gamma!}{(\alpha + \beta + \gamma + 2)!} \quad (\text{A.11})$$

Assim, a matriz de massa para o elemento fica expressa da seguinte forma:

$$\int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega = \int_{\Omega_e} \begin{bmatrix} N_1^2 & N_1 N_2 & N_1 N_3 & N_1 N_4 \\ N_2 N_1 & N_2^2 & N_2 N_3 & N_2 N_4 \\ N_3 N_1 & N_3 N_2 & N_3^2 & N_3 N_4 \\ N_4 N_1 & N_4 N_2 & N_4 N_3 & N_4^2 \end{bmatrix} d\Omega \quad (\text{A.12})$$

Aplicando a integral descrita pela Equação (A.12) nas equações informadas anteriormente, obtém-se:

$$\mathbf{M} = \frac{\Omega_e}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

$$\mathbf{M}_D = \frac{\Omega_e}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

onde  $\mathbf{M}$  é a matriz de massa consistente e  $\mathbf{M}_D$  a matriz de massa discreta.

De forma semelhante, a matriz de advecção pode ser definida como:

$$\int_{\Omega_e} \mathbf{N} (\mathbf{N} \mathbf{v}_j^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega_e} \frac{v_1^M}{6\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Omega_e} \frac{v_2^M}{6\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{c} d\Omega + \int_{\Omega_e} \frac{v_3^M}{6\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{d} d\Omega \quad (\text{A.15})$$

onde o valor “M” sobrescrito representa o valor médio no elemento.

Resolvendo cada termo da equação anterior separadamente e aplicando a integral, obtém-se:

$$\int_{\Omega_e} \frac{v_1^M}{6\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{b} d\Omega = \int_{\Omega_e} \frac{v_1^M}{6\Omega_e} \begin{bmatrix} N_1 b_1 & N_1 b_2 & N_1 b_3 & N_1 b_4 \\ N_2 b_1 & N_2 b_2 & N_2 b_3 & N_2 b_4 \\ N_3 b_1 & N_3 b_2 & N_3 b_3 & N_3 b_4 \\ N_4 b_1 & N_4 b_2 & N_4 b_3 & N_4 b_4 \end{bmatrix} d\Omega = \frac{v_1^M}{24} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

$$\int_{\Omega_e} \frac{v_2^M}{6\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{c} d\Omega = \frac{v_2^M}{24} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

$$\int_{\Omega_e} \frac{v_3^M}{6\Omega_e} \mathbf{N}^T \mathbf{d} d\Omega = \frac{v_3^M}{24} \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

A matriz de estabilização para a obtenção do campo de velocidades intermediário é definida pela expressão abaixo:

$$\int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_k} (\mathbf{N} \mathbf{v}_k^n) (\mathbf{N} \mathbf{v}_j^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega_e} \frac{1}{36\Omega_e^2} \left[ \begin{array}{l} v_1^M v_1^M \mathbf{b}^T \mathbf{b} + v_1^M v_2^M \mathbf{b}^T \mathbf{c} + v_1^M v_3^M \mathbf{b}^T \mathbf{d} + \\ v_2^M v_1^M \mathbf{c}^T \mathbf{b} + v_2^M v_2^M \mathbf{c}^T \mathbf{c} + v_2^M v_3^M \mathbf{c}^T \mathbf{d} + \\ v_3^M v_1^M \mathbf{d}^T \mathbf{b} + v_3^M v_2^M \mathbf{d}^T \mathbf{c} + v_3^M v_3^M \mathbf{d}^T \mathbf{d} \end{array} \right] d\Omega \quad (\text{A.19})$$

Resolvendo novamente a integral, obtém-se:

$$\mathbf{S}_v = \frac{1}{36\Omega_e} \left\{ \begin{array}{l} v_1^M v_1^M \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 & b_1 b_4 \\ b_2 b_1 & b_2^2 & b_2 b_3 & b_2 b_4 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3^2 & b_3 b_4 \\ b_4 b_1 & b_4 b_2 & b_4 b_3 & b_4^2 \end{bmatrix} + v_1^M v_2^M \begin{bmatrix} b_1 c_1 & b_1 c_2 & b_1 c_3 & b_1 c_4 \\ b_2 c_1 & b_2 c_2 & b_2 c_3 & b_2 c_4 \\ b_3 c_1 & b_3 c_2 & b_3 c_3 & b_3 c_4 \\ b_4 c_1 & b_4 c_2 & b_4 c_3 & b_4 c_4 \end{bmatrix} + \\ v_1^M v_3^M \begin{bmatrix} b_1 d_1 & b_1 d_2 & b_1 d_3 & b_1 d_4 \\ b_2 d_1 & b_2 d_2 & b_2 d_3 & b_2 d_4 \\ b_3 d_1 & b_3 d_2 & b_3 d_3 & b_3 d_4 \\ b_4 d_1 & b_4 d_2 & b_4 d_3 & b_4 d_4 \end{bmatrix} + v_2^M v_1^M \begin{bmatrix} c_1 b_1 & c_1 b_2 & c_1 b_3 & c_1 b_4 \\ c_2 b_1 & c_2 b_2 & c_2 b_3 & c_2 b_4 \\ c_3 b_1 & c_3 b_2 & c_3 b_3 & c_3 b_4 \\ c_4 b_1 & c_4 b_2 & c_4 b_3 & c_4 b_4 \end{bmatrix} + \\ v_2^M v_2^M \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 & c_1 c_4 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 & c_2 c_4 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 & c_3 c_4 \\ c_4 c_1 & c_4 c_2 & c_4 c_3 & c_4^2 \end{bmatrix} + v_2^M v_3^M \begin{bmatrix} c_1 d_1 & c_1 d_2 & c_1 d_3 & c_1 d_4 \\ c_2 d_1 & c_2 d_2 & c_2 d_3 & c_2 d_4 \\ c_3 d_1 & c_3 d_2 & c_3 d_3 & c_3 d_4 \\ c_4 d_1 & c_4 d_2 & c_4 d_3 & c_4 d_4 \end{bmatrix} + \\ v_3^M v_1^M \begin{bmatrix} d_1 b_1 & d_1 b_2 & d_1 b_3 & d_1 b_4 \\ d_2 b_1 & d_2 b_2 & d_2 b_3 & d_2 b_4 \\ d_3 b_1 & d_3 b_2 & d_3 b_3 & d_3 b_4 \\ d_4 b_1 & d_4 b_2 & d_4 b_3 & d_4 b_4 \end{bmatrix} + v_3^M v_2^M \begin{bmatrix} d_1 c_1 & d_1 c_2 & d_1 c_3 & d_1 c_4 \\ d_2 c_1 & d_2 c_2 & d_2 c_3 & d_2 c_4 \\ d_3 c_1 & d_3 c_2 & d_3 c_3 & d_3 c_4 \\ d_4 c_1 & d_4 c_2 & d_4 c_3 & d_4 c_4 \end{bmatrix} + \\ v_3^M v_3^M \begin{bmatrix} d_1^2 & d_1 d_2 & d_1 d_3 & d_1 d_4 \\ d_2 d_1 & d_2^2 & d_2 d_3 & d_2 d_4 \\ d_3 d_1 & d_3 d_2 & d_3^2 & d_3 d_4 \\ d_4 d_1 & d_4 d_2 & d_4 d_3 & d_4^2 \end{bmatrix} \end{array} \right\} \quad (\text{A.20})$$

A matriz de estabilização utilizada no passo de correção de velocidades é definida por:

$$\mathbf{S}_i^p = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_k} (\mathbf{N} \mathbf{v}_k^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} d\Omega \quad (\text{A.21})$$

Desmembrando a expressão acima conforme o valor adotado para  $i$ , obtêm-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned}
\int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_k} (\mathbf{N} \mathbf{v}_k^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_1} d\Omega &= \frac{1}{36\Omega_e^2} \left( \int_{\Omega_e} \mathbf{b}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_1^n) \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{c}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_2^n) \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{d}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_3^n) \mathbf{b} d\Omega \right) = \\
\frac{1}{36\Omega_e} &\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 & b_1 b_4 \\ b_2 b_1 & b_2^2 & b_2 b_3 & b_2 b_4 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3^2 & b_3 b_4 \\ b_4 b_1 & b_4 b_2 & b_4 b_3 & b_4^2 \end{bmatrix} v_1^M + \begin{bmatrix} c_1 b_1 & c_1 b_2 & c_1 b_3 & c_1 b_4 \\ c_2 b_1 & c_2 b_2 & c_2 b_3 & c_2 b_4 \\ c_3 b_1 & c_3 b_2 & c_3 b_3 & c_3 b_4 \\ c_4 b_1 & c_4 b_2 & c_4 b_3 & c_4 b_4 \end{bmatrix} v_2^M + \\ \begin{bmatrix} d_1 b_1 & d_1 b_2 & d_1 b_3 & d_1 b_4 \\ d_2 b_1 & d_2 b_2 & d_2 b_3 & d_2 b_4 \\ d_3 b_1 & d_3 b_2 & d_3 b_3 & d_3 b_4 \\ d_4 b_1 & d_4 b_2 & d_4 b_3 & d_4 b_4 \end{bmatrix} v_3^M \end{array} \right\} \quad (\text{A.22})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_k} (\mathbf{N} \mathbf{v}_k^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_2} d\Omega &= \frac{1}{36\Omega_e^2} \left( \int_{\Omega_e} \mathbf{b}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_1^n) \mathbf{c} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{c}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_2^n) \mathbf{c} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{d}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_3^n) \mathbf{c} d\Omega \right) = \\
\frac{1}{36\Omega_e} &\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} b_1 c_1 & b_1 c_2 & b_1 c_3 & b_1 c_4 \\ b_2 c_1 & b_2 c_2 & b_2 c_3 & b_2 c_4 \\ b_3 c_1 & b_3 c_2 & b_3 c_3 & b_3 c_4 \\ b_4 c_1 & b_4 c_2 & b_4 c_3 & b_4 c_4 \end{bmatrix} v_1^M + \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 & c_1 c_4 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 & c_2 c_4 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 & c_3 c_4 \\ c_4 c_1 & c_4 c_2 & c_4 c_3 & c_4^2 \end{bmatrix} v_2^M + \\ \begin{bmatrix} d_1 c_1 & d_1 c_2 & d_1 c_3 & d_1 c_4 \\ d_2 c_1 & d_2 c_2 & d_2 c_3 & d_2 c_4 \\ d_3 c_1 & d_3 c_2 & d_3 c_3 & d_3 c_4 \\ d_4 c_1 & d_4 c_2 & d_4 c_3 & d_4 c_4 \end{bmatrix} v_3^M \end{array} \right\} \quad (\text{A.23})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_k} (\mathbf{N} \mathbf{v}_k^n) \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_3} d\Omega &= \frac{1}{36\Omega_e^2} \left( \int_{\Omega_e} \mathbf{b}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_1^n) \mathbf{d} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{c}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_2^n) \mathbf{d} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{d}^T (\mathbf{N} \mathbf{v}_3^n) \mathbf{d} d\Omega \right) = \\
\frac{1}{36\Omega_e} &\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} b_1 d_1 & b_1 d_2 & b_1 d_3 & b_1 d_4 \\ b_2 d_1 & b_2 d_2 & b_2 d_3 & b_2 d_4 \\ b_3 d_1 & b_3 d_2 & b_3 d_3 & b_3 d_4 \\ b_4 d_1 & b_4 d_2 & b_4 d_3 & b_4 d_4 \end{bmatrix} v_1^M + \begin{bmatrix} c_1 d_1 & c_1 d_2 & c_1 d_3 & c_1 d_4 \\ c_2 d_1 & c_2 d_2 & c_2 d_3 & c_2 d_4 \\ c_3 d_1 & c_3 d_2 & c_3 d_3 & c_3 d_4 \\ c_4 d_1 & c_4 d_2 & c_4 d_3 & c_4 d_4 \end{bmatrix} v_2^M + \\ \begin{bmatrix} d_1^2 & d_1 d_2 & d_1 d_3 & d_1 d_4 \\ d_2 d_1 & d_2^2 & d_2 d_3 & d_2 d_4 \\ d_3 d_1 & d_3 d_2 & d_3^2 & d_3 d_4 \\ d_4 d_1 & d_4 d_2 & d_4 d_3 & d_4^2 \end{bmatrix} v_3^M \end{array} \right\} \quad (\text{A.24})
\end{aligned}$$

A matriz de difusão da equação de balanço de momento é obtida usando-se a seguinte expressão:

$$\mathbf{D} = \int_{\Omega_e} (\nu + \nu_t) \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_j} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} d\Omega = \frac{(\nu + \nu_t)}{36\Omega_e^2} \int_{\Omega_e} [\mathbf{b}^T \mathbf{b} + \mathbf{c}^T \mathbf{c} + \mathbf{d}^T \mathbf{d}] d\Omega \quad (\text{A.25})$$

Logo:

$$\mathbf{D} = \frac{(\nu + \nu_t)}{36\Omega_e} \left\{ \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{cccc} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 & b_1 b_4 \\ b_2 b_1 & b_2^2 & b_2 b_3 & b_2 b_4 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3^2 & b_3 b_4 \\ b_4 b_1 & b_4 b_2 & b_4 b_3 & b_4^2 \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{cccc} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 & c_1 c_4 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 & c_2 c_4 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 & c_3 c_4 \\ c_4 c_1 & c_4 c_2 & c_4 c_3 & c_4^2 \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{cccc} d_1^2 & d_1 d_2 & d_1 d_3 & d_1 d_4 \\ d_2 d_1 & d_2^2 & d_2 d_3 & d_2 d_4 \\ d_3 d_1 & d_3 d_2 & d_3^2 & d_3 d_4 \\ d_4 d_1 & d_4 d_2 & d_4 d_3 & d_4^2 \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (\text{A.26})$$

As matrizes de gradiente podem ser obtidas através da equação a seguir:

$$\mathbf{G}_i = \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} d\Omega \quad (\text{A.27})$$

Resolvendo a integral apresentada anteriormente e considerando os valores de  $j$  iguais a 1, 2 e 3, são obtidas as três matrizes de gradiente das seguintes expressões:

$$\mathbf{G}_1 = \frac{1}{24} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.28})$$

$$\mathbf{G}_2 = \frac{1}{24} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.29})$$

$$\mathbf{G}_3 = \frac{1}{24} \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.30})$$

Já a matriz proveniente da integração por partes do laplaciano da pressão é dada através de:

$$\mathbf{H} = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x_i} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} d\Omega = \frac{1}{36\Omega_e^2} \left( \int_{\Omega_e} \mathbf{b}^T \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{c}^T \mathbf{c} d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{d}^T \mathbf{d} d\Omega \right) \quad (\text{A.31})$$

Resolvendo as integrais, obtém-se:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{36\Omega_e} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 + d_1^2 & b_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & b_1b_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & b_1b_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ b_2b_1 + c_2c_1 + d_2d_1 & b_2^2 + c_2^2 + d_2^2 & b_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & b_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ b_3b_1 + c_3c_1 + d_3d_1 & b_3b_2 + c_3c_2 + d_3d_2 & b_3^2 + c_3^2 + d_3^2 & b_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ b_4b_1 + c_4c_1 + d_4d_1 & b_4b_2 + c_4c_2 + d_4d_2 & b_4b_3 + c_4c_3 + d_4d_3 & b_4^2 + c_4^2 + d_4^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.32})$$

Finalmente, os vetores de forças e termos de contorno vêm dados por:

$$\mathbf{f}_i = \frac{1}{\rho} \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T f_i d\Omega + (\nu + \nu_t) \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \left( \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_j} n_j \mathbf{v}_i^n \right) d\Gamma = \frac{\Omega_e}{4} g_i \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{\Gamma_e}{3} \frac{(\nu + \nu_t)}{6\Omega_e} \left\{ \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} n_1 + \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} n_2 + \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} n_3 \right\} \begin{Bmatrix} (v_i^n)_1 \\ (v_i^n)_2 \\ (v_i^n)_3 \\ (v_i^n)_4 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.33})$$

$$\mathbf{f}_p = \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \left( \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} n_i \mathbf{p}^n \right) d\Gamma = \frac{\Gamma_e}{3} \frac{1}{6\Omega_e} \left\{ \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} n_1 + \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} n_2 + \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} n_3 \right\} \begin{Bmatrix} p_1^n \\ p_2^n \\ p_3^n \\ p_4^n \end{Bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

Nas expressões acima, foi considerado que a face de contorno do elemento  $\Gamma_e$  é formada pelos nós 1, 2 e 3.