



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ALICE COSTA DE ALMEIDA

**ESTUDO NUMÉRICO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM
ARRANJO DE EDIFICAÇÕES DISTRIBUÍDAS EM SÉRIE**

Caruaru
2023

ALICE COSTA DE ALMEIDA

**ESTUDO NUMÉRICO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM
ARRANJO DE EDIFICAÇÕES DISTRIBUÍDAS EM SÉRIE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Bono

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Luis Braun

Caruaru
2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

A447e Almeida, Alice Costa de.
Estudo numérico da ventilação natural em arranjo de edificações distribuídas em série. / Alice Costa de Almeida. – 2023.
144 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Gustavo Bono.
Coorientador: Alexandre Luis Braun
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.
Inclui Referências.

1. Ventilação. 2. Edifícios – Engenharia ambiental. 3. Aclimação. 4. Fluidodinâmica computacional. 5. Software. 6. OpenFOAM. I. Bono, Gustavo (Orientador). II. Braun, Alexandre Luis (Coorientador). III. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2023-086)

ALICE COSTA DE ALMEIDA

ESTUDO NUMÉRICO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM ARRANJO DE EDIFICAÇÕES DISTRIBUÍDAS EM SÉRIE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em: 30/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Mariana Fernandes dos Santos Villela (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Renato Vaz Linn (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Aos meus pais, Arlete e Anailton,
pelo apoio e carinho incondicional.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Arlete e Anailton, que são tudo que há de mais extraordinário na minha vida. Em especial ao meu pai, do qual herdei a paixão pelos cálculos. Um grande homem que mesmo sem diploma ou conhecimento teórico é o melhor construtor de lares e realizador de sonhos.

Agradeço ao meu orientador, professor Gustavo Bono, pela paciência, compreensão e ajuda no meu processo de adaptação nessa área.

Ao meu coorientador, professor Alexandre Braun, pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

A ti, Vinícius, por todo amor e companheirismo.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo auxílio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

À comunidade do OpenFOAM, presente em fóruns de dúvidas, pela grande ajuda e contribuição para realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos, Arthur e Edmilson, que me acompanharam nessa trajetória acadêmica, e em especial a Arthur, que contribuiu com o processo de manipulação do *software*, modelagem e preparação dos arquivos, além da parceria no desenvolvimento de trabalhos. Ele será um excelente professor.

RESUMO

Nos últimos anos, a urbanização e o crescimento desordenado têm causado mudanças significativas no clima das cidades, resultando em ilhas de calor e desconforto térmico. Em regiões de clima quente, como o Nordeste brasileiro, a ventilação natural tem sido uma das formas mais eficientes de proporcionar conforto térmico. Com o objetivo de avaliar o efeito da vizinhança sobre a ventilação natural, estudam-se modelos genéricos de edificações com aberturas inseridas em diferentes configurações de vizinhança. Analisa-se, por meio do *software* OpenFOAM, como o distanciamento, distribuição e modelo simulado (2D ou 3D) influenciam a ventilação natural cruzada. Neste contexto, simulam-se diferentes configurações de um modelo de edificação com aberturas em faces opostas, variando a ordem e disposição da vizinhança com as mesmas dimensões e sem aberturas. Foi realizado um estudo paramétrico considerando nas simulações 2D e 3D os principais parâmetros do escoamento em diferentes arranjos dispostos em série, intercaladas com espaçamentos variando em $1L$, $2L$ e $3L$, sendo L igual à largura da edificação. Para o tratamento da turbulência, foi utilizado a metodologia RANS com o modelo de fechamento $k - \omega$ SST. Os resultados obtidos por meio das simulações mostraram que a configuração da vizinhança exerce uma influência significativa no escoamento de ar nas aberturas, sendo que o aumento da distância entre as edificações favorece a ventilação natural. O estudo paramétrico revelou que os modelos simulados em 2D tendem a superestimar parâmetros, como velocidade e energia cinética, quando comparados aos modelos em 3D. Parâmetros como vazão e largura do jato seguem uma proporção semelhante em relação ao espaçamento entre edificações dos modelos 2D e 3D, indicando uma certa relação entre eles. No entanto, é crucial reconhecer as limitações da modelagem 2D, que apresenta uma simplificação significativa, embora ofereça vantagens em termos de tempo de processamento e custo computacional.

Palavras-chave: ventilação natural; conforto térmico; dinâmica dos fluidos computacional; OpenFOAM.

ABSTRACT

In recent years, urbanization and uncontrolled growth have caused significant changes in the climate of cities, resulting in heat islands and thermal discomfort. In hot climate regions, such as the Brazilian Northeast, natural ventilation has been one of the most efficient ways to provide thermal comfort. In order to assess the effect of the surrounding environment on natural ventilation, generic building models with openings in different neighborhood configurations are studied. Through the use of OpenFOAM software, it is analyzed how spacing, distribution, and simulated model (2D or 3D) influence cross-ventilation. In this context, various configurations of a building model with openings on opposite faces are simulated, varying the configuration and arrangement of the neighborhood with the same dimensions and without openings. A parametric study was conducted considering the main flow parameters in different arrangements arranged in series, interspersed with spacings varying at $1L$, $2L$, and $3L$, where L is equal to the building's width. For turbulence treatment, the RANS methodology with the $k - \omega$ SST closure model was used. The results obtained from the simulations showed that the neighborhood configuration significantly influences the airflow through the openings, with increased distance between buildings favoring natural ventilation. The parametric study revealed that 2D simulated models tend to overestimate parameters such as velocity and kinetic energy when compared to 3D models. Parameters like flow rate and jet width follow a similar proportion in relation to the spacing between buildings in 2D and 3D models, indicating a certain relationship between them. However, it is crucial to recognize the limitations of 2D modeling, which involves significant simplifications, although it offers advantages in terms of processing time and computational cost.

Keywords: natural ventilation; thermal comfort; computational fluid dynamics; OpenFOAM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estratégia de ventilação da escola primária do Gando	19
Figura 2 –	Mecanismo de ventilação Natural	34
Figura 3 –	Categorias de ventilação Natural	35
Figura 4 –	Regimes de escoamento de ar sobre modelos genéricos com H/W crescente	37
Figura 5 –	Efeito Venturi	38
Figura 6 –	Deflexão do vento na direção vertical	39
Figura 7 –	Turbulência de esteira	39
Figura 8 –	Organização de um caso no OpenFOAM	42
Figura 9 –	Esquema de dimensões do domínio computacional	45
Figura 10 –	Esquema unidimensional de um volume de controle	47
Figura 11 –	Discretização de uma camada de células de malha para capturar o gradiente de velocidade acentuado	54
Figura 12 –	Substituição da função de parede para alto número de <i>Reynolds</i> na resolução linear do perfil de velocidade com várias células por uma única célula e um conjunto de equações não-lineares	55
Figura 13 –	(a) Esboço 3D do domínio da simulação $AR = 1$, (b) discretização do domínio da simulação $AR = 1$, (c) esboço 3D do domínio da simulação $AR = 2.4$ e (d) discretização do domínio da simulação $AR = 2.4$	61
Figura 14 –	Caso E1 proposto por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011)	63
Figura 15 –	(a) Domínio computacional do caso tridimensional, (b) vista frontal da geometria e (c) seção transversal da geometria (dimensões em m)	63
Figura 16 –	Domínio computacional do modelo isolado 2D	67
Figura 17 –	Configuração dos modelos simulados em série 2D, com edificações sem aberturas a barlavento (B) e sotavento (S)	68
Figura 18 –	Configuração do modelo simulado em série 3D, com edificações sem aberturas a barlavento (B) e a sotavento (S)	69
Figura 19 –	Comparação do perfil de velocidade do vento normalizada U/U_{ref} (a) caso simulado (b) caso Yang <i>et al.</i> (2021)	71
Figura 20 –	Discretização 2D do caso de edificação isolada	75

Figura 21 –	Distribuição da magnitude da velocidade (U_{mag})	86
Figura 22 –	Distribuição da energia cinética turbulenta adimensionalizada (k/U_h^2)	88
Figura 23 –	Distribuição da velocidade média adimensional ($ V /U_h$) e localização da largura do jato obtida para os dez casos estudados	89
Figura 24 –	Sentido das linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)	90
Figura 25 –	(a) Posição vertical (Z_{MAX}/H) da velocidade máxima ($ V _{MAX}$) ao longo da edificação e (b) ângulo do jato na abertura de entrada baseado em $ V _{MAX}$ em $x/D = 0$ e $x/D = 0,5$	91
Figura 26 –	Linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)	94
Figura 27 –	Distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação (C_p)	97
Figura 28 –	Localização dos pontos de coleta da componente x da velocidade e da pressão no processo de simulação	98
Figura 29 –	Discretização para análise de sensibilidade de malha do caso 3D	101
Figura 30 –	Sentido das linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)	108
Figura 31 –	Distribuição da magnitude da velocidade (U_{mag}) no plano xz	109
Figura 32 –	Distribuição da magnitude da velocidade (U_{mag}) no plano xy ($z = 0,5H$)	110
Figura 33 –	Distribuição da velocidade média adimensional ($ V /U_h$) e localização da largura do jato obtida para os quatro casos estudados	113
Figura 34 –	(a) Posição vertical (Z_{MAX}/H) da velocidade máxima ($ V _{MAX}$) ao longo da edificação e (b) ângulo do jato na abertura de entrada baseado em $ V _{MAX}$ em $x/D = 0$ e $x/D = 0,5$	114
Figura 35 –	Linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)	115
Figura 36 –	Distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação no plano xz	118
Figura 37 –	Distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação no plano xy ($z = 0,5H$)	119

Figura 38 –	Distribuição da energia cinética turbulenta adimensionalizada (k/U_h^2) no plano xz	120
Figura 39 –	Distribuição da energia cinética turbulenta adimensionalizada (k/U_h^2) no plano xy ($z = 0,5H$)	121
Figura 40 –	Comparação dos resultados 2D e 3D: (a) linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x), (b) jato da velocidade média adimensional (V/U_h) no interior da edificação com aberturas e (c) valores da vazão adimensionalizada e ângulo do jato na abertura de entrada do escoamento	126
Figura 41 –	Comparação dos casos 2D e 3D da distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação no plano xz	127
Figura 42 –	Comparação dos casos 2D e 3D do perfil de velocidade (U_{mag}, U_x, U_z)	128

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Curvas de ajuste da (a) velocidade do vento no sentido da corrente (normalizada por U_{ref}^2) e (b) energia cinética turbulenta (normalizada por U_{ref}^2) para o contorno de entrada do domínio	62
Gráfico 2 –	Corte horizontal da velocidade do vento normalizada (U/U_{ref}) ao nível de pedestres ($z = 2m$)	72
Gráfico 3 –	Comparação entre resultados numéricos e dados de túnel de vento para perfis de (a, b) velocidade do vento normalizada (U/U_{ref}), (c, d) energia cinética de turbulência normalizada (k/U_{ref}^2) na linha central do cânion (ou seja, Linha F na Fig. 13.b)	73
Gráfico 4 –	Distribuição da velocidade normalizada para as malhas M1, M2 e M3 ao longo de três linhas verticais no interior da edificação	76
Gráfico 5 –	Velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_h) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,5 m$)	77
Gráfico 6 –	Comparação da velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) para os casos de vizinhança ao longo de três linhas verticais no interior da edificação em (a, d, g) $x/D = 0,125$, (b, e, h) $x/D = 0,5$, (c, f, i) $x/D = 0,875$	78
Gráfico 7 –	Comparação da energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) para os casos de vizinhança ao longo de três linhas verticais no interior da edificação em (a, d, g) $x/D = 0,125$, (b, e, h) $x/D = 0,5$, (c, f, i) $x/D = 0,875$	80
Gráfico 8 –	Velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) em cortes verticais posicionados nos cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança	82
Gráfico 9 –	Energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) em cortes verticais posicionados nos cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança	84
Gráfico 10 –	Velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_h) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$)	92

Gráfico 11 –	Energia cinética adimensionalizada na direção x (k/U_h^2) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$)	93
Gráfico 12 –	Convergência da velocidade nos pontos coletados para cada modelo com vizinhança	99
Gráfico 13 –	Convergência da pressão nos pontos coletados para cada modelo com vizinhança	100
Gráfico 14 –	Convergência dos dados de (a) velocidade e (b) pressão nos pontos coletados para o modelo de edificação isolada	101
Gráfico 15 –	Análise de sensibilidade de malha (a – c): comparação da velocidade média adimensionalizada na direção x obtida com três diferentes discretizações (menos refinada, média e fina) ao longo de três linhas verticais dentro do edifício no plano central vertical	102
Gráfico 16 –	Comparação da velocidade média adimensional (U_x/U_h) obtida no presente estudo, no estudo de Van Hooff (linha tracejada) e com medições de túnel de vento ao longo de sete linhas verticais dentro do edifício	103
Gráfico 17 –	Comparação da energia cinética adimensional (k/U_h^2) obtida no presente estudo, no estudo de Van Hooff (linha tracejada) e com medições de túnel de vento ao longo de sete linhas verticais dentro do edifício	104
Gráfico 18 –	Comparação da (a) velocidade média adimensional (U_x/U_h) e da (b) energia cinética adimensional (k/U_h^2) obtida no presente estudo, no estudo de Van Hooff (linha tracejada) com medições de túnel de vento ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,5$)	105
Gráfico 19 –	(a – c) comparação da velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) e da (d – f) energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) para os casos de vizinhança ao longo de três linhas verticais no interior da edificação em (a, d) $x/D = 0,125$, (b, e) $x/D = 0,5$, (c, f) $x/D = 0,875$	106

Gráfico 20 –	Velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) em perfis verticais posicionados entre os cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança	111
Gráfico 21 –	Energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) em perfis verticais posicionados nos cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança	112
Gráfico 22 –	(a) Posição vertical (Z_{MAX}/H) da velocidade máxima ($ V _{MAX}$) ao longo da edificação, (b) velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_h) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$) e (c) energia cinética adimensionalizada na direção x (k/U_h^2) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$)	122
Gráfico 23 –	Comparação do corte vertical no eixo central da edificação com aberturas em relação aos casos 2D e 3D: (a) velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) e (b) energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2)	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Condições de contorno aplicadas às faces do domínio 3D	65
Quadro 2 –	Modelos 2D a serem simulados	68
Quadro 3 –	Condições de contorno aplicadas às faces do domínio 2D	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Coeficientes adotados no modelo $k - \omega$ SST	54
Tabela 2 –	Quantidade de células dos modelos de cânions	62
Tabela 3 –	Métricas de validação para velocidade adimensionalizada U_x/U_{ref} do modelo com $AR = 1$	74
Tabela 4 –	Métricas de validação para velocidade adimensionalizada U_x/U_{ref} do modelo com $AR = 2.4$	74
Tabela 5 –	Métricas de validação para energia cinética k/U_{ref}^2 do modelo com $AR = 2.4$	74
Tabela 6 –	Vazão adimensionalizada	96
Tabela 7 –	Métricas de validação para velocidade adimensionalizada (U_x/U_h) e energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2)	105
Tabela 8 –	Vazão adimensionalizada, modelo de edificação isolada	116
Tabela 9 –	Vazão adimensionalizada, modelo de edificação em série	116
Tabela 10 –	Tempo de processamento dos casos estudados	129

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	32
4.1	VENTILAÇÃO NATURAL	32
4.1.1	Ventilação natural e eficiência energética	32
4.1.2	Conforto térmico	33
4.1.3	Princípios da ventilação natural	34
4.2	EFEITOS DO VENTO NAS EDIFICAÇÕES	36
4.3	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	39
4.4	OPENFOAM	41
4.5	MODELAGEM NUMÉRICA	43
4.5.1	Formulação numérica	45
4.5.2	Modelagem da turbulência	48
4.5.2.1	RANS	50
4.5.2.2	Hipótese de Boussinesq	51
4.5.2.3	Modelo $k - \omega$ SST	52
4.5.2.4	Tratamento de parede	54
5	METODOLOGIA	57
5.1	PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO	59
5.1.1	Validação	59
5.1.1.1	Validação 2D	60
5.1.1.1.1	<i>Condições de contorno para validação 2D</i>	62
5.1.1.2	Validação 3D	63
5.1.1.2.1	<i>Condições de contorno para validação 3D</i>	64
5.1.2	Análise de sensibilidade de malha	65
5.2	CASO 2D	67
5.3	CASO 3D	69
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
6.1	CASO 2D	71

6.1.1	Validação 2D	71
6.1.2	Análise de sensibilidade de malha 2D	75
6.1.3	Resultados caso 2D	77
6.2	CASO 3D	101
6.2.1	Análise de sensibilidade de malha 3D	101
6.2.2	Validação 3D	103
6.2.3	Resultados caso 3D	106
6.3	ESTUDO PARAMÉTRICO	121
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
	REFERÊNCIAS	134

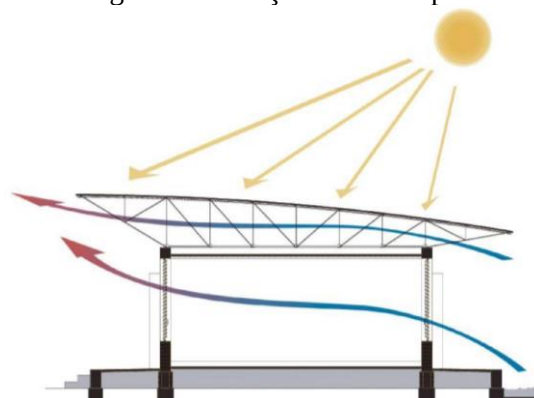
1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização está provocando cada vez mais mudanças ambientais significativas no espaço urbano, alterando a dinâmica das cidades com o desenvolvimento de construções não planejadas. Como consequência, observam-se situações de desconforto térmico, aumento do consumo de energia e poluição. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2019), prevê-se que a população urbana representará 70% da população mundial até 2050. Conforme destacado por Machado *et al.* (2022), compreender o desenvolvimento e desenho urbano, as condições de conforto e as interações entre o ser humano, o espaço e o clima são essenciais para propor projetos sustentáveis, tanto em escala urbana quanto em edificações, a fim de evitar o colapso urbano.

As mudanças climáticas ficaram mais evidentes nas últimas décadas, com o aumento das ilhas de calor, principalmente em regiões localizadas na zona tropical do planeta, como o Brasil. O semiárido brasileiro, inserido na região Nordeste do país, é considerado um dos climas mais vulneráveis ao desconforto térmico (EMBRAPA, 2021). O estudo realizado por Costa *et al.* (2020) indica uma exposição mais intensa de ondas de calor na região Nordeste, com aumento de dias e noites quentes. Nesse contexto, torna-se necessário adaptar as edificações de acordo com as condições impostas, a fim de proporcionar conforto térmico aos seus ocupantes (Molar-Orozco; Velázquez-Lozano; Vázquez Jiménez, 2020).

Recentemente, o arquiteto Diébédo Francis Kéré recebeu o Prêmio *Pritzker* de arquitetura – 2022, em que um de seus projetos de referência se trata da escola primária de Gando, construída em Burkina Faso, país do oeste da África. O projeto consegue adaptar o meio urbano às condições climáticas, enfrentando o clima extremamente quente e árido, semelhante ao semiárido brasileiro, com recursos ínfimos de um dos países mais pobres do mundo, apresentando uma estratégia passiva de conforto (Martínez, 2021). Como estratégia de ventilação, o teto da escola é projetado afastado do teto interno, como observado na Figura 1, que funciona como um tipo de forro perfurado, permitindo a ventilação máxima, puxando o ar frio através das janelas e liberando o ar quente através do teto perfurado e da região de cruzamento (ARCHDAILY, 2016). A partir do planejamento de sistemas de renovação de ventilação natural, conservam-se as condições necessárias para o conforto dos usuários.

Figura 1 – Estratégia de ventilação da escola primária do Gando



Fonte: ARCHDAILY (2016)

Segundo Molar-Orozco, Velázquez-Lozano e Vázquez Jiménez (2020), o déficit de conforto térmico nas edificações reflete-se diretamente no consumo de energia, a partir dos meios de obtenção do conforto através de ventilação mecanizada. A coordenação de estratégias, tanto de eficiência energética quanto de conforto térmico, implica melhoria da qualidade de vida dos usuários, por razões de salubridade dos ambientes, permitindo uma renovação de ar interno contínua através do uso da ventilação natural (Naboni *et al.*, 2019; Bevilaqua *et al.*, 2019; Gonzalez; Santos, 2020).

Conforme definido pela Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado – ASHRAE 55-2013, a ventilação natural é aquela induzida por pressões devidas ao vento e às diferenças de temperatura entre o ar interno e externo ao ambiente. Essa ventilação é possibilitada por aberturas ajustáveis, como portas e janelas, e pode ser utilizada tanto para regular a temperatura do ar no ambiente como para controlar a concentração de contaminantes.

A norma brasileira NBR 15220-3/2005, que aborda o zoneamento bioclimático do Brasil, estabelece que a ventilação natural é recomendada em sete das oito zonas, fornecendo diretrizes para o desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social durante a fase de projeto, com o objetivo da obtenção do conforto térmico. Partindo deste pressuposto, observa-se uma grande tendência nas pesquisas relacionadas com estratégias de condicionamento térmico passivo em habitações de interesse social, acentuando sua relevância (Lôbo; Bittencourt, 2003; Bevilaqua *et al.*, 2019; Amaral; Assis, 2020; Vázquez-Torres *et al.*, 2021; Nascimento; Bono, 2022).

Prever o desempenho da ventilação envolve fornecer informações sobre os parâmetros de ar antes da construção da edificação. Para isso, é necessário utilizar ferramentas adequadas para caracterização do escoamento, cujo comportamento pode ser normalmente avaliado por soluções analíticas, empíricas, experimentais ou simulações

numéricas. No entanto, de acordo com Chen (2009), modelos analíticos e empíricos apresentam grandes incertezas quando aplicados a ambientes estratificados, incluindo espaços internos com escoamento de ar. Para mitigar essas limitações, os modelos numéricos são amplamente utilizados para investigar a eficácia da ventilação, a qualidade do ar interno e o conforto térmico em ambientes internos, sendo a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) uma técnica amplamente empregada.

O comportamento dos fluidos é governado por equações diferenciais parciais (EDP) que representam as leis da conservação de massa, momento e energia, as quais, geralmente não podem ser resolvidas analiticamente. Para solucioná-las numericamente, existem diferentes métodos, sendo os mais comuns o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Volumes Finitos (MVF). Esses métodos empregam uma técnica de discretização para aproximar as EDP por um sistema de equações algébricas (Ferziger; Peric, 2002). O MDF aproxima as derivadas das equações por diferenças finitas, sendo o método mais antigo e mais simples. O MEF emprega a discretização do sistema em elementos finitos de comportamento conhecido, amplamente utilizado em problemas de física e engenharia. No MVF o domínio é decomposto em volumes de controles finitos, sendo este o método mais aplicável para solução de problemas de escoamento de fluidos.

Baseado em simulações numéricas, o modelo empregado em estudo de ventilação natural é capaz de fornecer campos de velocidade, pressão e temperatura além de outros parâmetros inerentes ao modelo de turbulência adotado. Uma simulação baseada em CFD pode ser constituída por três etapas: pré-processamento, onde define-se a configuração da geometria e discretização do domínio; processamento, estágio de resolução das equações através de um *solver*; e o pós-processamento, etapa de análise e visualização dos resultados.

A predição do desempenho de edificações antes de sua concepção é fundamental para o estudo da ventilação natural e, conseqüentemente, para o seu desempenho térmico, prevendo problemas e testando soluções com o objetivo de um planejamento construtivo eficiente e sustentável. Essa análise de desempenho relaciona-se aos principais problemas do campo da Engenharia do Vento Computacional, uma vez que os modelos experimentais ou analíticos nem sempre são capazes de fornecer resultados confiáveis ou abrangentes. Nesse sentido, as simulações numéricas surgem como uma solução por meio de técnicas de CFD. Logo, neste trabalho busca-se estudar a ventilação natural cruzada em um modelo de edificação com aberturas, considerando diferentes configurações de

vizinhança. Para isso, serão realizadas simulações utilizando o *software* OpenFOAM, tanto em casos bidimensionais quanto tridimensionais, analisando a influência dos diferentes parâmetros que caracterizam o escoamento de ar.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho visa, através de simulação numérica de modelos 2D e 3D, empregando o *software* OpenFOAM, analisar a ventilação natural cruzada em um conjunto de edificações dispostas em série, observando como as diferentes configurações influenciam no escoamento de ar no interior e ao redor das edificações.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular o escoamento turbulento em torno de uma edificação com abertura em faces opostas inserida em diferentes sequências de vizinhança em série com mesma geometria, mas sem quaisquer aberturas.
- Analisar como a distribuição e distanciamento entre as edificações influencia a ventilação natural e as principais variáveis do escoamento.
- Realizar um estudo paramétrico dos principais parâmetros do escoamento considerando as modelagens 2D e 3D.
- Avaliar o desempenho do programa livre de código aberto OpenFOAM em estudos de ventilação natural.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ventilação natural é um dos princípios fundamentais da arquitetura sustentável, já que se trata de um recurso gratuito e renovável. O aproveitamento da ventilação natural em imóveis tornou-se requisito básico nas construções atuais em razão do gradativo aumento populacional e a crescente urbanização, que resulta em processos construtivos desordenados e sem planejamento. Nesse cenário surge a necessidade de utilização de geometrias que promovam a ventilação natural nas edificações, estudando, de maneira antecipada, sua eficiência. Os estudos em relação a ventilação remontam à década de 1950, nos quais tratava-se do escoamento em perímetros urbanos por meio de túneis de vento, com o objetivo de avaliar o impacto da ventilação passiva em função do posicionamento das aberturas nos edifícios (Dick, 1950; Smith, 1951).

A década de 1980 foi responsável pelo surgimento dos supercomputadores, com grandes memórias primárias e ciclos de computação muito rápidos, desencadeando avanços em algoritmos e pesquisas de turbulência. Além disso, nesta década houve o desenvolvimento das técnicas de CFD, tornando-se assim viável a análise de geometrias tridimensionais complexas (Lomax, 1991). Tem-se então o desdobramento das primeiras pesquisas na predição do escoamento de ar em edificações usando a CFD (Whittle, 1990; Jones; Whittle, 1992; Chow, 1996), como também na análise da eficiência da ventilação natural em edificações e ambientes (Awbi, 1989; Imbabi, 1990).

O avanço dos recursos computacionais possibilitou a ampliação das pesquisas em cenários complexos geometricamente. Um exemplo característico trata-se da pesquisa realizada por Skote *et al.* (2005), na qual, utilizando o programa *ANSYS-CFX*, foi estudada a ventilação ao longo de ruas, relacionando a morfologia urbana e a ventilação a partir de comparações entre estudos experimentais em túnel de vento e simulação numérica com os modelos de turbulência *Shear-Stress Transport $k - \omega$* (SST) e *Standard $k - \varepsilon$* (SKE), demonstrando uma equivalência entre os mesmos. Assim como os estudos desenvolvidos por Tominaga e Stathopoulos (2011), que a partir da simulação CFD tridimensional usando modelos de turbulência RANS (*Renormalization Group $k - \varepsilon$* – RNG) e LES (*Large Eddy Simulations*) analisaram a dispersão de poluentes em cânion de ruas, e Qin *et al.* (2020), que também avaliaram o desempenho da ventilação urbana com simulações baseadas na CFD em diferentes direções com uso do *software ANSYS-Fluent*.

Muitos dos estudos com a CFD abordam temáticas da previsão da ventilação natural

em edifícios, como é o caso do trabalho desenvolvido por Papakonstantinou, Kiranoudis e Markatos (2000), que avaliaram o escoamento de ar em edifícios ventilados unilateralmente com uso do *software* comercial *PHOENICS*, através dos modelos de fechamento SKE. Asfour e Gadi (2007), por meio do *software* *ANSYS-Fluent*, comparam as taxas de ar previstas com as simuladas, através do modelo de fechamento SKE, demonstrando uma boa acurácia. Aydin e Mirzaei (2017), também por intermédio do *ANSYS-Fluent*, fazem uma análise de um modelo isolado de edificação de arquitetura turca com uso do modelo de fechamento RNG.

Dentre os principais autores que investigam a ventilação cruzada pode-se citar Ramponi e Blocken (2012), que analisaram a sensibilidade de parâmetros computacionais, com diferentes modelos de turbulência (SKE, RNG, SST, Modelo de Tensão de Reynolds – RSM, do inglês *Reynolds Stress Model*), contribuindo para acurácia, confiabilidade e avaliação de simulações numéricas através do *software* *ANSYS-Fluent*. Assim como Perén *et al.* (2015), que avalia a ventilação cruzada a partir de parâmetros relacionados a aberturas de janela e inclinação de telhado usando modelos de turbulência RANS: SKE, RNG, SST e o RSM, onde os modelos SST e RNG apresentaram a melhor semelhança com os dados experimentais.

Shirzadi *et al.* (2018) exploram as limitações dos modelos RANS para aplicação de ventilação cruzada em densas áreas urbanas, por meio dos modelos de fechamento SKE e SST, em que a melhoria da acurácia dos modelos RANS foi realizada através da calibração dos coeficientes do modelo de fechamento SKE. Os resultados numéricos apontam que a acurácia dos modelos RANS diminui significativamente em áreas altamente compactas, sendo aceitáveis para áreas de densidade menores a 0,2.

Semelhantemente, Tong, Chen e Malkawi (2016) já haviam desenvolvido um estudo com o intuito de reduzir erros em simulações numéricas e o custo computacional, demonstrando a importância de avaliar a sensibilidade da região de influência, com o objetivo de impulsionar o estudo na área, tornando mais confiável sua inserção e garantindo a acurácia da análise de ventilação natural.

Há ainda estudos que abordam diferentes métodos que podem ser utilizados para impulsionar a ventilação natural em edifícios, com uso de elementos passivos. Yu *et al.* (2018) estudaram o desempenho das aberturas de janelas como forma passiva de condicionamento e ventilação natural por meio de simulações numéricas. Zaki, Richerds e Sharma (2019) avaliaram o uso de *windcatcher* através da comparação dos efeitos previstos em simulações numéricas relacionados aos dados do túnel de vento. Abdeen *et*

al. (2019) investigaram o uso de chaminés no problema de ventilação natural através de experimentos em escala real em paralelo a predição de simulação numérica, empregando o modelo de turbulência RANS SKE no *software ANSYS-Fluent*.

Como pode ser observado no decorrer dos trabalhos já abordados, dentre os modelos baseados na CFD, o modelo de turbulência RANS $k - \varepsilon$ (SKE) é o mais aplicado para simulação de escoamento de ar interno e externo de edificações, assim como o uso do *software ANSYS-Fluent*, que se faz presente em grande parte das pesquisas (Asfour; Gadi, 2007; Ramponi; Blocken, 2012; Perén *et al.*, 2015; Aydin; Mirzaei, 2017; Yu *et al.*, 2018; Zaki; Richards; Sharma, 2019; Abdeen *et al.*, 2019; Qin *et al.*, 2020; Zhang; Weerasuriya; Tse, 2020; entre outros). Dentre os trabalhos mais atuais que envolvem ventilação natural em edifícios a partir da simulação numérica, pode-se observar a constante avaliação de diferentes modelos de turbulência empregados de forma comparativa, com o objetivo de examinar a aerodinâmica dos modelos genéricos em relação às aberturas, observando diversos parâmetros.

Li *et al.* (2015) analisaram diferentes modelos de turbulência na simulação numérica de edifícios e os resultados foram comparados com dados experimentais de túnel de vento. No conjunto dos modelos analisados, empregou-se o *Spalart-Allmaras* (SA) e o modelo *Renormalization Group $k - \varepsilon$* (RNG), incluindo o tratamento DVM (Método dos Vórtices, do inglês *Discrete Vortex Method*). O primeiro mostrou resultados de previsão apropriados para a medição de pressão na superfície, mas sua confiabilidade não foi satisfatória quanto a escala de comprimento da turbulência. Já o modelo RNG apresentou bons resultados quando analisada a distribuição do escoamento em seu contorno através de um corte horizontal, assim como a pressão de superfície compatível com a recomendada em simulações de ambientes de vento em edifícios.

Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) estudaram, utilizando o programa *ANSYS-Fluent*, diferentes modelos de turbulência na simulação de ventilação cruzada de um modelo de edificação genérica isolada com duas aberturas, dentre eles: SKE, RNG, RLZ, SST, RSM e o LES Smagorinsky. Os resultados foram comparados com os dados obtidos em experimentos de túnel de vento. Através das simulações pode-se observar a ótima concordância com os resultados experimentais, destacando-se o modelo SKE, que obteve o menor erro de estimativa da vazão interna da edificação e o modelo LES Smagorinsky, mostrando-se mais eficiente para a captura dos principais fenômenos físicos do escoamento.

Kosutova *et al.* (2019) aferiram o uso de venezianas como elemento passivo em

simulações de ventilação cruzada em edificações, testando diferentes posições de aberturas com a utilização do elemento, onde o código *ANSYS-Fluent* foi empregado para resolver as equações de conservação do escoamento e, secundariamente, as equações referentes aos modelos de turbulência RNG, SST e RSM, comparando os resultados ao experimento de túnel de vento. A partir da analogia, foi possível concluir que ambos estão em conformidade, demonstrando as principais diferenças de escoamento de cada configuração de abertura.

Liu *et al.* (2019), diferente dos demais, simularam a ventilação no interior e no exterior de um edifício avaliando a influência dos cômodos internos e das edificações vizinhas no escoamento do ar. Para o estudo, os autores utilizaram o programa *ANSYS-Fluent* e o modelo de fechamento RNG, dessa forma foi possível observar a influência da vizinhança em relação ao edifício em estudo frente a ventilação cruzada no seu interior. Além disso, o estudo mostra a concordância entre os métodos de simulação e resultados experimentais.

Bazdidi-Tehrani, Masouni-Verki e Gholamalipour (2020) investigaram os efeitos de diferentes formas de aberturas em ventilação cruzada de um edifício através de uma simulação utilizando a metodologia LES com o modelo de escala submalha (SGS, do inglês *Subgrid-Scale*). Demonstra-se que o desempenho da ventilação cruzada na redução de concentração de poluentes aumenta à medida que a relação altura/largura de aberturas também aumenta, onde o comportamento da ventilação natural no caso de aberturas verticalmente longas se mostra mais eficaz.

Outro interessante estudo foi realizado por Zhang, Weerasuriya e Tse (2020), no qual fez-se uma análise da ventilação natural em várias direções de um edifício por meio da simulação numérica, através dos modelos de turbulência RANS – RNG, RLZ e SKE – e LES com o modelo *Wall-Adapting Local Eddy-viscosity* (WALE) – para comparação entre os modelos. A partir das métricas de validação, o LES se mostrou mais preciso ao simular a ventilação unilateral e entre as simulações RANS aquelas realizadas com RLZ apresentaram melhor desempenho. Ainda é possível constatar que apesar das velocidades de vento serem menores, todas as simulações RANS preveem com acurácia a existência do jato de vento que conecta as aberturas em paredes opostas, semelhante aos dados do túnel de vento e do modelo LES. Por conseguinte, os trabalhos demonstram que a escolha do modelo de turbulência ideal depende da problemática a ser abordada e dos parâmetros que se deseja analisar.

No campo de pesquisa brasileiro, o uso de simulações utilizando a CFD se estende

em aplicações que envolvem desde o meio urbano (Amaral; Assis, 2019; Dallastra *et al.*, 2020) até edificações unifamiliares (Souza; Rodrigues, 2012; Sorgato; Melo; Lamberts, 2016; De Quadros, Ordenes, 2017; Bevilaqua *et al.*, 2019; Bianchin, 2021; Xavier; Luitantchuki, 2021; Silva *et al.*, 2022), reforçando a sua vasta aplicabilidade. Nota-se ainda que a implementação da CFD nas pesquisas brasileiras é uma prática relativamente nova e ainda pouco explorada, mas que tem grandes possibilidades de se tornar um ramo promissor nas pesquisas de eficiência de ventilação natural como forma passiva de condicionamento, por se tratar de um país de clima tropical, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, que se inserem nas regiões com clima preponderantemente quente e que possuem potencial eólico.

O estudo desenvolvido por Lôbo e Bittencourt (2003) traz uma abordagem da influência do uso de captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas no estado de Alagoas, localizado no Nordeste brasileiro, com clima quente e úmido. Para investigação foi utilizado o programa comercial *PHOENICS*, onde são apresentados resultados sob a forma de vetores de velocidade, comprovando que há um grande potencial para uso dessa estratégia de condicionamento passivo.

Souza e Rodrigues (2012) exploraram o uso da ventilação cruzada e unilateral como estratégia de conforto térmico em escritórios através do método numérico de elementos finitos por meio do programa *ANSYS*, empregando-se o modelo de turbulência *SKE*, onde foi comprovado que a ventilação cruzada é 3,5 vezes mais eficiente do que a ventilação unilateral. Resultado paralelo ao encontrado por De Quadros e Ordenes (2017), que ao avaliar o conforto térmico de quartos de interação naturalmente ventilados, através do *software* comercial *PHOENICS*, empregando o modelo de turbulência *RANS $k - \epsilon$* , concluíram que os melhores resultados decorrem da ventilação cruzada.

Lukiantchuki *et al.* (2018) avaliaram a influência do número de *sheds*, que são aberturas na cobertura que funcionam como captadores ou extratores de ar, através da solução de equações *RANS*, com modelo de fechamento *SKE*, por meio do programa *ANSYS-CFX*. Como resultado foi observado que a distância dos elementos tem grande influência na ventilação interior, sendo a relação da distância entre os dispositivos captadores diretamente proporcional ao incremento de escoamento interno.

Bevilaqua *et al.* (2019) realizaram um estudo numérico e ensaios em modelo reduzido para avaliação da ventilação natural em edificações com diferentes aberturas, através do programa *ANSYS-CFX*, com modelo de fechamento *SKE*, como meio de comprovação dos princípios da ventilação natural para ensino em sala de aula de seus

conceitos e aplicação em projetos arquitetônicos. Por meio deste, comprovaram que os modelos experimentais e numéricos têm boa concordância, mostrando-se compatíveis.

Xavier *et al.* (2020) e Xavier e Lukiantchuki (2021) empregam uma abordagem numérica de desempenho da ventilação natural fazendo uso do programa comercial *ANSYS-CFX* e do modelo de fechamento SKE. Xavier *et al.* (2020) avaliam e comparam os resultados obtidos de simulações computacionais e experimentais em uma mesa d'água. Xavier e Lukiantchuki (2021) estudam a relação de diferentes configurações de muro na influência da ventilação natural dos espaços internos.

Nota-se que na maioria dos estudos numéricos sobre ventilação empregam-se programas comerciais. Izadyar *et al.* (2020) trazem uma investigação sobre os impactos das aberturas em fachadas e geometria no desempenho da ventilação natural e na percepção dos ocupantes, na qual mostra-se a predominância de estudos com uso de *softwares* comerciais, principalmente o *ANSYS-Fluent* e o *ANSYS-CFX*. Apesar desse panorama observado dentre as pesquisas, há a possibilidade de utilizar programas capazes de prever a ventilação natural de forma confiável com código livre, como é o caso do OpenFOAM, utilizado em diversas áreas da Fluidodinâmica (Balogh; Parente; Benocci, 2012).

O uso do OpenFOAM em trabalhos sobre ventilação natural em edifícios é recente e geralmente envolve a avaliação de configuração de aberturas (Kasim *et al.*, 2016), elementos de fachada (Dama; Angeli; Larsen, 2017), eficiência energética (Naboni *et al.*, 2019) ou a influência do meio urbano (Mirza *et al.*, 2022). A aplicação do OpenFOAM no trabalho desenvolvido por Kasim *et al.* (2016) deu-se a partir da avaliação da ventilação cruzada em uma edificação genérica através do teste de nove configurações de abertura. Na simulação utilizou-se o modelo de turbulência RANS RNG, onde o resultado demonstrou que a taxa de ventilação se torna mais fraca à medida que a posição da abertura é deslocada para a parte inferior da fachada e que a abertura localizada na parede de barlavento permite maior vazão de ar.

Dama, Angeli e Larsen (2017) também estudaram os principais parâmetros relacionados a ventilação natural em edifícios, os quais fazem uso do OpenFOAM para simulação de uma fachada de camada duplamente ventilada, através do modelo de turbulência para escoamentos transientes U-RANS (RANS *Unsteady*) e as equações de conservação de energia, que governam o escoamento turbulento não isotérmico. Através dos resultados, os autores concluíram que existe uma boa concordância quantitativa entre o modelo CFD e as técnicas experimentais para o fluxo de entrada em todos os cenários

testados.

Naboni *et al.* (2019) propõem uma metodologia para análise de eficiência energética em edifícios a partir da avaliação do conforto do escoamento de ar natural previsto por meio da modelagem microclimática e energética com uso dos *softwares* OpenFOAM e *EnergyPlus*, respectivamente. Os resultados demonstram que o OpenFOAM é capaz de evidenciar a influência de aspectos geométricos dos edifícios sobre a sua ventilação e, consequentemente, sobre sua eficiência energética.

Mirza *et al.* (2022) fazem uso do OpenFOAM para análise do impacto de desenvolvimento da infraestrutura urbana nos perfis de vento e temperatura. Como resultados, os autores demonstram o impacto que os locais construídos geram no microclima da cidade, aumentando a temperatura do ar circundante e mudanças na velocidade e no escoamento do ar.

Nascimento e Bono (2022) empregam o OpenFOAM no estudo da ação do vento em modelos de edifícios baixos distribuídos em série. Avaliou-se como influência a geometria na topologia do escoamento e nas taxas de escoamento volumétrico no interior da edificação. Como resultado, observa-se uma forte influência da separação das edificações e inclinação do terreno no desempenho do escoamento, além de comprovar a eficiência no uso do *software* para modelos CFD, quando comparados a referências experimentais e numéricas.

Para avaliação do efeito de vizinhança na ventilação por meio de sistemas passivos, diversos estudos abordam análises experimentais e numéricas acerca das formas urbanas representativas de diferentes níveis de adensamento construtivo através de distintas configurações de modelos e técnicas de aprimoramento na previsão da ventilação natural por meio de simulações numéricas.

Cheng e Liu (2011) e Leung *et al.* (2012) examinam o comportamento de transporte de poluente em cânions de rua por intermédio de simulações numéricas 2D com a metodologia LES, e compara os resultados experimentais. Os resultados apresentam boa concordância com os dados experimentais e de campo.

Yang *et al.* (2016) avaliam os impactos do escoamento de ar em cânions através de aberturas no edifício a montante no campo de escoamento para diferentes proporções de altura do edifício pela largura da rua (AR), por meio do modelo de turbulência SKE.

Shirzadi *et al.* (2018) melhoram a acurácia na previsão da taxa de ar através do emprego da otimização estocástica e técnicas de amostragem de Monte Carlo na definição dos coeficientes do modelo SKE. As simulações apresentaram um erro inferior a 8% em

comparação com o experimento.

Murakami *et al.* (2018) utilizam a simulação numérica para avaliar o campo de escoamento sobre uma matriz de edifícios, onde a edificação que está cercada pelos edifícios de vizinhança apresenta diferentes posições de aberturas para avaliação da ventilação cruzada. Determinam-se as características de cada configuração, empregando o OpenFOAM e o modelo de turbulência SKE.

Mei *et al.* (2019) realizam simulações de cânions 2D e 3D, empregando o modelo de fechamento RNG, para determinar as condições necessárias nas quais as simulações em duas dimensões possam representar o mesmo cenário de modelos em três dimensões. Como resultado, os autores definem que para um modelo de cânion isolado o modelo 2D representa o 3D quando $B/W > 20$ (largura do edifício/largura da rua) para um $AR = 1$ (altura do edifício/largura da rua) e $B/W = 70$ para $AR = 2$. Já para o caso de cânions múltiplos, $B/W = 20$ para um $AR = 1$ e $B/W = 50$ para $AR = 2$.

Shirzadi, Tominaga e Mirzale (2020) avaliam a ventilação cruzada em uma edificação com aberturas cercada por modelos genéricos de edificações com uma razão de área planar de 0,25. No estudo consideram-se diferentes ângulos de incidência de vento e vários modelos de turbulência RANS – SKE, RNG e SST, trazendo comparações com os resultados experimentais apresentados em Shirzadi, Tominaga e Mirzale (2020a). Em Shirzadi, Tominaga e Mirzale (2020b), utilizam-se da mesma configuração de edificações para comparar os modelos de turbulência RANS e a metodologia LES com modelagem submalha. Com os resultados fica demonstrado que a metodologia LES sempre apresenta uma boa concordância com os dados experimentais.

Shirzadi, Mirzale e Tominaga (2021) consideram o mesmo conjunto de edificações analisado em Shirzadi, Tominaga e Mirzale (2020b) para avaliar o fluxo de ar cruzado em diferentes razões de área no plano (relação entre os espaçamentos com os edifícios circundantes e as dimensões da edificação em planta) e ângulos de incidência de vento, obtendo assim características inerentes às novas configurações. No estudo consideram-se as metodologias LES e RANS.

Nesse contexto, o presente trabalho traz contribuições para o campo de estudo ao abordar a ventilação natural em simulações numéricas de um modelo de edificação com abertura cruzada, avaliando o escoamento de ar e seus respectivos parâmetros em relação a alternância da vizinhança e seu distanciamento entre a edificação ventilada, com modelos 2D e 3D. Também, contribui para a literatura ao fornecer e confirmar características do escoamento relevantes ao estudo da ventilação, avaliando a influência

das edificações vizinhas, assim como observado por Shirzadi, Tominaga e Mirzale (2020b), uma vez que o estudo anteriormente realizado no CAA (Centro Acadêmico do Agreste) com modelos de edificação em série (Nascimento, 2019) analisou apenas os casos 2D e todas as edificações com aberturas. Logo, o presente estudo avança no entendimento do escoamento de ar em edificações em série, apresentando uma nova perspectiva baseada em diferentes aspectos de configuração, geometria e modelo de fechamento.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 VENTILAÇÃO NATURAL

O estudo da ventilação natural tem como objetivo investigar as características e os efeitos da circulação natural do ar em diferentes cenários, abrangendo aspectos como a qualidade do ar interno, o conforto térmico dos ocupantes e a eficiência energética da edificação. Esse estudo busca compreender o comportamento da ventilação natural através da análise de variáveis como a velocidade e a direção do escoamento de ar. O conhecimento desses fenômenos é fundamental para o avanço de pesquisas, sejam elas de natureza numérica ou empírica, a fim de representar adequadamente seus efeitos. Diversas metodologias podem ser empregadas para análise da ventilação natural, permitindo compreender os fenômenos envolvidos e definir estratégias adequadas para otimizar a ventilação natural em diferentes contextos arquitetônicos.

4.1.1 Ventilação natural e eficiência energética

O escoamento natural do ar em espaços sem o uso de sistemas mecânicos e automatizados é denominado de ventilação natural (Chen, 2009; Kopec, 2017; Aydin; Mirzaei, 2017). O movimento do ar resulta da diferença de pressão e densidade, atuando isoladamente, simultaneamente, ou em oposição, dependendo de fatores externos naturais como vento e temperatura (Etheridge, 2012). A utilização desse sistema de condicionamento térmico passivo é essencial na busca da qualidade do ar, conforto térmico e economia de custos, através da antecipação de seu desempenho, propondo projetos eficientes com o objetivo de prever problemas e testar soluções.

A previsão do desempenho em edificações fornece as informações sobre parâmetros do ar interno antes de sua concepção física, previstos ou avaliados por soluções analíticas, empíricas, medições experimentais e simulações computacionais (Chen, 2009). Segundo a Nota Técnica DEA 13/15, emitida pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), estima-se que a demanda energética no mundo cresça em 50% até o ano de 2050, sendo o setor da construção civil responsável por 40% desse consumo (Singh *et. al*, 2018). O aumento da população urbana intensifica esse cenário energético, assim como o uso de sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento.

A demanda energética para climatização triplicou entre os anos de 1990 e 2016 (Slade, 2018) e tem previsão em ser triplicado novamente entre 2020 e 2050 (IEA, 2021). Segundo dados apresentados da IEA (2018), o uso de aparelhos de ventilação mecânica

já representava 20% do consumo total de eletricidade do mundo, circunstância preocupante quando se sabe que a geração de eletricidade é atualmente a maior fonte de CO₂ emitido em todo o mundo (IEA, 2021). O uso de ventilação ativa está listado entre os quatro maiores setores de uso de energia elétrica (IEA, 2021), o que ressalta a necessidade de padrões que retardem o crescimento pela demanda de eletricidade, favorecendo o uso e medidas de ventilação passiva, atendendo ao conforto e às necessidades dos ocupantes.

A partir da demanda energética recorrente da climatização de espaços, há uma sobrecarga na matriz energética, elevando a necessidade de geração e consequentemente distribuição, principalmente em horários de pico (EPE, 2019). Segundo a Nota Técnica EPE 030/2018, a demanda adicional é atendida principalmente por usinas térmicas que causam significativo aumento nas emissões de carbono que, por conseguinte aumenta a temperatura do planeta causando a gradativa expansão da necessidade por climatização. São essas sequências de causas e consequências que está levando o planeta ao colapso em um ciclo vicioso (IEA, 2021).

A plataforma nacional Projeteee – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes¹ afirma que a promoção da eficiência energética de edificações é uma estratégia de relevância cada vez maior para a mitigação da mudança global do clima, considerando o crescimento das emissões no setor energético e o fato de que o setor de edificações responde atualmente por mais de 40% do total da eletricidade consumida no Brasil.

4.1.2 Conforto térmico

A aclimação fisiológica, segundo De Dear e Brager (2002), refere-se à capacidade de adaptação do indivíduo ao contexto climático a que está exposto, buscando garantir um estado de contentamento em decorrência das adversidades proporcionadas pelo ambiente, que para a ASHRAE 55-2013 trata-se da definição de conforto térmico. Dentre tantos pontos a serem relacionados, o desempenho humano está intimamente ligado ao conforto térmico do indivíduo, principalmente em atividades que demandam atenção e envolva o intelecto (Silva; Ghisi; Lamberts, 2016).

Para Lamberts, Dutra e Pereira (1997), a forma arquitetônica tem grande influência no conforto térmico e na quantidade de energia consumida em uma edificação, já que a

¹ <http://www.mme.gov.br/projeteee>

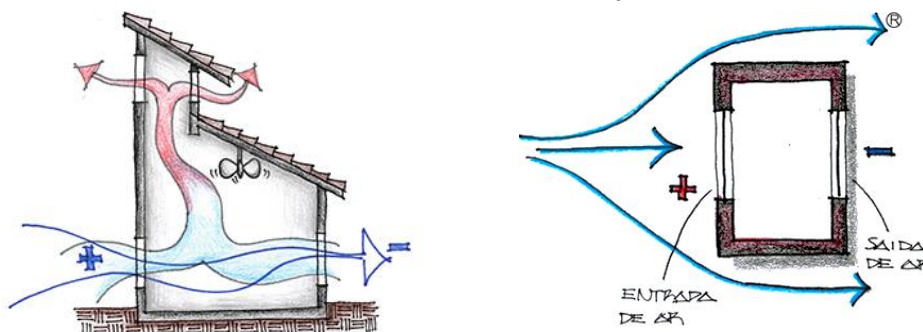
maneira de posicionamento de aberturas, inclinação de telhados e espaçamentos entre edifícios interferem diretamente sobre o escoamento de ar no interior e exterior. À medida que o ar circula em torno de uma edificação, zonas de alta pressão são criadas na posição a barlavento e a sotavento, sendo a posição e o tamanho das aberturas determinantes na ventilação natural (Al-Aghbari *et al.*, 2022).

A manutenção da qualidade de ar em ambientes internos é obtida através da adequada renovação de ar, removendo as impurezas e mantendo os níveis de oxigênio e conforto térmico aceitáveis. Para compreender o efeito da ventilação natural no conforto térmico dos usuários, diversos estudos têm sido desenvolvidos com diferentes metodologias para mensurar tal efeito, como: índices de conforto térmico (numéricos e analíticos), simulações em câmaras climáticas, medições e entrevistas *in loco*, entre outras (Arens *et al.*, 1998; De Dear *et al.*, 1998; Nicol, 2004; Wong *et al.*, 2016; Tan; Deng, 2017). Dessa forma, torna-se possível mensurar as condições do ambiente e assim prescrever as melhores estratégias para reestabelecer as condições aceitáveis de conforto. No entanto, o presente estudo não irá quantificar o desempenho térmico de edificações, sendo este já avaliado por outros estudos em andamento no LECOM (Laboratório de Engenharia Computacional).

4.1.3 Princípios da ventilação natural

Como já mencionado, a ventilação natural se dá por meio da existência de uma força motriz que resulta de uma diferença de pressão, que pode ser ocasionada pela ação do vento nas superfícies da edificação ou por diferenças de temperatura, causando o efeito chaminé.

Figura 2 – Mecanismo de ventilação Natural



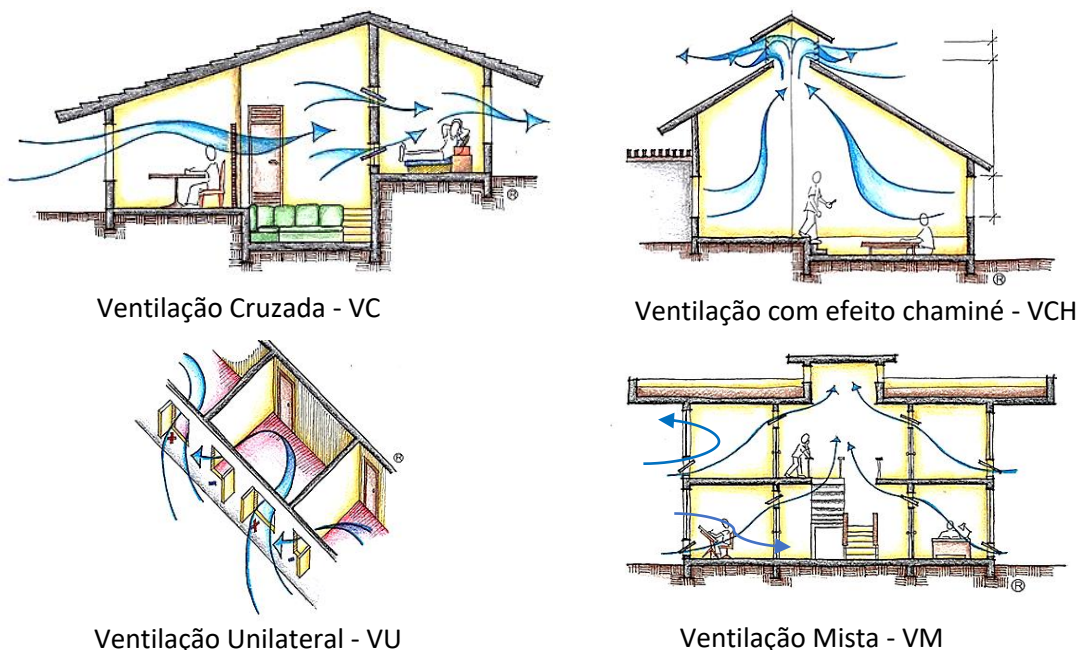
Fonte: A Autora (2023)

Nota: Adaptado de Projeteer²

² <http://www.mme.gov.br/projeteer/estrategia/ventilacao-natural>

Segundo Izadyar *et al.* (2020), a ventilação natural é categorizada principalmente em quatro diferentes estratégias, ver Figura 3: ventilação cruzada (VC), ventilação unilateral (VU), ventilação com efeito chaminé (VCH) e ventilação de estratégia mista (VM).

Figura 3 – Categorias de ventilação Natural



Fonte: A Autora (2023)

Nota: Adaptado de Projeteer³

A ventilação cruzada e a ventilação por efeito chaminé são tipos de ventilação unidirecionais que requerem pelo menos duas aberturas: uma para entrada de ar e outra para saída. A diferença entre elas está na direção do fluxo de ar, que é horizontal para a ventilação cruzada e vertical para a ventilação por efeito chaminé. Na ventilação cruzada, as aberturas se localizam nos lados opostos da edificação, onde o escoamento de ar se move a partir da diferença de pressão da mais alta para a mais baixa (Cochran; Derickson, 2005).

A ventilação por efeito chaminé é uma estratégia que se baseia na flutuação térmica do escoamento de ar, resultante do gradiente de temperatura entre a entrada e a saída do sistema. Devido à diferença de temperatura, o ar quente, por ser menos denso, tende a subir e é substituído pelo ar frio proveniente do exterior (Izadyar *et al.*, 2020).

A ventilação unilateral é caracterizada pela presença de uma única abertura ou abertura em apenas uma das fachadas. Esse tipo de ventilação é amplamente utilizado em

³ <http://www.mme.gov.br/projeteer/estrategia/ventilacao-natural>

ambientes urbanos, como apartamentos, escritórios e outras áreas que possuem apenas uma das fachadas disponível para ventilação. No entanto, apesar de ser comumente empregadas na construção de edifícios, as aberturas unilaterais geralmente condicionam a entrada de ar devido à menor velocidade do ar interior em comparação com a ventilação cruzada, resultando em menor conforto térmico (Wang; Chen, 2012).

A ventilação de estratégia mista combina as características de ambas as abordagens, incluindo o escoamento horizontal através de aberturas em faces opostas do ambiente, o escoamento vertical baseado na flutuação térmica do ar e a ventilação unilateral através de aberturas localizadas na mesma fachada (Izadyar *et al.*, 2020).

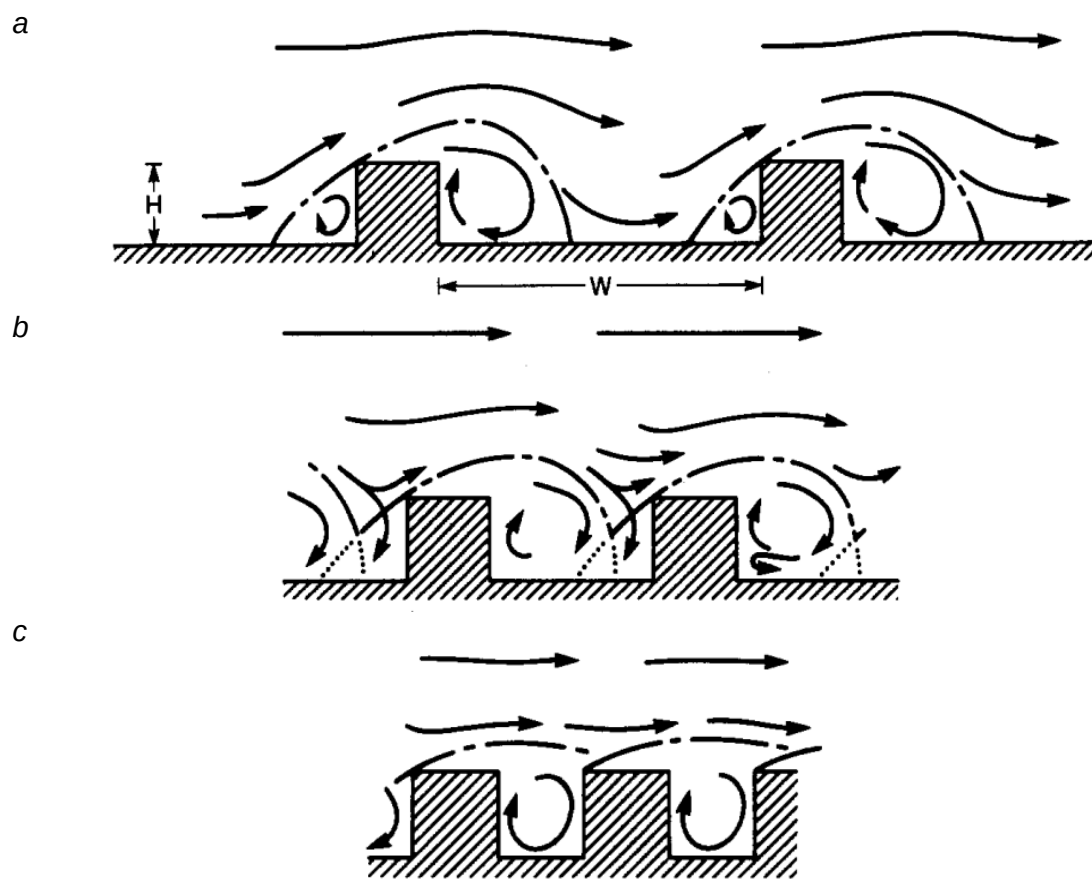
Segundo Izadyar *et al.* (2020), a localização e o tamanho das aberturas podem ser pontos críticos no escoamento de ar. Além disso, outros elementos, como o *design* da janela, varanda, chaminé, pátios e grades, podem influenciar significativamente o papel da ventilação natural. A ventilação cruzada, que apresenta o melhor desempenho, tem sido amplamente utilizada para reduzir a demanda energética, remover poluentes e proporcionar conforto aos pedestres. Além disso, o estudo da ventilação cruzada é um dos temas mais abordados quando se trata de conforto térmico (Shirzadi *et al.*, 2018).

4.2 EFEITOS DO VENTO NAS EDIFICAÇÕES

Cada edificação possui seu próprio campo aerodinâmico, que é influenciado por parâmetros como geometria, localização e direção do escoamento de ar. Esses fatores contribuem para o surgimento de fenômenos aerodinâmicos, como regiões de baixa velocidade, altas e baixas pressões, vórtices e zonas de turbulência. De acordo com Blessmann (1989), a presença de um obstáculo nas proximidades de uma edificação pode afetar significativamente o campo aerodinâmico e, conseqüentemente, os esforços exercidos pelo vento.

Oke (1988) explica que, em conjuntos de edificações alinhadas na direção do vento, podem ocorrer três diferentes regimes de escoamentos distintos, caracterizados pelos padrões do escoamento: regime de escoamento de corpo isolado, regime de interferência de esteira e regime de escoamento deslizante.

Figura 4 – Regimes de escoamento de ar sobre modelos genéricos com H/W crescente



Fonte: Oke (1988)

Para o caso do regime de escoamento isolado (Figura 4.a), as edificações estão localizadas a uma distância significativa ($W/H > 20$, w = largura da rua e H = altura da edificação), onde seus campos aerodinâmicos não interagem entre si (Oke, 1988). É possível observar a formação de vórtices próximos à base da fachada de cada edificação e o comprimento da região da esteira não atinge a próxima edificação (Carpeggiani, 2004). Dessa forma, o vento atua de maneira independente em cada edifício, como se as edificações estivessem isoladas, ocorrendo a formação completa da esteira para os modelos de edificação.

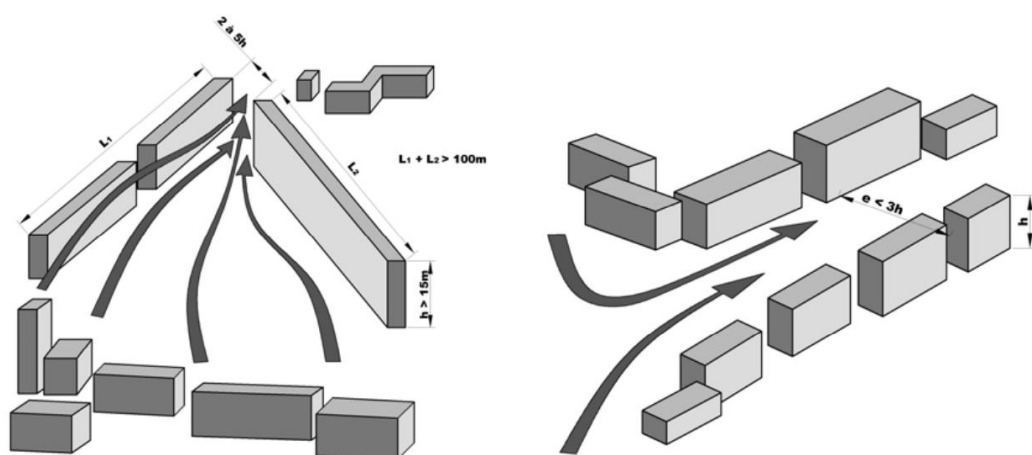
Quando a altura, espaçamento e densidade do modelo de edificação se combinam para perturbar os vórtices da cavidade, o escoamento muda para o regime de interferência de esteira (Oke, 1988). Nesse regime, não há espaço suficiente para formação completa da esteira (Figura 4.b), porém, o espaçamento ainda é significativo para permitir a existência de um único vórtice estável (Carpeggiani, 2004). O regime de interferência de esteira representa um estado intermediário entre os regimes de corpo isolado e deslizante (Figura 4.c). Nesse regime, os modelos de edificação estão suficientemente próximos, de

modo que um vórtice estável é estabelecido no vão entre as edificações, e a transição é caracterizada por um escoamento que desliza sobre o topo das edificações, com a maior parte do escoamento de ar não entrando no cânion entre elas (Oke, 1988).

Os efeitos de interferência do escoamento na presença de vizinhança podem causar alterações significativas na ação do vento sobre o modelo analisado. A norma brasileira que trata da ação do vento em edificações (NBR 6123/1988) apresenta em seu ANEXO G três modos de interferência por efeitos de vizinhança: efeito Venturi, deflexão do vento na direção vertical e turbulência de esteira.

Conforme definido pela NBR 6123/1988, o efeito Venturi caracteriza-se pelo afunilamento do escoamento, resultado da disposição das edificações, dimensões, formas e orientação, o que leva ao aumento da velocidade do ar com consequente alteração na pressão, conforme exemplificado na Figura 5. De acordo com a norma, esse efeito é observado principalmente nas faces confrontantes de duas edificações muito próximas, gerando coeficientes de pressão muito elevados na região próxima à aresta de barlavento.

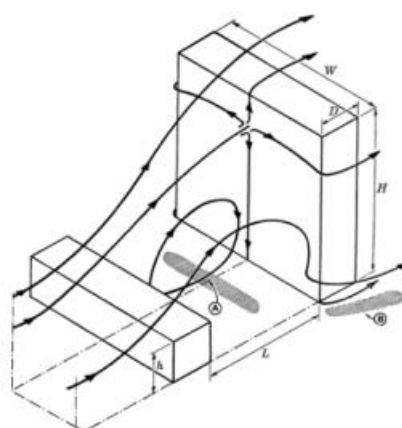
Figura 5 – Efeito Venturi



Fonte: Capecchi (2004)

O efeito de deflexão do vento na direção vertical, conforme estabelecido pela NBR 6123/1988, ocorre quando edificações mais baixas têm suas ações de vento aumentadas próximo ao solo devido à presença de modelos mais altos. Nesse caso, as edificações altas desviam para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Deflexão do vento na direção vertical



Fonte: A Autora (2023)

Nota: Adaptado de Wise (1971 *apud* Alberti, 2015)

A turbulência gerada na esteira de uma edificação causa alterações significativas de pressão e efeitos dinâmicos na edificação localizada a sotavento, de acordo com a NBR 6123/1988. Esse efeito, definido como turbulência da esteira (Figura 7), é mais relevante em edificações com coberturas e painéis de vedação feitos de materiais leves.

Figura 7 – Turbulência de esteira



Fonte: Carpeggiani (2004)

4.3 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Avaliar e prever o desempenho da ventilação natural exige o uso de ferramentas adequadas (Moonen *et al.*, 2012; Omrani *et al.*, 2017; Sakiyama *et al.*, 2020). As principais são baseadas em métodos analíticos/empíricos, métodos numéricos e métodos experimentais (Maliska, 2004; Chen, 2009). Os métodos analíticos e empíricos são considerados métodos simplificados, portanto, sua aplicação é bastante limitada e apresenta um alto grau de incerteza em casos complexos. O método experimental permite a manipulação das condições de contorno, porém, geralmente tem um custo elevado. Por

outro lado, o método numérico resolve problemas complexos com tempo e custo reduzido em comparação com o método anterior, além de permitir a manipulação das condições do escoamento (Tuomaala, 1993; Ramponi; Blocken, 2012; Blocken, 2015).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) surgiu como resultado do avanço da indústria aeroespacial, impulsionada pela Guerra Fria, e começa a ser aplicada em estudos de conforto térmico em edificações nas décadas de 1960 e 1970 (Zhai, 2006). A CFD é uma área que lida com a simulação numérica de escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados. Ela resolve numericamente um conjunto de equações diferenciais parciais (EDP) de conservação de massa, momento, energia, concentração de espécies químicas e quantidades de turbulências, fornecendo as distribuições de campo de pressão, velocidade e temperatura do ar, além de concentração de umidade, contaminantes e parâmetros de turbulência, entre outros (Versteeg; Malalasekera, 2007; Chen, 2009).

Assim como qualquer outro modelo que descreve o desempenho da ventilação natural, os modelos baseados na CFD também possuem incertezas, exigindo do usuário conhecimento sobre Mecânica dos Fluidos, além de uma máquina de alta capacidade para simulação dos casos. O funcionamento desses modelos ocorre por meio da resolução de equações de escoamento de fluidos em uma região de interesse, com condições de contorno específicas nas fronteiras. Um código numérico é uma ferramenta útil na redução de tempo de projeto, melhora do desempenho dos processos e para fornecer alternativas de custo-benefício e acurácia em comparação aos testes experimentais aplicados em modelos (Ferziger; Peric, 2002).

A crescente capacidade dos computadores e o desenvolvimento da interface dos programas têm permitido a ampliação de pesquisas com modelos numéricos, tornando-os cada vez mais populares na previsão do desempenho de ventilação no estudo da qualidade do ar interior, conforto térmico, segurança contra incêndio e desempenho de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC – *Heating, Ventilating and Air Conditioning*).

A consideração dos efeitos de turbulência na resolução das equações governantes do escoamento requer operações significativas para se levar em conta os vórtices formados no regime turbulento. Existem quatro principais modelos de turbulência que podem ser utilizados na CFD: *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES), *Reynolds Average Navier-Stokes* (RANS) e *Detached-eddy simulation* (DES), cujas definições serão exploradas posteriormente. A escolha do modelo de

turbulência depende das características do escoamento, do nível de precisão desejado, dos recursos computacionais disponíveis, entre outras características do problema.

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a etapa de pré-processamento é uma das fases mais importantes de uma simulação computacional, na qual são definidas as condições de entrada de dados de um escoamento em um *software* baseado na CFD por meio de uma interface. Entre as atividades que compreendem a etapa de pré-processamento estão: a definição do fenômeno físico a ser modelado, a definição do domínio computacional, geração da malha, determinação das propriedades do fluido e especificações das condições de contorno.

4.4 OPENFOAM

Os *softwares* baseados na CFD mais utilizados para pesquisas na área do Engenharia do Vento são ferramentas comerciais que impedem ou limitam as alterações em seu código-fonte. Dentre as ferramentas comerciais de simulação de fluidodinâmica mais empregadas, Fernandes e Moreira (2019) citam: *ANSYS-Fluent*, *ANSYS-CFX* e o *Flow3D*, que oferecem soluções completas, desde interfaces para a criação de malhas até *softwares* de pós-processamento. Embora os *softwares* comerciais tenham um nome mais consistente no mercado devido à boa acurácia apresentada nas simulações e ao suporte técnico oferecido, eles apresentam a desvantagem do alto custo de licença e restrições ao código-fonte. Entretanto, em alguns *softwares* podem-se criar funções definidas pelo usuário que permitem certa customização.

Essas limitações dos *softwares* comerciais incentivam o desenvolvimento de códigos próprios (“*in-house*”) ou a utilização de programas livres de código aberto, que permitem modificações, como é o caso do OpenFOAM (Gärtner *et al.*, 2020). Também é possível o desenvolvimento de *softwares Open Source*, nos quais a colaboração mútua de desenvolvedores em fóruns na internet permite uma melhor adaptabilidade do *software* (Fernandes; Moreira, 2019). Entre as desvantagens destes em comparação com os *softwares* comerciais, está o fato de que esses programas geralmente não possuem interface gráfica, o que dificulta a interação com o usuário.

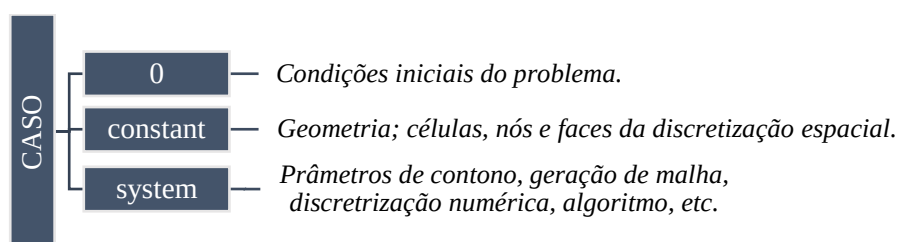
O OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*) é uma ferramenta computacional escrita em linguagem C++, sem restrições de acesso, permitindo operar e manipular campos tensoriais de problemas da Fluidodinâmica. O *software* consta com uma vasta biblioteca de *solvers* e utilitários que o usuário pode personalizar. Isso possibilita uma melhor adequação dos modelos do pacote aos problemas específicos,

permitindo que o usuário acesse o código-fonte e faça alterações nos códigos existentes ou crie novas rotinas (OpenFOAM Foundation, 2019).

Além das capacidades de simulação, o *software* possui ferramentas abrangentes para pré-processamento e pós-processamento (através do *ParaView*). Ele é capaz de gerar e refinar malha, além de suportar modelos para escoamentos tridimensionais, turbulentos e laminares, compressíveis e incompressíveis, regimes permanentes ou transientes, transferência de calor, isotérmicos e modelagem de turbulência RANS, LES, DNS, entre outras (Barradas, 2016; Da Silva; Freire, 2020).

A organização das simulações ocorre por meio de diretórios que contêm um conjunto de arquivos responsáveis por armazenar as informações necessárias para a execução das simulações. Esses arquivos contêm informações sobre a descrição da geometria, detalhes da malha, condições de contorno, parâmetros para os métodos numéricos, além das propriedades físicas do problema, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Organização de um caso no OpenFOAM



Fonte: A Autora (2023)

O OpenFOAM oferece diversos solucionadores para problemas da Fluidodinâmica, onde os principais *solvers* para fluidos incompressíveis (com ρ constante) são os seguintes (OPENFOAM Foundation, 2019):

- *pisoFoam* – escoamento incompressível, transiente (Algoritmo *PISO*), laminar ou turbulento.
- *pimpleFoam* – escoamento incompressível, estacionário (Algoritmo *PIMPLE*), laminar ou turbulento.
- *simpleFoam* – escoamento incompressível, estacionário (Algoritmo *SIMPLE*), laminar ou turbulento.
- *icoFoam* – escoamento incompressível, transiente (Algoritmo *PISO*), laminar.

Nos exemplos analisados neste estudo, utilizou-se o *solver simpleFoam*, que é baseado no método semi-implícito para equações acopladas, conhecido como SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*). Este solver é escolhido para problemas de escoamento com baixa complexidade, particularmente quando há restrições

de recursos computacionais e limitações de tempo, como é o caso do presente estudo. De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), no algoritmo SIMPLE, um campo de pressão inicial arbitrário é assumido para resolver a equação de momento e, a partir da equação de continuidade, é obtida uma equação de correção de pressão que é usada para atualizar os campos de pressão e velocidade. O método é iterativo, em que os campos estimados progridem até que a convergência seja alcançada. Devido à não linearidade e ao acoplamento dos campos de velocidade e pressão com a equação da continuidade, o algoritmo fica susceptível à divergência. Portanto, para garantir a estabilidade e convergência, são aplicados fatores de relaxação.

4.5 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica da dinâmica dos fluidos é uma abordagem para representar problemas reais, como a ventilação natural, por meio de modelos matemáticos. O modelo matemático consiste em um conjunto de equações conservativas aplicadas a um volume de controle, sujeito a condições iniciais e de contorno específicas. Essas equações, que descrevem o movimento do fluido, são baseadas nas leis de conservação da Física, conhecidas como leis da conservação de massa, momento e energia. A distribuição das propriedades do escoamento no espaço e no tempo é representada pela solução dessas equações, que podem ser formuladas como relações integrais ou diferenciais (Versteeg; Malalasekera, 1995).

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), as equações que descrevem o escoamento tridimensional, transiente e incompressível de um fluido newtoniano com transferência de calor podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i \mathbf{u}) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (k_T \nabla T) + \Phi + S_i \quad (5)$$

$$p = p(\rho, T) \quad (6)$$

$$i = i(\rho, T) \quad (7)$$

onde:

- $\mathbf{u}$ – Vetor velocidade;
- u, v, w – Componentes de $\mathbf{u}$ nas direções x, y e z , respectivamente;
- t – Tempo;
- p – Pressão;
- ρ – Densidade;
- μ – Viscosidade dinâmica;
- S_* – Termos fonte;
- T – Temperatura;
- k_T – Condutividade térmica;
- i – Energia interna térmica;
- Φ – Função de dissipação.

A Equação (1), conhecida como equação de continuidade ou equação de conservação de massa, descreve o princípio da conservação de massa, que estabelece que a taxa de variação da massa por unidade de volume é igual ao fluxo líquido de massa através das fronteiras do volume de controle. As equações (2), (3) e (4), conhecidas como equações de quantidade de movimento nas direções x, y e z , respectivamente, são as chamadas equações de Navier-Stokes. Essas equações descrevem o equilíbrio de forças que atuam no volume de controle, onde a taxa de variação da quantidade de movimento é igual à ação das forças de pressão, forças de corpo e forças viscosas, baseando-se na Segunda Lei de Newton. Por fim, a equação de energia (5) considera os mecanismos que podem alterar a energia interna do fluido, incluindo transferência de calor por condução, advecção e radiação, dissipação viscosa e fontes ou sumidouros de energia.

Para o caso de um escoamento isotérmico e incompressível, modelo estudado no presente trabalho, pode-se simplificar as equações governantes, conforme:

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (u \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\nu \nabla u) + S_{Mx} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\nu \nabla v) + S_{My} \quad (10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (w \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\nu \nabla w) + S_{Mz} \quad (11)$$

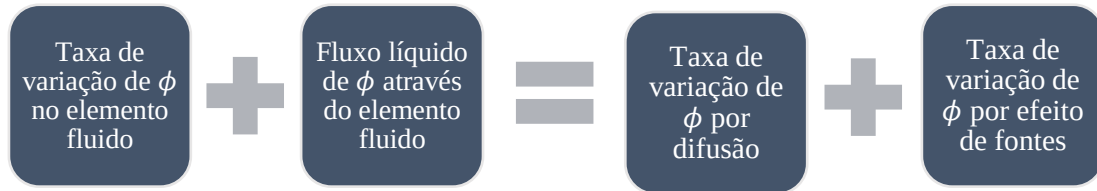
onde ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Como pode ser observado, as equações de conservação são formalmente idênticas. Para Versteeg e Malalasekera (2007), se introduzir a variável genérica ϕ , é possível reescrever todas as equações na seguinte forma condensada:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (12)$$

que, por outras palavras, pode ser representado pela Figura 9.

Figura 9 – Esquema de dimensões do domínio computacional



Fonte: A Autora (2023)

Nota: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007)

A Equação (12) designa a equação de transporte da propriedade de ϕ , que pode assumir as variáveis 1, u , v e w , e traduz o balanço, por um lado, da derivada local da propriedade de ϕ somada a um termo advectivo e, por outro lado, de um termo difusivo (Γ = coeficiente difusivo) somado aos termos fonte.

Embora as equações que descrevem o escoamento de fluidos sejam representações adequadas, elas só podem ser resolvidas analiticamente em casos muito simples. Para geometrias complexas, é necessário recorrer a métodos numéricos que discretizem o domínio e resolvam os sistemas de equações diferenciais para representar o comportamento dinâmico do fluido. Os métodos tradicionais utilizados para a solução desses sistemas, de acordo com Maliska (2004), são o Método das Diferenças Finitas (*Finite Difference Method* - FDM), o Método dos Volumes Finitos (*Finite Volume Method* - FVM) e o Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method* - FEM).

De forma resumida, o FDM trabalha com a discretização de pontos no espaço, o FEM divide o espaço em subdomínios e o FVM utiliza volumes de controle. De acordo com Petrova (2012), o Método dos Volumes Finitos é amplamente utilizado em programas comerciais de Dinâmica dos Fluidos, sendo empregado em aproximadamente 80% dos casos, sendo esse o método adotado neste trabalho.

4.5.1 Formulação numérica

O Método dos Volumes Finitos é uma técnica que transforma as equações diferenciais parciais em equações algébricas discretas sobre volumes finitos. Inicialmente, o domínio de interesse é discretizado em elementos não sobrepostos, denominados de volumes de controle (V_C), seguindo uma abordagem similar aos métodos

das Diferenças Finitas e dos Elementos Finitos. Em seguida, as equações diferenciais parciais são transformadas em equações algébricas integrando-as sobre cada elemento discreto. Por fim, é resolvido o sistema de equações algébricas para obter os valores das variáveis dependentes para cada um dos volumes (Moukalled; Mangani; Darwish, 2015).

De acordo com Moukalled, Mangani e Darwish (2015), o Método dos Volumes Finitos é amplamente utilizado na CFD devido à sua característica conservativa e ser fisicamente consistente, que o torna vantajoso em diversas aplicações. No MVF, alguns termos das equações de conservação são transformados em fluxos nas faces dos volumes de controle (V_C). Esses fluxos são avaliados nas faces dos V_C , garantindo que os princípios de conservação sejam satisfeitos em nível elementar e global. No OpenFOAM, o MVF emprega o arranjo colocalizado, em que todas as variáveis do escoamento são armazenadas no centroide do volume de controle. Os valores dos fluxos nas faces são calculados através de interpolação a partir dos valores dos V_C adjacentes.

Para Ferziger e Peric (2002) o MVF apresenta várias vantagens. Ele pode ser formulado em malhas poligonais não estruturadas no espaço físico, o que proporciona flexibilidade na representação geométrica. Além disso, é fácil implementar novas variáveis, que são analisadas no centroide dos volumes de controle. No entanto, uma desvantagem mencionada pelos autores é que o método envolve três níveis de aproximação: interpolação, derivação e integração.

A metodologia empregada na discretização das equações, no contexto do MVF, é detalhada por Maliska (2004) e Versteeg e Malalasekera (2007). Inicialmente, integra-se cada termo da equação de conservação no volume de controle. Em seguida, integram-se ambos os lados da equação no intervalo temporal, como apresentado na equação abaixo:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_C} \phi dV + \int_S \phi \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial}{\partial t} \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{S} + \int_{V_C} S_\phi dV \right] dt \quad (13)$$

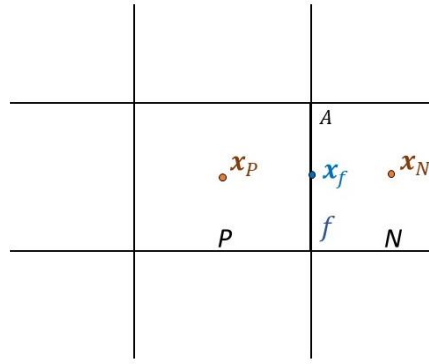
Os termos referentes ao transporte advectivo e difuso, relacionados ao segundo termo do lado esquerdo e ao primeiro termo do lado direito, respectivamente, são escritos em termos de integrais de superfície através da aplicação do Teorema de Gauss.

Na Equação (13), é possível observar que a quantidade ϕ , dentro de um volume de controle e seus contornos, varia apenas temporalmente. O volume de controle se comunica com o restante do domínio espacial por meio de seu contorno, onde o fluxo é computado. Em resumo, o MVF busca resolver a forma integral das equações de

transporte, sendo que a discretização apresentada na Equação (13) representa a reconstrução numérica das integrais.

A integração é aproximada com base na suposição de que o campo ϕ é linearmente distribuído dentro do volume de controle e em suas superfícies. Essa suposição é uma aproximação de primeira ordem baseada na expansão de Taylor de ϕ . Na Figura 10, apresenta-se um esquema unidimensional simplificado de um volume de controle (P) e seu volume vizinho (N). Os centros geométricos de cada volume são representados por x_P e x_N . A face f (com área A) comum a ambos os volumes de controle possui um centro geométrico representado por x_f .

Figura 10 – Esquema unidimensional de um volume de controle



Fonte: A Autora (2023)

Nota: Adaptado de Nascimento (2019)

Define-se o centro do volume de x_p de acordo com:

$$\int_P (x - x_p) dV = 0 \quad (14)$$

enquanto que o centro da face x_f é definido de acordo com:

$$\int_{A_f} (x - x_f) dA = 0 \quad (15)$$

A expansão em série de Taylor da variável ϕ resulta nas equações a seguir, onde identificam-se os Termos de Ordem Superior (T.O.S):

$$\phi(x) = \phi_p + (x - x_p)(\nabla\phi)_p + T.O.S. \quad (16)$$

$$\phi(x) = \phi_f + (x - x_f)(\nabla\phi)_f + T.O.S. \quad (17)$$

Dessa forma, a integral do volume fica no formato definido por:

$$\begin{aligned} \int_{V_c} \phi(x) dV &\approx \int_{V_p} (\phi_p + (x - x_p)(\nabla\phi)_p) dV \\ &\approx \phi_p \int_{V_p} dV + \int_{V_p} (x - x_p)(\nabla\phi)_p dV \approx \phi_p V_p \end{aligned} \quad (18)$$

4.5.2 Modelagem da turbulência

Com o objetivo de lidar com a complexidade de um escoamento turbulento, são utilizados modelos que auxiliam na resolução das equações que governam o escoamento. A simulação numérica da turbulência envolve a resolução das equações de Navier-Stokes, assumindo que essas representam todos os movimentos decorrentes da turbulência, considerando todas as faixas de escalas de comprimento e tempo presentes no escoamento, calculando as variáveis de interesse.

Inicialmente, os modelos de turbulência podem ser divididos em quatro grupos (Spalart *et al.*, 1997; Wilcox, 2006; Versteeg; Malalasekera, 2007; Spalart, 2009):

- Simulações Numéricas das Equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*): este modelo investiga o comportamento médio do escoamento e os efeitos da turbulência nas propriedades do escoamento médio. A aplicação de um conjunto de médias no tempo leva a geração de termos extras nas equações de fluxo de média de tempo devido a interações entre várias componentes de flutuações turbulentas. Esses termos extras são modelados com modelos clássicos de turbulência, entre os mais conhecidos e empregados estão os modelos: *Standard k – ε* (SKE), *Renormalization Group k – ε* (RNG), *Realizable k – ε* (RLZ), *Shear Stress Transport k – ω* (SST), *Spalart-Allmaras* (SA), *Reynolds Stress Model* (RSM), entre outros. Alguns modelos RANS permitem a modelagem de flutuações transientes de forma limitada ao introduzir termos adicionais nas equações de transporte, como é o caso dos modelos EARS (Explicit Algebraic Reynolds Stress Model) e o modelo SST-SAS (*Scale-Adaptive Simulation*).
- Simulação de Grande Escala (LES – *Large Eddy Simulation*): essa técnica é considerada uma abordagem intermediária de cálculo da turbulência, pois acompanha o comportamento dos grandes redemoinhos. O método baseia-se na filtragem espacial das equações de Navier-Stokes, calculando diretamente as

grandes escalas e modelando as pequenas. Isso permite capturar parte dos efeitos transientes do escoamento.

- Simulação Numérica Direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*): todas as escalas de turbulência são resolvidas numericamente, levando em conta todas as flutuações temporais no escoamento (efeitos transientes). Isso é computacionalmente intensivo, onde é necessário empregar uma discretização de malha muito fina com intervalos de tempo suficientemente pequenos para resolver toda a gama de escalas turbulentas.
- Modelagem Híbrida da Turbulência (DES – *Detached-eddy simulation*): utiliza uma abordagem híbrida entre as modelagens RANS e LES, que visa capturar efeitos transientes na camada limite, onde a turbulência é mais intensa. Nas regiões próximas às paredes são tratadas pela metodologia RANS, enquanto que no resto do domínio são determinadas as escalas turbulentas de tamanho médio e grande por meio da metodologia LES.

Entre as técnicas de resolução do escoamento turbulento, a DNS é a única capaz de resolver todo o espectro de estruturas turbilhonares que compõem um escoamento turbulento. No entanto, devido às altas demandas de resolução espacial e temporal necessárias para uma caracterização adequada, a aplicação prática da DNS limita-se aos escoamentos com baixo ou moderado número de Reynolds, ou seja, na resolução de problemas sem interesse prático para a Engenharia (Silveira Neto, 1998; Freire; Menut; Su, 2002; Argyropoulos; Markatos, 2015).

Na metodologia LES, resolve-se diretamente as maiores escalas de turbulência (baixa frequência) e aproxima-se apenas as menores escalas de turbulência (alta frequência), a depender da discretização espacial e temporal empregada. Por outro lado, na metodologia RANS, todo o espectro de escala de turbulência é aproximado (Sagaut, 2006). Devido a essas considerações, as simulações RANS tem um custo computacional significativamente menor do que as simulações LES.

O modelo híbrido DES, proposto por Spalart *et al.* (1997), baseia-se na necessidade de resolver problemas com altos números de Reynolds, regiões de escoamentos massivamente separadas e camadas cisalhantes intensas, características típicas das áreas aeronáuticas e da Engenharia de Vento, combinando as vantagens das metodologias RANS e LES. O objetivo do DES é reduzir o custo computacional de uma simulação LES, mantendo uma boa exatidão nas regiões de interesse. Existem vários modelos

híbridos de fechamento para a metodologia DES, uma vez que ela pode ser obtida a partir de diversos modelos de fechamento RANS (Silveira Neto, 2020).

Os modelos RANS, LES e DES realizam uma decomposição das equações governantes em um campo médio ou filtrado e um campo de flutuações, resultando em um problema de fechamento da turbulência, no qual há mais incógnitas do que equações para resolver. Portanto, são desenvolvidos diversos modelos de fechamento para lidar com essa questão.

No presente estudo, foi utilizado um modelo de turbulência RANS devido a que proporcionam uma boa relação custo computacional-benefício. Especificamente, foi adotado o modelo de fechamento $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*), amplamente empregado para simulações de escoamento turbulento em ambientes urbanos. Esse modelo tem demonstrado boa acurácia em relação aos dados experimentais, conforme observado em estudos como os de Perén *et al.* (2015), Ricci *et al.* (2020) e Shirzadi, Tominaga e Mirzale (2020), entre outros.

4.5.2.1 RANS

Aplicando a decomposição de Reynolds às equações de Navier-Stokes, é possível obter as equações para valores médios do escoamento. Essa decomposição descreve os valores instantâneos das variáveis do movimento turbulento como uma variação aleatória em torno dos valores médios, com uma soma entre valor médio $\bar{\phi}$ e uma flutuação ϕ' , conforme:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (19)$$

onde $\bar{\phi}$ é resultante de uma média temporal, conforme:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi \, dt \quad (20)$$

Considerando a média das flutuações nula, pela própria definição (Moukalled; Mangani; Darwish, 2015):

$$\overline{\phi'} = 0 \quad (21)$$

Logo, a estratégia consiste em transformar os parâmetros das equações conservativas nos respectivos valores médios, resultando em uma nova formulação. Nessa formulação, apenas termos lineares estão envolvidos, sendo similar à formulação original, mas com a substituição dos campos instantâneos pelos campos médios. No

entanto, conforme apresentado por Moukalled, Mangani e Darwish (2015), a equação de momento sofre mudanças quando se aplica as propriedades mencionadas acima nas equações (9) à (11).

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -(\nabla \bar{p}) + \nabla(\mu \nabla \otimes \bar{\mathbf{u}}) - \nabla \left[\left(\bar{\mathbf{u}}' \otimes \bar{\mathbf{u}}' \right) \right] \quad (22)$$

Outra diferença entre a Equação (22) e as equações de Navier-Stokes é a presença do último termo, conhecido como tensor de Reynolds, que representa a influência das flutuações turbulentas no escoamento médio. A introdução desse tensor aumenta o número de incógnitas e, conseqüentemente, impossibilita a resolução do sistema matemático de forma direta, o que resulta no chamado problema de fechamento matemático da turbulência. Para solucionar esse problema, é necessário introduzir algum dos modelos para avaliar o tensor de Reynolds, que podem ser classificados como modelos de viscosidade turbulenta e modelos de fechamento de segunda ordem.

Os modelos de viscosidade turbulenta relacionam a tensão de Reynolds com uma função da viscosidade turbulenta e o tensor taxa de deformação do escoamento médio. Por outro lado, os modelos de fechamento de segunda ordem resolvem versões simplificadas do tensor utilizando várias aproximações e hipóteses.

4.5.2.2 Hipótese de Boussinesq

A hipótese de Boussinesq, introduzida por Boussinesq em 1877, assume que as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de velocidade média do escoamento, de forma análoga à Lei da Viscosidade de Newton, que define as tensões viscosas no escoamento laminar. Nessa hipótese, o coeficiente de proporcionalidade é chamado de viscosidade turbulenta (μ_t), levando à seguinte expressão:

$$\tau^R = -(\bar{\mathbf{u}}' \otimes \bar{\mathbf{u}}') = \mu_t \{ \nabla \otimes \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}})^T \} - \frac{2}{3} [k + \mu_t \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}})] \mathbf{I} \quad (23)$$

Para escoamento incompressível pode-se reduzir a equação para:

$$\tau^R = -(\bar{\mathbf{u}}' \otimes \bar{\mathbf{u}}') = \mu_t \{ \nabla \otimes \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}})^T \} - \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (24)$$

onde k é a energia cinética turbulenta, definida de acordo com:

$$k = \frac{1}{2} (\bar{\mathbf{u}}' \cdot \bar{\mathbf{u}}') = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (25)$$

Com essa aproximação, a hipótese de Boussinesq simplifica significativamente o problema de fechamento, transformando o cálculo das componentes da tensão de Reynolds em um problema de cálculo de energia cinética turbulenta e da viscosidade turbulenta. Observando o critério da introdução da viscosidade turbulenta nas equações de Navier-Stokes, Wilcox (2006) apresenta quatro categorias de modelos de turbulência: algébricos ou de ordem zero, de uma equação, de duas equações e equações de transporte do tensor de Reynolds.

A seguir é apresentado o modelo de fechamento utilizado neste trabalho.

4.5.2.3 Modelo $k - \omega$ SST

Devido à necessidade de modelar eficientemente escoamentos com fortes gradientes adversos de pressão e separação da camada limite, o modelo *Shear Stress Transport* $k - \omega$ (SST) foi desenvolvido a partir da combinação dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ (Menter, 1994). Nesse modelo, a viscosidade turbulenta é modelada em função da energia cinética turbulenta (k) e da taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta (ω). A combinação desses modelos permite incorporar as vantagens conhecidas de cada um, em que o SST se comporta como o modelo $k - \omega$ próximo às paredes e como o modelo $k - \varepsilon$ na região da corrente livre. Dessa forma, a solução do escoamento é menos sensível às condições de contorno.

O modelo $k - \omega$ SST utiliza funções de mistura F_1 e F_2 , que ponderam a contribuição dos diferentes parâmetros de cada modelo. Essas funções de mistura têm como objetivo definir o modelo $k - \omega$ padrão para a região da camada limite de turbulência e o modelo $k - \varepsilon$ para a região externa à camada. Dessa forma, a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação específica do modelo SST são determinadas, respectivamente, por (Menter; Kuntz; Langtry, 2003):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho \sigma_k \nabla k) + \rho P_k - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \beta^* \omega k + S_k \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho \sigma_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho \gamma P_k}{\nu} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \\ \rho \beta \omega^2 - \rho (F_1 - 1) D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (27)$$

onde S_k e S_ω são os termos fonte que o próprio usuário pode especificar a fim de definir o problema de acordo com seu interesse.

Para evitar níveis excessivos de tensão de cisalhamento na camada limite é introduzido um limite superior de tensão, conforme previsto em modelos de viscosidade turbulenta de Boussinesq. A viscosidade cinética turbulenta no modelo $k - \omega$ SST é definida como:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, b_1 S F_2)} \quad (28)$$

onde as constantes empíricas a_1 e b_1 valem 0,31 e 1, respectivamente, e S é a medida invariante da taxa de deformação (Menter *et al.*, 2003).

A função de mistura F_1 é definida como:

$$F_1 = \tanh(\phi_1^4) \quad (29)$$

sendo:

$$\phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \alpha_{\omega 2} \frac{4 \rho k}{D_{\omega}^+ y^2} \right] \quad (30)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left(2 \rho \alpha_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right) \quad (31)$$

onde y é a distância à parede e $\alpha_{\omega 2} = 0,856$ é uma constante empírica inerente ao modelo.

A função de mistura para viscosidade turbulenta (F_2), no modelo $k - \omega$ SST, é definida como:

$$F_2 = \tanh(\phi_2^2) \quad (32)$$

$$\phi_2 = \max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \quad (33)$$

No modelo $k - \omega$ SST a produção de energia cinética é limitada para prevenir o acúmulo de turbulência em regiões de estagnação, em sua forma compacta, é definida por:

$$P_k = \tau^R: [\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}}] \quad (34)$$

Os parâmetros dos termos de geração de ω dependem da seguinte equação:

$$\gamma = \gamma_{\infty} \left(\frac{1 + \frac{Re_t}{2,95}}{1 + \frac{Re_t}{2,95}} \right) \quad (35)$$

Onde:

$$\gamma_{\infty} = F_1 \gamma_{\infty 1} + (1 - F_1) \gamma_{\infty 2} \quad (36)$$

$$Re_t = \frac{k}{\nu \omega} \quad (37)$$

A constante empírica do modelo é definida através da relação:

$$\varphi = \varphi_1 F_1 + \varphi_2 (1 - F_2) \quad (38)$$

onde φ representa a constante do modelo SST, e φ_1 e φ_2 são as constantes dos modelos $k - \omega$ e $k - \varepsilon$, respectivamente. Logo, a constante φ é calculada usando a função de mistura entre as constantes de ambos modelos.

Na Tabela 1 são apresentados os coeficientes empregados no OpenFOAM durante as simulações com o modelo $k - \omega$ SST.

Tabela 1 – Coeficientes adotados no modelo $k - \omega$ SST

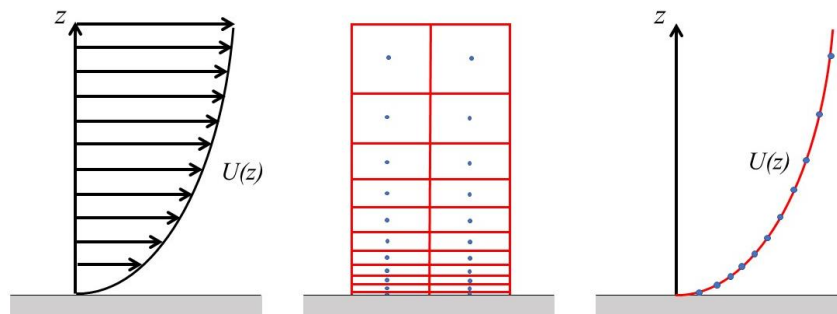
$\alpha_{k,1}$	$\alpha_{k,2}$	$\alpha_{\omega,1}$	$\alpha_{\omega,2}$	$\gamma_{\infty 1}$	$\gamma_{\infty 2}$	β_{i1}	β_{i2}	β^*	a_1	b_1
0,85	1	0,5	0,856	5/9	0,44	0,075	0,0828	0,09	0,31	1

Fonte: OpenFOAM Foundation (2019).

4.5.2.4 Tratamento de parede

O escoamento é influenciado pela presença de um contorno sólido, na região fina próxima à parede, conhecida como camada limite, o gradiente de velocidade na direção normal à parede é alto, como mostra-se esquematicamente na Figura 11.

Figura 11 – Discretização de uma camada de células de malha para capturar o gradiente de velocidade acentuado



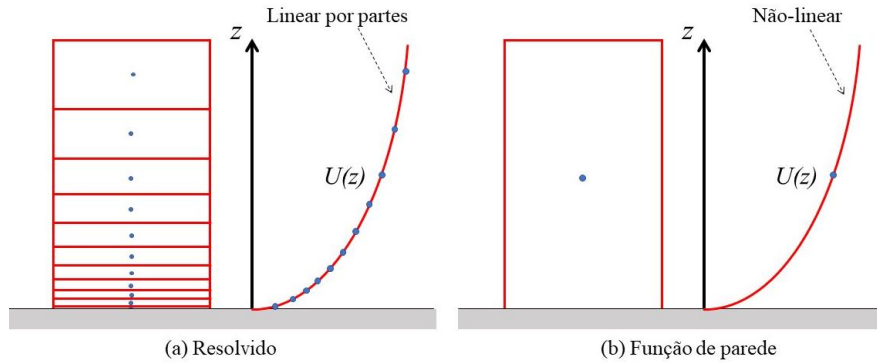
Fonte: A Autora (2023)

Nota: Adaptado de Nobre (2021)

Em problemas com alto número de Reynolds, a resolução do gradiente de velocidade na camada limite é difícil, sendo necessário empregar uma discretização com uma malha bastante refinada (Ferziger; Peric, 2002). No entanto, à medida que o

refinamento da malha cresce, o custo computacional das simulações aumenta. Esse problema pode ser evitado a partir do emprego de funções baseadas na lei de parede (Figura 12.b), as quais são capazes de modelar o escoamento próximo a superfícies sólidas. Dessa forma, a célula adjacente à parede não precisa ser tão pequena.

Figura 12 – Substituição da função de parede para alto número de *Reynolds* na resolução linear do perfil de velocidade com várias células por uma única célula e um conjunto de equações não-lineares



Fonte: A Autora (2023)

Nota: Adaptado de Nobre (2021)

Observa-se que o perfil de velocidade próximo à parede sólida na camada limite de um escoamento turbulento depende apenas de parâmetros relevantes nessa região e não da velocidade da corrente livre U_∞ ou de um comprimento característico δ . Devido à camada nessa região ser muito fina, a tensão de cisalhamento na superfície (τ_w) é praticamente constante, sendo o perfil da velocidade adimensional definido por:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (39)$$

onde u_τ é a velocidade de atrito, dada por:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (40)$$

Mais afastado da parede o perfil de velocidade é dado pela lei logarítmica, conforme a equação abaixo:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (41)$$

onde κ é a constante de Von Karmán, igual a 0,41, C é uma constante igual a 5 e y^+ é a distância adimensional até a parede, dada pela equação:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (42)$$

As diferentes regiões da camada limite turbulenta podem ser divididas em três camadas em função do y^+ e definidas por Tennekes e Lumley (1972) como sendo:

- Subcamada viscosa: $0 < y^+ < 5$ – nessa região a turbulência é desprezível e predominam os efeitos viscosos moleculares. Essa camada é representada pela Equação (41).
- Camada de transição: $5 < y^+ < 30$ – é uma pequena região de transição entre as camadas viscosas e inercial, onde encontra-se tanto efeitos viscosos como turbulentos.
- Camada logarítmica: $30 < y^+ < 300$ – nessa região as tensões turbulentas dominam e a tensão de cisalhamento varia suavemente com a distância à parede seguindo o perfil de velocidade logarítmico, conforme a Equação (41).

5 METODOLOGIA

No presente trabalho, será avaliada a influência da ventilação natural em diferentes configurações de edificações dispostas em série com modelos bidimensionais e tridimensionais (2D e 3D), através do modelo de turbulência RANS $k - \omega$ SST empregado no *software* OpenFOAM. Embora o fenômeno da turbulência seja essencialmente tridimensional, no presente trabalho adota-se inicialmente a hipótese bidimensional aplicada a simulação de corpos alongados, onde a instabilidade gerada é basicamente bidimensional não apresentando variação significativa na direção transversal, somada a justificativa relacionada ao custo computacional, sendo possível o estudo de um maior número de casos, conforme também empregado por outros autores (Kim; Son; Cho, 2001; Jakirlic, 2012; Espath *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2018, Schmelzer *et al.*, 2020).

Inicialmente, será realizado um estudo analisando uma edificação isolada contendo aberturas em faces opostas, usada como parâmetro de referência dos demais modelos. Posteriormente, será conduzida uma análise de três edificações dispostas em séries com diferentes configurações e espaçamentos, onde todas possuem a mesma geometria, com exceção das edificações de sotavento e barlavento, que não possuem aberturas.

O trabalho foi desenvolvido no LECOM (Laboratório de Engenharia Computacional), localizado na UFPE – CAA (Centro Acadêmico do Agreste), onde trabalhos dessa mesma natureza já vêm sendo realizados, como: Nascimento (2019), que também trata da análise da ventilação natural em edificações; Cavalcante (2019), que estudou a aerodinâmica de edificações para utilização de geradores de energia eólica; Silva (2021) e Silva (2022), que avaliaram a influência das cargas de vento na otimização topológica de edifícios. Todos os trabalhos utilizaram o OpenFOAM como ferramenta numérica para simulação.

A primeira fase da simulação baseia-se na etapa de pré-processamento, que consiste na preparação e definição dos dados de entrada, além da criação do domínio computacional e discretização espacial desse domínio. Para os modelos bidimensionais é empregado o *software* de código aberto Salomé-MECA 9.3, tanto para criação do domínio como para discretização em volumes finitos (método numérico empregado).

Na etapa de processamento, faz-se uso do *software* OpenFOAM 5.0 (do inglês *Open Source Field Operation and Manipulation*), que é uma ferramenta CFD baseada no Método dos Volumes Finitos, escrita em linguagem C++ de distribuição livre e gratuita. Para isso é adotado o *solver* *SimpleFoam*, que realiza o acoplamento entre velocidade e

pressão, recomendado para simulações de escoamentos turbulentos com massa específica constante. Quanto à discretização do domínio tridimensional, emprega-se o utilitário de geração de malha tridimensional *SnappyHexMeshDict*, implementado no diretório “*system*” do OpenFOAM. Nesse processo, a malha é gerada iterativamente a partir de uma malha base gerada pelo *BlockMeshDict*.

Para os casos analisados no presente estudo as simulações são realizadas com escoamento em regime permanente. A escolha de cada esquema segue as recomendações do manual do usuário do OpenFOAM (OpenFOAM Foundation, 2019). Para a discretização da derivada temporal utiliza-se o esquema *steadyState*, que ignora os termos derivativos temporais nas equações de transporte obtendo uma resposta permanente no escoamento. Para os termos difusivos, a fim de melhorar a acurácia, faz-se uso do esquema de discretização de operador gradiente *Gauss Linear*. Já para os termos advectivos, que precisam de maior estabilidade numérica, utiliza-se o esquema de operador divergente *Gauss linear Upwind* (*Upwind* de Segunda Ordem).

Na resolução dos sistemas de equações, utiliza-se o solver *GAMG* (*Generalised geometric-algebraic multi-grid*) para as equações de pressão e o solver *smooth* com esquema *Gauss-Seidel* para as equações de velocidade e as variáveis de turbulência, conforme práticas adotadas por Nascimento e Bono (2022). Para todas as simulações, foi adotada como condição de parada uma tolerância de 10^{-4} para cada variável absoluta do escoamento, com um coeficiente de relaxação de 0,3 para pressão e 0,7 para as demais propriedades.

Na etapa de pós-processamento, referente a visualização e captura dos resultados, emprega-se o *software ParaView 5.4.1*, também de código aberto. A dinâmica do escoamento foi avaliada com a observância de parâmetros de velocidade, pressão e vazão, bem como a trajetória, espalhamento e ângulo de inclinação de jato na abertura de entrada.

No presente trabalho, são estudados dois casos (2D e 3D) nos quais avalia-se o escoamento cruzado em uma edificação com aberturas em faces opostas, considerando diferentes configurações de vizinhança. Inicialmente, realiza-se a validação dos modelos bidimensionais através da simulação de cânions de rua bidimensional comparando os resultados com dados experimentais. Em seguida, faz-se uma análise de sensibilidade de malha para o modelo de edificação isolada 2D, avaliando a qualidade da malha por meio do índice de convergência de malha. Sucessivamente, é realizada a validação e o estudo de independência de malha para o modelo 3D.

Após comprovada a exatidão dos modelos 2D e 3D por meio da validação e definida

a malha para ambos os casos, faz-se a análise da ventilação natural. Para os modelos bidimensionais são estudadas dez diferentes disposições de uma edificação com abertura cruzada inserida em diferentes configurações de vizinhança, variando o espaçamento entre as edificações. Quatro desses modelos são simulados tridimensionalmente para análise da ventilação natural cruzada e comparação com os resultados dos modelos bidimensionais.

Todo o processo de preparação de malhas, validação e processamento das simulações foram realizadas em uma única máquina, cujas configurações principais são: sistema operacional de 64bits com 8 núcleos e 16 processadores lógicos; sistema *Windows 11 Home Single Language*, versão 22H2; memória RAM de 16GB e sistema base *Intel core i7, 11800h* e 2.30GHz de velocidade; com placa de vídeo *NVIDIA GeForce RTX 3060*.

5.1 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

5.1.1 Validação

Para realizar uma avaliação quantitativa do desempenho do modelo de fechamento $k - \omega$ SST empregado neste estudo, quatro métricas de validação são utilizadas: o fator de amplitude de coerência 2 (FAC2), o fator de amplitude de coerência 1.3 (FAC1.3), o erro médio quadrático normalizado (NMSE) e a tendência fracionária (FB) (Efthimiou; Santiago; Martilli, 2011). No entanto, para parâmetros que podem possuir componentes positivas e negativas as métricas NMSE e FB não foram utilizadas, como é o caso da velocidade (Efthimiou; Santiago; Martilli, 2011).

As métricas são calculadas usando as seguintes equações:

$$FAC2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad \text{com } n_i = \begin{cases} 1 & \text{para } 0.5 \leq \frac{P_i}{O_i} \leq 2 \\ 0 & \text{se não} \end{cases} \quad (43)$$

$$FAC1.3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad \text{com } n_i = \begin{cases} 1 & \text{para } 0.77 \leq \frac{P_i}{O_i} \leq 1.3 \\ 0 & \text{se não} \end{cases} \quad (44)$$

$$NMSE = \frac{\overline{(O_i - P_i)^2}}{\overline{O_i P_i}} \quad (45)$$

$$FB = \frac{\overline{O_i} - \overline{P_i}}{0.5(\overline{O_i} + \overline{P_i})} \quad (46)$$

com O_i representando o valor observado (medido), P_i o valor previsto (experimental) e N referindo-se à quantidade de dados comparados, sendo que a barra superior denota a média de todo o conjunto de dados.

Além dessas métricas, foram analisados o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada média do erro (RMSE) e a raiz quadrada média do erro normalizado (NRMSE), que são caracterizados como índices de dispersão e calculados com as seguintes equações:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2} \quad (47)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (48)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{i,máx} - O_{i,mín}} \quad (49)$$

onde $O_{i,máx}$ e $O_{i,mín}$ correspondem, respectivamente, ao valor observado máximo e mínimo.

5.1.1.1 Validação 2D

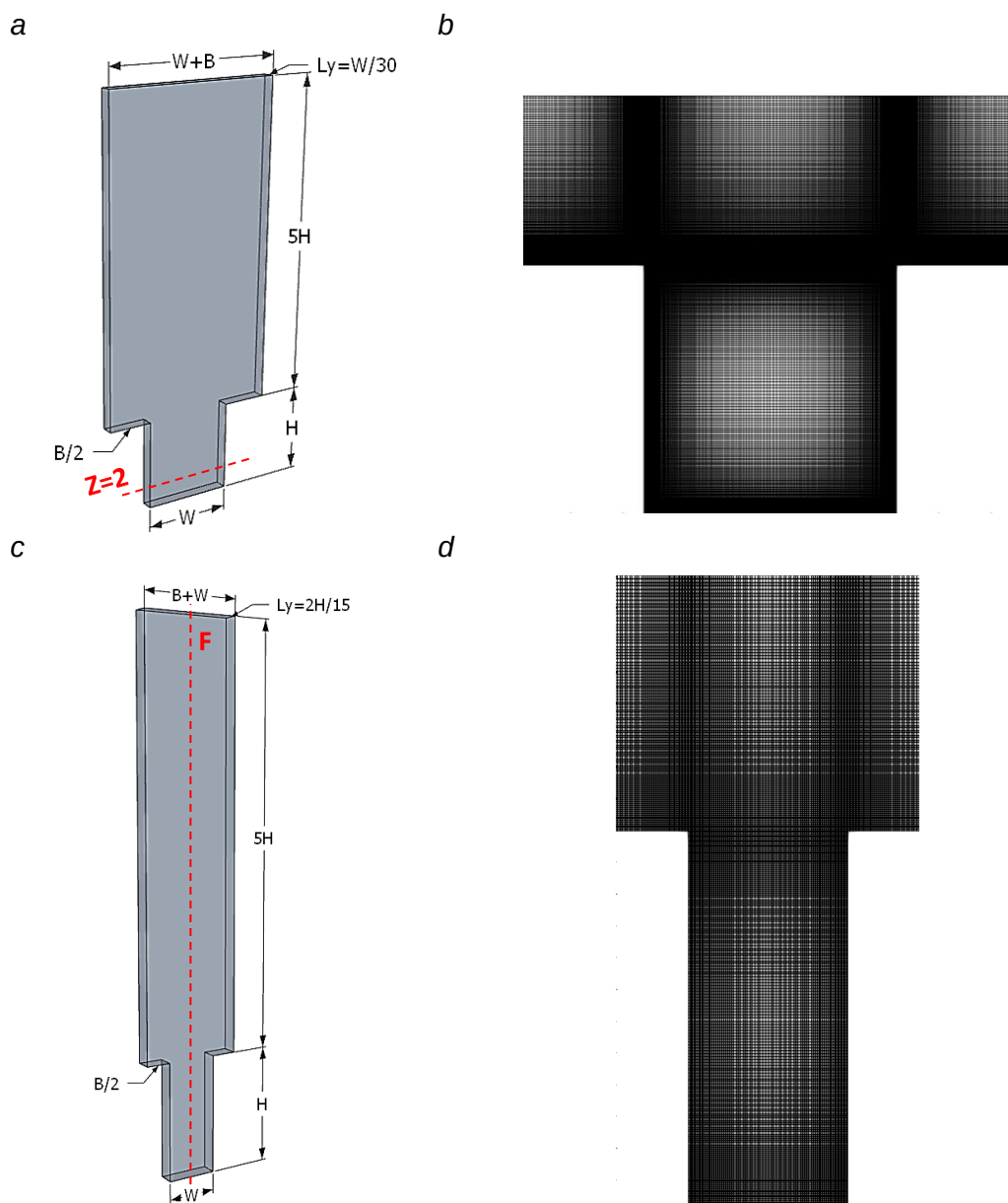
A validação do modelo é essencial para estudos numéricos antes de uma análise mais aprofundada. A exatidão do modelo bidimensional foi validada através de comparação de dados numéricos com dados experimentais do túnel de vento da Universidade de Gavle, na Suécia. Esses dados foram utilizados para validar modelos de cânions de rua 2D idealizados em escala real por Yang *et al.* (2021) e Yang *et al.* (2021a).

O termo “cânion de rua bidimensional” refere-se a um espaço formado por edifícios circundantes com uma rua de comprimento suficientemente longo, onde o vento que se aproxima é perpendicular ao eixo da rua. A determinação do fluxo e conforto térmico nessas unidades urbanas se dá apenas pela mistura turbulenta e pela troca de energia entre os canais formados pelos desfiladeiros através da abertura no topo da rua (Yang *et al.*, 2021).

Os modelos analisados possuem proporção de aspecto (AR) 1 e 2.4, onde AR se refere à relação entre a altura do edifício e a largura da rua (H/W). A altura do edifício é mantida constante em $H = 24 \text{ m}$ para ambos os valores de AR , enquanto a largura da rua varia, ou seja, $W = 24 \text{ m}$ ($AR = 1$) e 10 m ($AR = 2.4$). Quanto ao comprimento do

vão L_y , tem-se $0,8\text{ m}$ ($AR=1$) e $3,2\text{ m}$ ($AR=2.4$). Nas figuras 13.a e 13.c, apresentam-se as geometrias dos dois modelos analisados.

Figura 13 – (a) Esboço 3D do domínio da simulação $AR = 1$, (b) discretização do domínio da simulação $AR = 1$, (c) esboço 3D do domínio da simulação $AR = 2.4$ e (d) discretização do domínio da simulação $AR = 2.4$



Fonte: A Autora (2023)

A profundidade da camada limite, que vai desde o nível do telhado do edifício até o topo do domínio, é cinco vezes a altura do edifício ($5H$) para ambos os modelos, seguindo as diretrizes de melhores práticas em estudos numéricos, conforme Tominaga *et al.* (2008). Para garantir a independência de malha nos resultados da simulação, foram testados três arranjos de malha para cada AR : malha $M1$ (menos refinada), $M2$ (média)

e *M3* (fina). As malhas *M3*, mais refinadas, para os modelos com $AR = 1$ e $AR = 2.4$, são ilustradas nas Figuras 13.b e 13.d, respectivamente.

Conforme apresentado na Tabela 2, é possível observar a quantidade aproximada de volumes empregados na discretização do domínio computacional.

Tabela 2 – Quantidade de células dos modelos de cânions

AR	M1	M2	M3
1	40.000	80.000	160.000
2.4	15.000	30.000	60.000

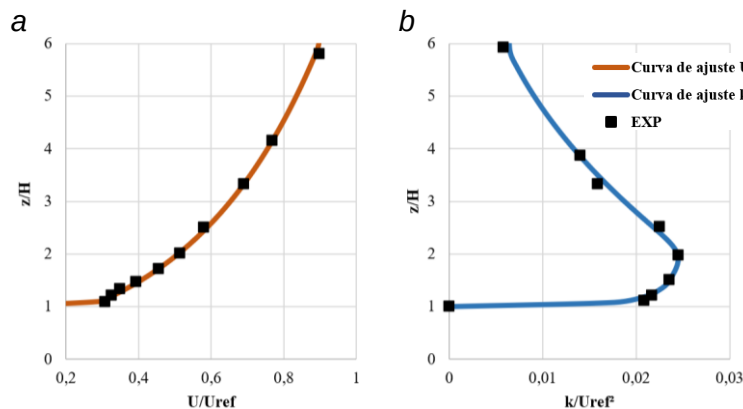
Fonte: A Autora (2023)

5.1.1.1.1 Condições de contorno para validação 2D

As condições de contorno impostas às superfícies do edifício (paredes e teto) foram definidas como paredes fixas, sem condições de deslizamento ou rugosidade. Da mesma forma, a superfície do solo foi definida como uma parede fixa. No topo e na saída do domínio foram usadas condições de gradiente nulo. Para as faces laterais foi aplicada a condição de simetria

Na entrada do domínio, os perfis de velocidade do vento no sentido da corrente e da energia cinética turbulenta foram implementados usando curvas de ajuste baseadas em dados experimentais de túnel de vento obtidos por Yang *et al.* (2021a), conforme apresentado no Gráfico 1. A velocidade de referência utilizada foi $U_{ref} = 3m/s$ para o modelo com $AR = 1$ e $U_{ref} = 13m/s$ para o modelo com $AR = 2.4$, ambas medidas na altura de $8,33H$.

Gráfico 1 – Curvas de ajuste da (a) velocidade do vento no sentido da corrente (normalizada por U_{ref}) e (b) energia cinética turbulenta (normalizada por U_{ref}^2) para o contorno de entrada do domínio



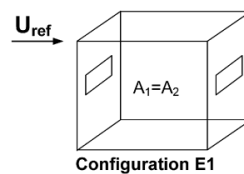
Fonte: A Autora (2023)

Yang *et al.* (2021) e Yang *et al.* (2021a) utilizaram o modelo de fechamento RANS RNG $k - \varepsilon$ para suas simulações numéricas. No entanto, neste estudo de validação, optou-se por utilizar o modelo de fechamento RANS $k - \omega$ SST, que é o modelo adotado nos casos estudados do presente trabalho, além de ser o modelo com melhor acurácia comparado a dados experimentais, como já mencionado anteriormente.

5.1.1.2 Validação 3D

A exatidão do caso tridimensional foi verificada através da análise numérica de uma edificação genérica com formato paralelepípedo, como estudado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017). Esses autores se baseiam no caso E1, investigado experimentalmente por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011), conforme mostrado na Figura 14.

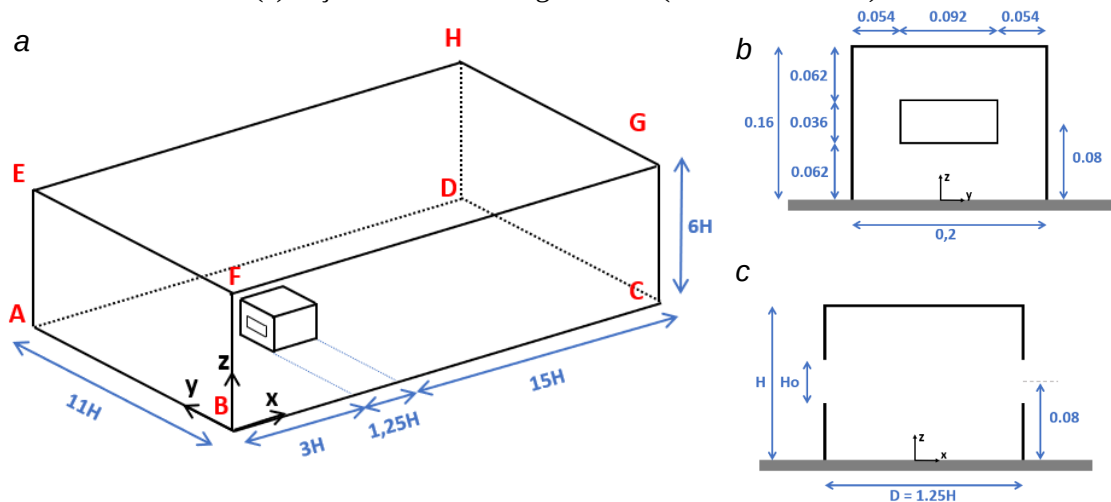
Figura 14 – Caso E1 proposto por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011)



Fonte: Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011)

O domínio computacional do modelo de edificação isolada (C), para validação do caso tridimensional, segue as mesmas diretrizes adotadas por Franke *et al.* (2007), Tominaga *et al.* (2008) e Blocken (2015), conforme destacado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017), como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – (a) Domínio computacional do caso tridimensional, (b) vista frontal da geometria e (c) seção transversal da geometria (dimensões em m)



Fonte: A Autora (2023)

Foi utilizado um espaçamento de 3H a montante, conforme recomendado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017), a fim de evitar perturbação no escoamento ao redor da edificação. A distância D, correspondente a uma unidade habitacional, foi definida como 1,25H. Além disso, foi estabelecida uma distância de 15H a jusante do modelo, no final do domínio, 11H na direção do eixo y e a altura fixada em 6H (eixo z). Nesse contexto, H corresponde a 0,16m, como ilustrado na Figura 16. As paredes e teto da edificação possuem espessura de 0,02H, o que equivale a 0,0032m.

5.1.1.2.1 Condições de contorno para validação 3D

As condições iniciais e de contorno do escoamento são as mesmas empregadas por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) e são inseridas diretamente nos diretórios do OpenFOAM para cada simulação, utilizando arquivos de texto. O perfil de velocidade de entrada foi prescrito usando a lei logarítmica, definida por:

$$U(z) = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (50)$$

sendo u_{ABL}^* a velocidade de fricção ABL (*Atmospheric Boundary Layer*), κ a constante de von Karman (0,41), z a altura em relação ao solo e z_0 a altura rugosa (0,0009 m). Conforme Richards e Hoxey (1993), o modelo é bastante eficiente para representar as condições ABL, levando em consideração a influência da rugosidade da superfície terrestre sobre o escoamento. O valor correspondente de u_{ABL}^* é 0,348 m/s para a velocidade de referência no topo da edificação ($U_h = 4,3 \text{ m/s}$). O número de Reynolds em função da velocidade de referência na altura da edificação (H) é igual a 45.000.

No OpenFOAM, utiliza-se a função de parede *kqRWallFunction* para a variável da energia cinética turbulenta k , a função *epsilonWallFunction* para a taxa de dissipação ε e a função *omegaWallFunction* para a dissipação específica da energia cinética turbulenta ω . Para a viscosidade turbulenta μ_t , é utilizada a função de parede *nutkRoughWallFunction*, que é baseada na rugosidade da parede. Nesse caso, adota-se a altura rugosa k_s como zero, conforme descrito por Cebeci e Bradshaw (1977).

No Quadro 1, são apresentadas as condições de contorno com base nas faces definidas na Figura 16.a para todas as variáveis. Para a modelagem de turbulência, é utilizado o modelo de fechamento RANS $k - \omega$ SST.

Quadro 1 – Condições de contorno aplicadas às faces do domínio 3D

FACE	Velocidade	Pressão	k	ε	ω	μ_t
AEFB	$u_3 = u(z)$	$\nabla(p) = 0$	$k = k(z)$	$\varepsilon = \varepsilon(z)$	$\omega = \omega(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
DHGC	$\nabla(u_i) = 0$	$p = 0$	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\omega) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
AEHD	SC	SC	SC	SC	SC	SC
EHGF	SC	SC	SC	SC	SC	SC
BFGC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
ADCB	$u_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF	WF
Edificação	$u_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF	WF

Nomenclatura: SC = condição de simetria, WF = função de parede, u_i componente da velocidade com relação à direção $i = 1,2,3$

Fonte: A Autora (2023)

Na entrada, são prescritos os perfis de energia cinética turbulenta $k(z)$, taxa de dissipação de turbulência $\varepsilon(z)$ e a taxa de dissipação específica (ω), calculados de acordo com as seguintes equações, respectivamente:

$$k(z) = 0,033[u(H)]^2 \exp^{-0,32\left(\frac{z}{H}\right)} \quad (51)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{(u_{ABL})^3}{\kappa(z + z_0)} \quad (52)$$

$$\omega(z) = \frac{\varepsilon(z)}{C_\mu k(z)} \quad (53)$$

5.1.2 Análise de sensibilidade de malha

O índice de convergência da malha (GCI – do inglês *Grid Convergence Index*), proposto por Celik *et al.* (2008), é usado para avaliar a qualidade da malha, adotando a vazão volumétrica como variável de interesse (ϕ), determinada conforme a seguinte expressão:

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\int_{A_1} |\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}_1| dA + \int_{A_2} |\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}_2| dA \right) \quad (54)$$

onde, $\mathbf{U}$ é o vetor de velocidade média, A_1 e A_2 são as áreas das aberturas de entrada e saída e n_1 e n_2 são as componentes do vetor normal às áreas (Hwang; Gorlé, 2022).

Primeiramente, o tamanho do elemento h é definido para cada discretização analisada e é calculado pela seguinte expressão:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta A_i) \right]^{1/2} \quad (55)$$

onde ΔA_i é a área da i -ésima célula e N é o número total de células presentes na malha, sendo $h_1 < h_2 < h_3$. Ou seja, h_1 corresponde ao tamanho do elemento da malha mais refinada, no caso em estudo referente à M3, e assim sucessivamente.

Em seguida, calcula-se a ordem aparente p do método usando as seguintes expressões:

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \quad (56)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (57)$$

$$s = 1 \cdot \text{sgn}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \quad (58)$$

onde $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$, $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ e ϕ_k denota a solução da variável de interesse na malha k . Os fatores de refinamento das malhas são determinados por: $r_{21} = h_2/h_1$ e $r_{32} = h_3/h_2$.

Em seguida, calculam-se as estimativas de erro aproximado (ε_a) e o erro extrapolado (ε_{ext}) através de:

$$\varepsilon_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (59)$$

$$\varepsilon_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{21} - \phi_1}{\phi_{ext}^{21}} \right| \quad (60)$$

$$\phi_{ext}^{21} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (61)$$

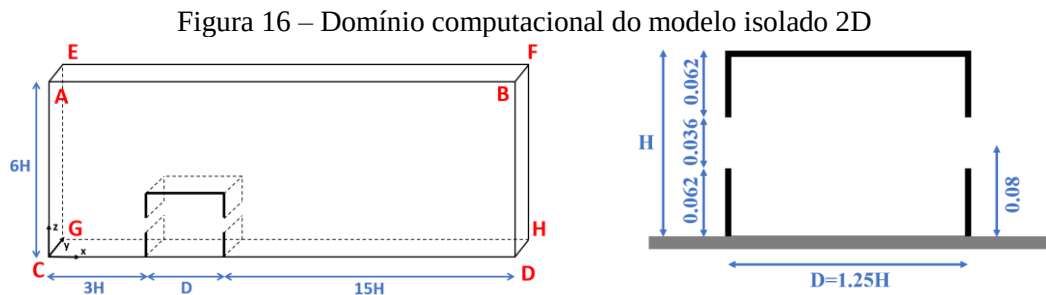
Logo, o índice de convergência para a malha fina, pode ser calculado por:

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25 \varepsilon_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (62)$$

Similar às equações (59), (60) e (61), pode-se calcular ϕ_{ext}^{32} , ε_a^{32} e ε_{ext}^{32} para determinação do índice de convergência para a malha média, conforme adaptações da Equação (62).

5.2 CASO 2D

Neste caso, realiza-se inicialmente uma análise do escoamento ao redor do modelo de edificação isolada (C), utilizado para validar o caso tridimensional, empregando as mesmas diretrizes. Entretanto, considerando uma modelagem bidimensional, como ilustrado na Figura 16.

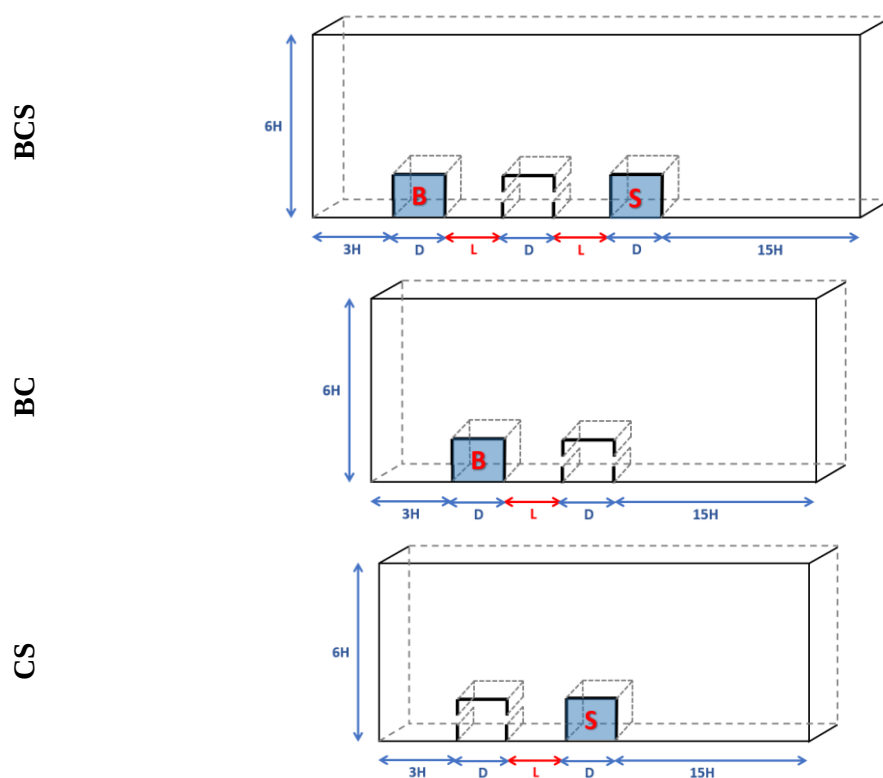


Fonte: A Autora (2023)

Embora as condições de contorno tenham sido prescritas para simular um problema bidimensional, o domínio foi gerado com volumes de controle hexaédricos, concentrando-os nas proximidades da edificação e das aberturas, conforme ilustrado na Figura 20. É importante ressaltar que, por natureza, toda simulação no OpenFOAM é tridimensional. Portanto, para problemas bidimensionais, a geometria e a malha são construídas tridimensionalmente. Nas faces ortogonais ao eixo não resolvido (*eixo y*, nesse caso), é especificada a condição de vazio, denominada *empty*, conforme apresentada no Quadro 3.

Neste caso, são analisadas diferentes configurações de edificações em série, intercaladas com espaçamentos variando em $1L$, $2L$ e $3L$, sendo que $L = D$. Inicialmente, foi simulado um modelo isolado (Figura 16) e, posteriormente, três diferentes modelos de edificações em série, com diferentes configurações das edificações a barlavento e sotavento, considerando variações no distanciamento L , conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Configuração dos modelos simulados em série 2D, com edificações sem aberturas a barlavento (B) e sotavento (S)



Fonte: A Autora (2023)

No Quadro 2, é apresentado um esquema com os casos bidimensionais simulados, mostrando os modelos com variação de espaçamentos das edificações de barlavento, sotavento e do modelo isolado. Além disso, são indicados os arranjos relacionados à existência das edificações de vizinhança de barlavento e/ou sotavento. No total, são apresentados dez diferentes modelos 2D.

Quadro 2 – Modelos 2D a serem simulados

MODELOS			ESPAÇAMENTOS			
B	C	S	Isolado	1L	2L	3L
×	✓	×	C	-	-	-
✓	✓	✓	-	BCS1	BCS2	BCS3
✓	✓	×	-	BC1	BC2	BC3
×	✓	✓	-	CS1	CS2	CS3

B – Edificação a barlavento
C – Edificação com abertura
S – Edificação a sotavento

Fonte: A Autora (2023)

No Quadro 3, são apresentadas as condições de contorno para todas as variáveis, tomando como base as faces definidas na Figura 16.

Quadro 3 – Condições de contorno aplicadas às faces do domínio 2D

FACE	Velocidade	Pressão	k	ε	ω	μ_t
ACGE	$u_3 = u(z)$	$\nabla(p) = 0$	$k = k(z)$	$\varepsilon = \varepsilon(z)$	$\omega = \omega(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
BDHF	$\nabla(u_i) = 0$	$p = 0$	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\omega) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
AEFB	SC	SC	SC	SC	SC	SC
EFGH	empty	empty	empty	empty	empty	empty
ABCD	empty	empty	empty	empty	empty	empty
CDHG	$u_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF	WF
Edificação	$u_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF	WF

Nomenclatura: SC = condição de simetria, WF = função de parede, u_i componente da velocidade com relação à direção $i = 1,2,3$

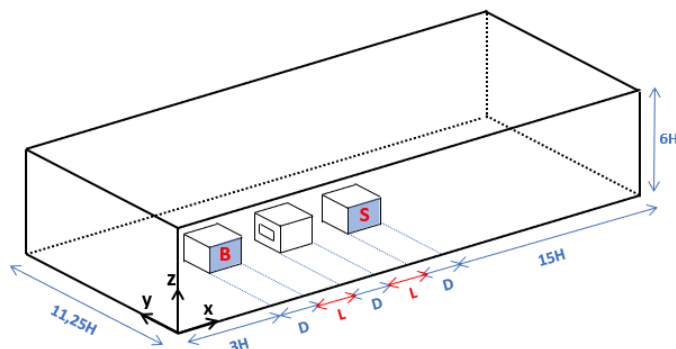
Fonte: A Autora (2023)

Ainda, são adotados os mesmos perfis de entrada da velocidade do vento $U(z)$ e das variáveis de turbulência, além do número de Reynolds, modelo de turbulência e funções de parede empregados no modelo de validação 3D.

5.3 CASO 3D

Para o caso tridimensional, inicialmente foi analisado o escoamento ao redor do modelo isolado (C), empregado na validação. Posteriormente, consideram-se os modelos com edificações a barlavento e sotavento do modelo com aberturas (BCS), cujo domínio é ilustrado na Figura 18. Nos modelos de edificações com vizinhança, varia-se o distanciamento entre as três edificações dispostas em série. Isso resultou em um total de quatro casos tridimensionais (C, BCS1, BCS2, BCS3).

Figura 18 – Configuração do modelo simulado em série 3D, com edificações sem aberturas a barlavento (B) e a sotavento (S)



Fonte: A Autora (2023)

As condições iniciais e de contorno, funções de parede, número de Reynolds, modelo de fechamento, bem como os perfis de entrada da velocidade e das variáveis de turbulência, são os mesmos empregados no modelo de edificação isolada da validação 3D.

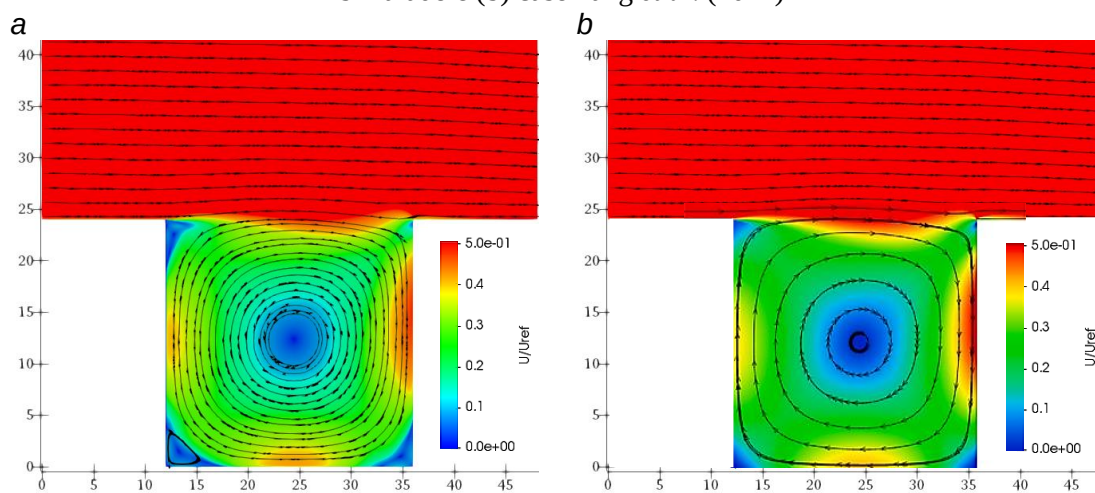
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CASO 2D

6.1.1 Validação 2D

Considera-se a distribuição do escoamento como forma de comparação entre o presente estudo e as simulações realizada por Yang *et al.* (2021) no seu modelo com $AR = 1$. Na Figura 19, é ilustrado o escoamento da velocidade adimensionalizada no plano central $x - z$ para o cânion com $AR = 1$. A Figura 19.a apresenta a comparação do perfil de velocidade do vento normalizada para o modelo numérico em estudo, enquanto na Figura 19.b mostra-se o perfil obtido por Yang *et al.* (2021).

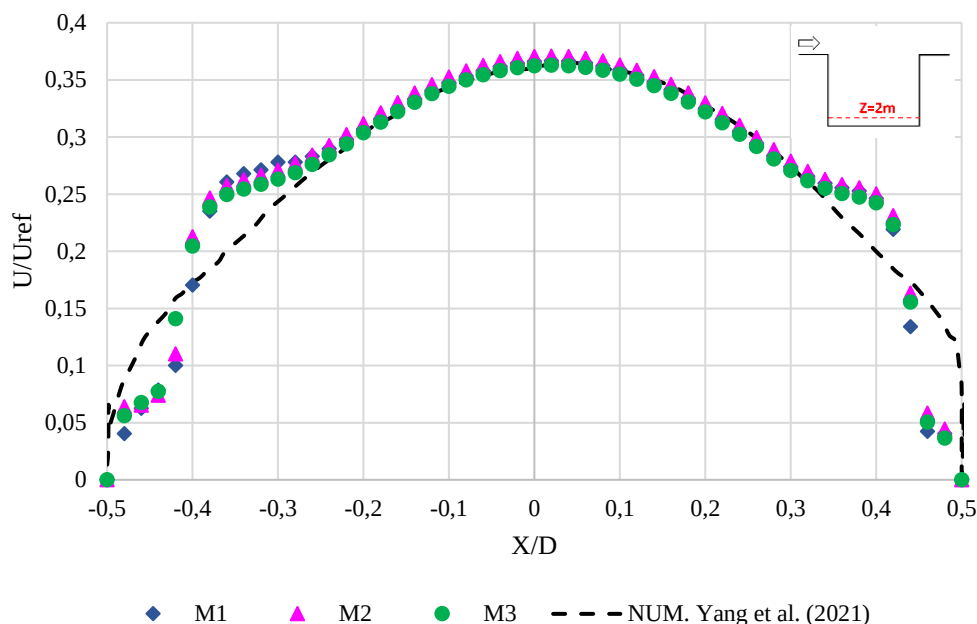
Figura 19 – Comparação do perfil de velocidade do vento normalizada U/U_{ref} (a) caso simulado e (b) caso Yang *et al.* (2021)



Fonte: A Autora (2023)

Em ambos os casos, é possível observar a formação de um único vórtice no sentido horário dentro do cânion, com aumento da velocidade nas proximidades das paredes do edifício e superfície do solo. O perfil horizontal da velocidade normalizada (U/U_{ref}) no nível do pedestre ($z = 2m$), corte ilustrado na Figura 13.a, é apresentado no Gráfico 2 com os três níveis de refinamento da malha e os resultados obtidos por Yang *et al.* (2021) no caso do cânion com $AR = 1$.

Gráfico 2 – Corte horizontal da velocidade do vento normalizada (U/U_{ref}) ao nível de pedestres ($z = 2m$)

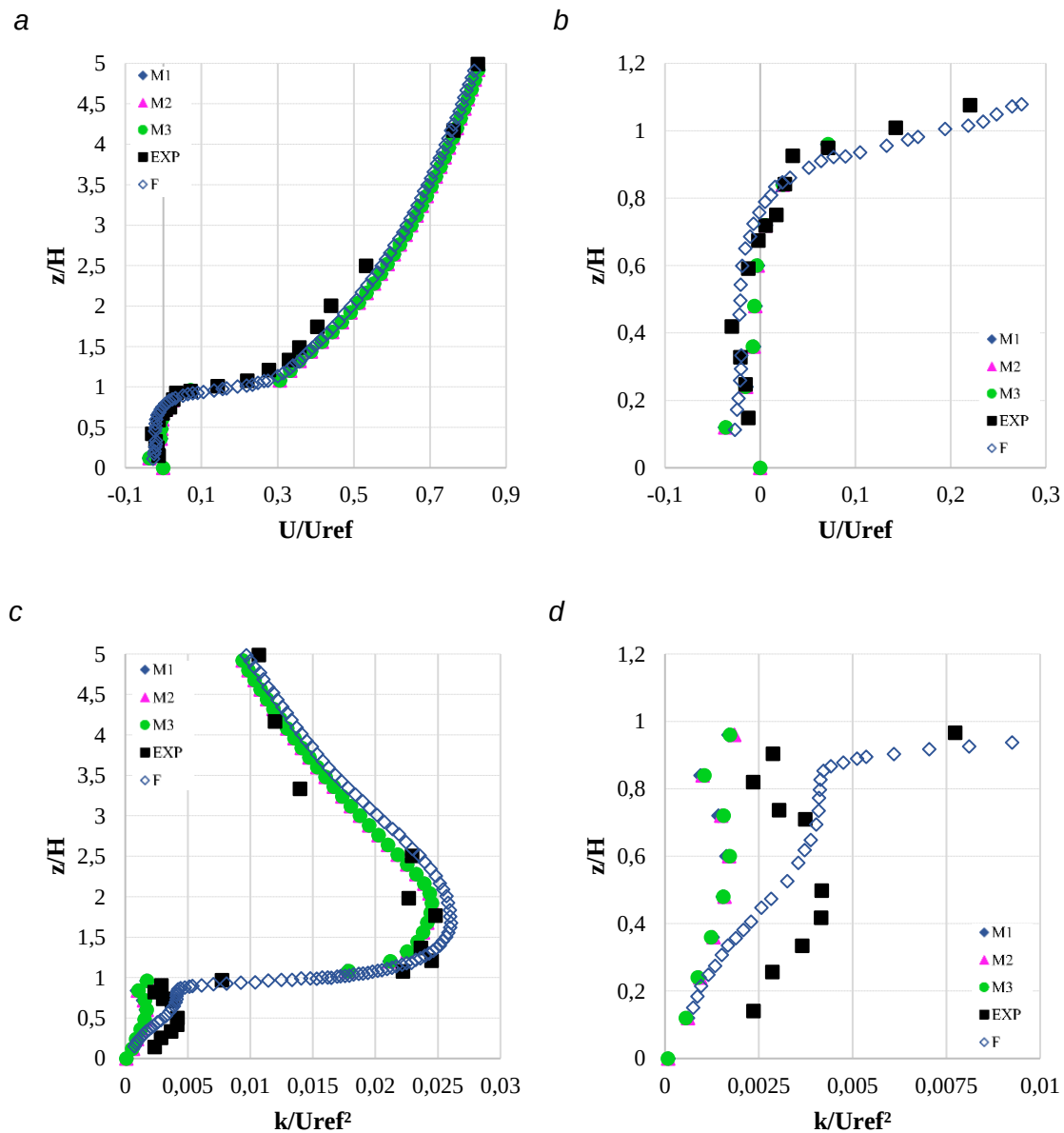


Fonte: A Autora (2023).

Pode-se observar a proximidade dos valores da velocidade adimensionalizada entre a simulação realizada por Yang *et al.* (2021) e o presente estudo, assim como observado na distribuição da velocidade na Figura 19. Percebe-se que na região das quinas, onde desenvolvem-se os vórtices secundários, existe uma leve discrepância que possivelmente seja justificada pelo modelo de fechamento empregado na simulação ($k - \omega$ SST). A utilização da formulação do modelo $k - \omega$ SST em sua combinação de equações é responsável pelas características inerentes de robustez e precisão próximo às paredes.

Para o segundo caso do cânion bidimensional ($AR = 2.4$), investigou-se a velocidade do vento no sentido da corrente e a energia cinética turbulenta (ambos os parâmetros normalizados pela velocidade de referência $U_{ref} = 13m/s$), na posição da *Linha F*, conforme ilustrada na Figura 13.c. No Gráfico 3, apresenta-se uma comparação entre os resultados obtidos para as três discretizações (M1, M2 e M3) empregadas, às simulações realizadas por Yang *et al.* (2021a) considerando sua malha com refinamento fino (F), bem como aos dados experimentais em túnel de vento (Yang *et al.*, 2021).

Gráfico 3 – Comparação entre resultados numéricos e dados de túnel de vento para perfis de (a, b) velocidade do vento normalizada (U/U_{ref}), (c, d) energia cinética de turbulência normalizada (k/U_{ref}^2) na linha central do cânion (ou seja, *Linha F* na Fig. 13.b)



Fonte: A Autora (2023)

As malhas apresentam resultados com boa acurácia, mostrando uma concordância significativa com os dados medidos em termos de valores de velocidade adimensionalizada (gráficos 3.a e 3.b), com pequenas discrepâncias no interior do cânion. No estudo realizado por Yang *et al.* (2021a), também se destaca a presença de um único vórtice em todos os modelos de cânion de rua com $AR = 2.4$. Quanto à energia cinética turbulenta normalizada (gráficos 3.c e 3.d), os resultados da simulação são razoavelmente consistentes com os dados do túnel de vento no interior do cânion, embora com discrepâncias um pouco mais acentuadas do que no modelo estudado por Yang *et al.*

(2021a). Essas discrepâncias eventualmente podem ser atribuídas ao modelo de fechamento utilizado na simulação, nível de refinamento ou à lei de parede.

As métricas de validação são calculadas para os dois modelos de cânions urbanos em escala real bidimensional avaliados em Yang *et al.* (2021) e Yang *et al.* (2021a), com proporção $AR = H/W = 1$ e 2.4, respectivamente. Na Tabela 3, são apresentados os resultados das métricas de validação para a velocidade adimensionalizada (U_x/U_{ref}) ao longo de um corte horizontal ($z = 2m$), com indicação dos valores ideais.

Tabela 3 – Métricas de validação para velocidade adimensionalizada U_x/U_{ref} do modelo com $AR = 1$

Malha	U_x/U_{ref}				
	FAC2	FAC1.3	R ²	RMSE	NRMSE
M1	0.886	0.829	0.978	0,039	10,57%
M2	0.886	0.829	0.977	0,038	10,52%
M3	0.914	0.886	0.983	0,033	9,22%
Valor ideal	1	1	1	0	0.00%

Fonte: A Autora (2023)

Para o caso do cânion com proporção $AR = 2.4$ (Yang *et al.*, 2021a), os resultados das métricas de validação foram avaliados para velocidade adimensionalizada (U_x/U_{ref}) e para energia cinética (k/U_{ref}^2) ao longo de um corte vertical F ($x = 24$) no eixo central do cânion (Figura 13.c). Os resultados são apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Métricas de validação para velocidade adimensionalizada U_x/U_{ref} do modelo com $AR = 2.4$

Malha	U_x/U_{ref}				
	FAC2	FAC1.3	R ²	RMSE	NRMSE
M1	0.923	0.846	0.9821	0.0266	3,12%
M2	0.923	0.846	0.9825	0.0263	3,09%
M3	0.923	0.846	0.9826	0.0262	3,08%
Valor ideal	1	1	1	0	0.00%

Fonte: A Autora (2023)

Tabela 5 – Métricas de validação para energia cinética k/U_{ref}^2 do modelo com $AR = 2.4$

Malha	k/U_{ref}^2					
	FAC2	FB	NMSE	R ²	RMSE	NRMSE
M1	0.667	0.115	0.039	0.9557	0.0016	7,09%
M2	0.667	0.112	0.037	0.9580	0.0016	7,09%
M3	0.750	0.112	0.037	0.9586	0.0016	7,09%
Valor ideal	1	0	0	1	0	0.00%

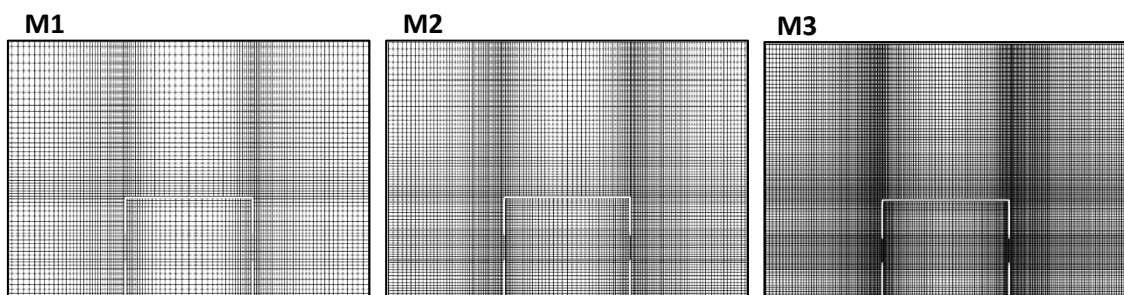
Fonte: A Autora (2023)

A melhor concordância com os dados experimentais, de acordo com as métricas, foi obtida para ambos os cânions ($AR = 1$ e 2.4) utilizando as malhas com o maior nível de refinamento $M3$. Ambos os parâmetros (velocidade adimensionalizada e energia cinética) se aproximam de seus valores ideais. No caso do cânion com proporção $AR = 2.4$, as métricas estão ainda mais próximas de seus valores ideais para a velocidade adimensionalizada, enquanto as discrepâncias são maiores para a variável energia cinética. No entanto, de acordo com os critérios recomendados pela *COST Action 732* (Franke *et al.*, 2007), os valores obtidos são considerados aceitáveis, seguindo os padrões de métrica estatística. Considerando que o objetivo principal desse estudo é avaliar o comportamento da ventilação natural entre modelos bidimensionais de edificações com abertura em diferentes configurações, o modelo numérico utilizado neste estudo pode ser considerado confiável.

6.1.2 Análise de sensibilidade de malha 2D

Previamente, é realizado um estudo de independência de malha utilizando o modelo com edificação isolada. São consideradas três malhas: uma malha menos refinada (M1) com 15.483 volumes de controle, uma malha média (M2) com 30.280 volumes de controle e uma malha fina (M3) com 60.669 volumes de controle. Na Figura 20, apresentam-se as três malhas nas proximidades da edificação, com uma escala de refinamento próximo às paredes, teto, aberturas e solo do domínio.

Figura 20 – Discretização 2D do caso de edificação isolada

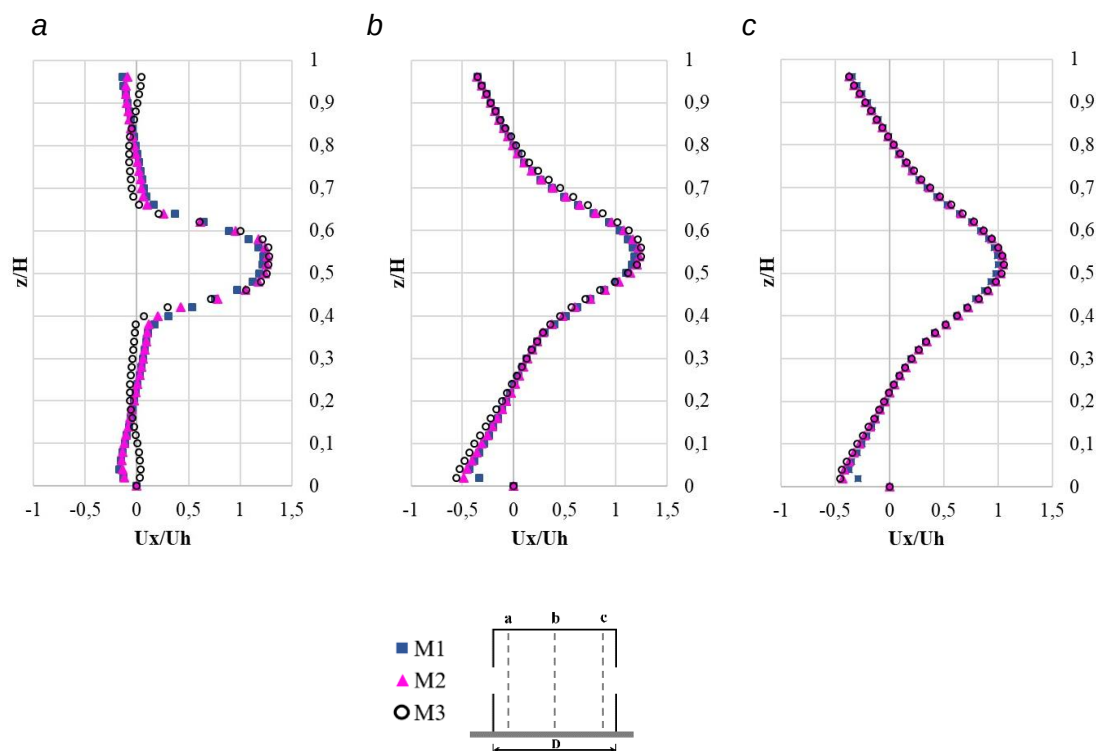


Fonte: A Autora (2023)

No Gráfico 4, mostra-se a distribuição da componente da velocidade média na direção x adimensionalizada (U_x/U_h) ao longo de três cortes verticais no interior da edificação, (a) $x/D = 0.125$, (b) $x/D = 0.5$ e (c) $x/D = 0.875$. Observa-se que os resultados obtidos com as malhas média (M2) e fina (M3) são muito próximos em ambas as seções, enquanto a malha menos refinada (M1) apresenta discrepâncias com relação

aos resultados das malhas refinadas, principalmente nas regiões de alta velocidade. No corte (a), é possível observar uma pequena variação na malha M3 em relação às outras malhas, onde nas proximidades do teto da edificação e do solo há uma distribuição de velocidade com valores positivos. Essa característica é consequência do nível de refinamento da malha, que reproduz vórtices nessas posições à medida que a malha é refinada, como pode ser observado nas proximidades superior e inferior da abertura de entrada.

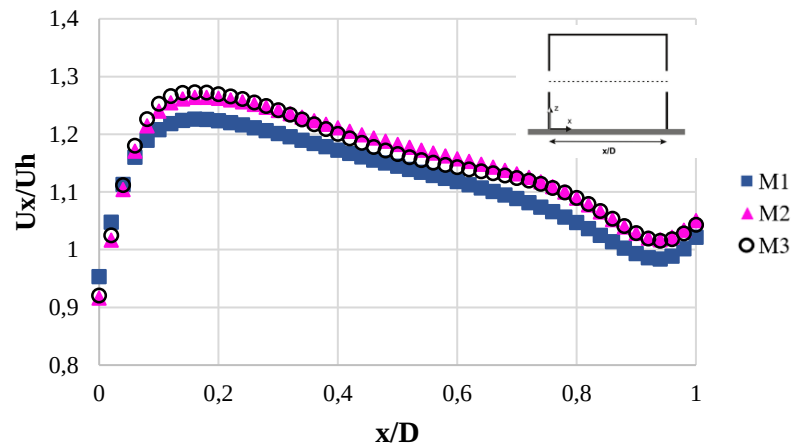
Gráfico 4 – Distribuição da velocidade normalizada para as malhas M1, M2 e M3 ao longo de três linhas verticais no interior da edificação



Fonte: A Autora (2023)

Para uma melhor visualização do comportamento da velocidade adimensionalizada na posição do jato, para as três discretizações, realizou-se um corte horizontal na altura média da abertura ($z/H = 0,5 \text{ m}$), como pode ser observado no Gráfico 5. Dessa forma, é possível observar com maior clareza a proximidade entre os resultados das malhas mais refinadas (M2 e M3) e a variação da malha M1 em relação às demais.

Gráfico 5 – Velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_h) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,5$ m)



Fonte: A Autora (2023)

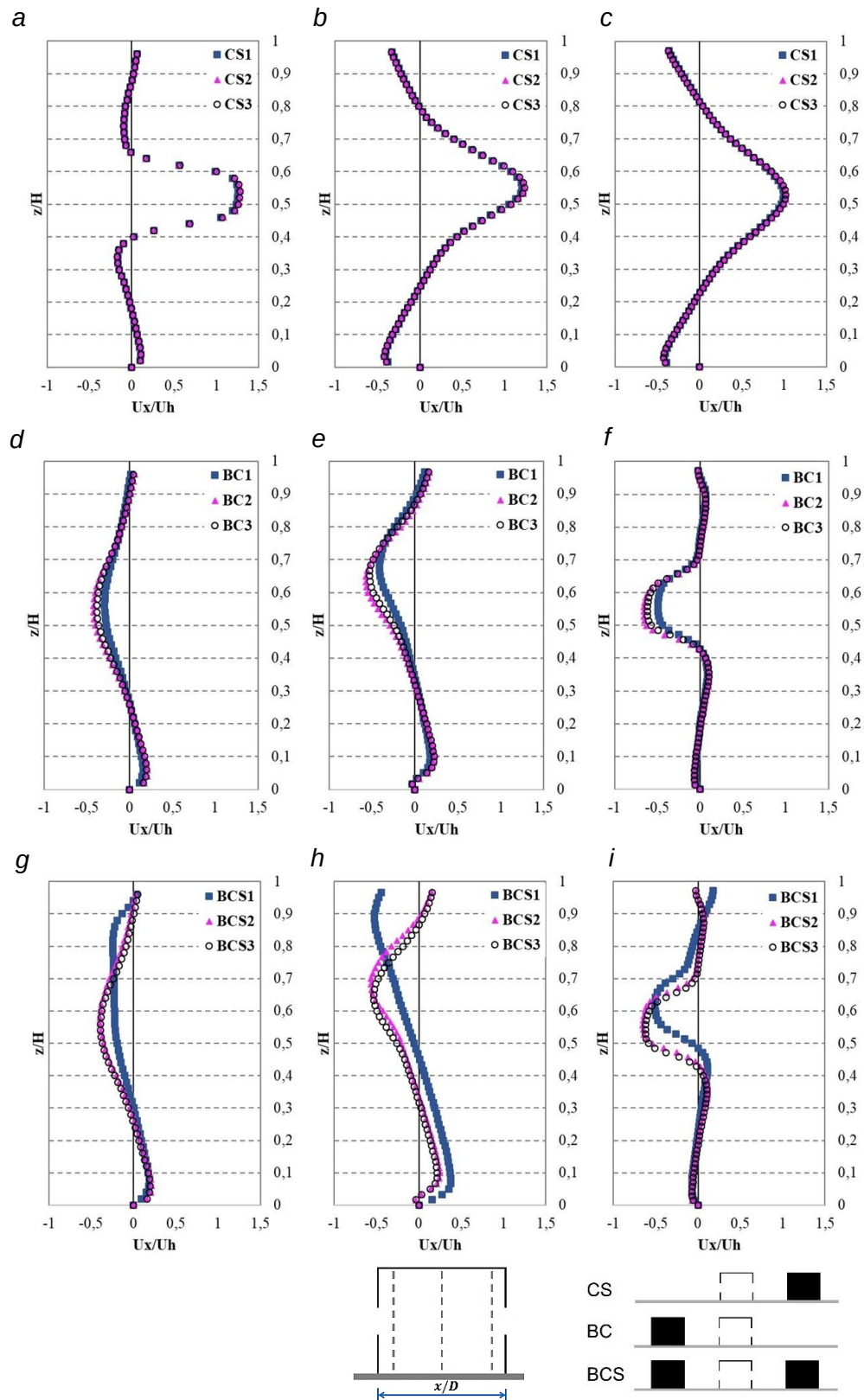
A avaliação da qualidade da malha, por meio do cálculo do GCI, demonstrou que para a malha M3 (60 mil volumes) há uma incerteza numérica de aproximadamente 1,07% ($GCI^{21}_{M3} = 0,01067$), valor que está dentro dos limites utilizados na literatura (Rojano *et al.*, 2019; Zhang; Weerasuriya; Tse, 2020; Wang *et al.*, 2021). A razão $[GCI^{32}_{M1}/(r^p GCI^{21}_{M3})]$ resulta em 1,023, muito perto de 1,00, demonstrando que os resultados estão na faixa de convergência assintótica. O fator de refinamento de malha (r) foi maior que 1,3 e foi usada a ordem de acurácia observada (p), conforme sugerido por Celik *et al.* (2008). Portanto, a malha M3 é considerada válida para ser adotada como malha base dos demais modelos simulados, onde, segundo Zhang, Weerasuriya e Tse (2020), incertezas numéricas abaixo do limite de 5% indica a independência de malha.

Para os demais modelos, foi utilizado um refinamento compatível com a melhor malha do estudo de independência de malha realizado com o modelo isolado (M3). Dessa forma, tanto dentro quanto nas proximidades da edificação, buscou-se manter uma discretização aproximadamente equivalente, assim como nos cânions referentes aos espaçamentos de L , $2L$ e $3L$. Para isso, foi realizado um aumento de aproximadamente 10.000 volumes a cada unidade de espaçamento adicionada.

6.1.3 Resultados caso 2D

No Gráfico 6, mostra-se uma comparação da distribuição da velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_h) ao longo de três linhas verticais localizadas no interior do modelo da edificação, $x/D = 0,125, 0,50$ e $0,875$, para os nove modelos com vizinhança simulados, ver Quadro 2 no item 5.2.

Gráfico 6 – Comparação da velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) para os casos de vizinhança ao longo de três linhas verticais no interior da edificação em (a, d, g) $x/D = 0,125$, (b, e, h) $x/D = 0,5$, (c, f, i) $x/D = 0,875$



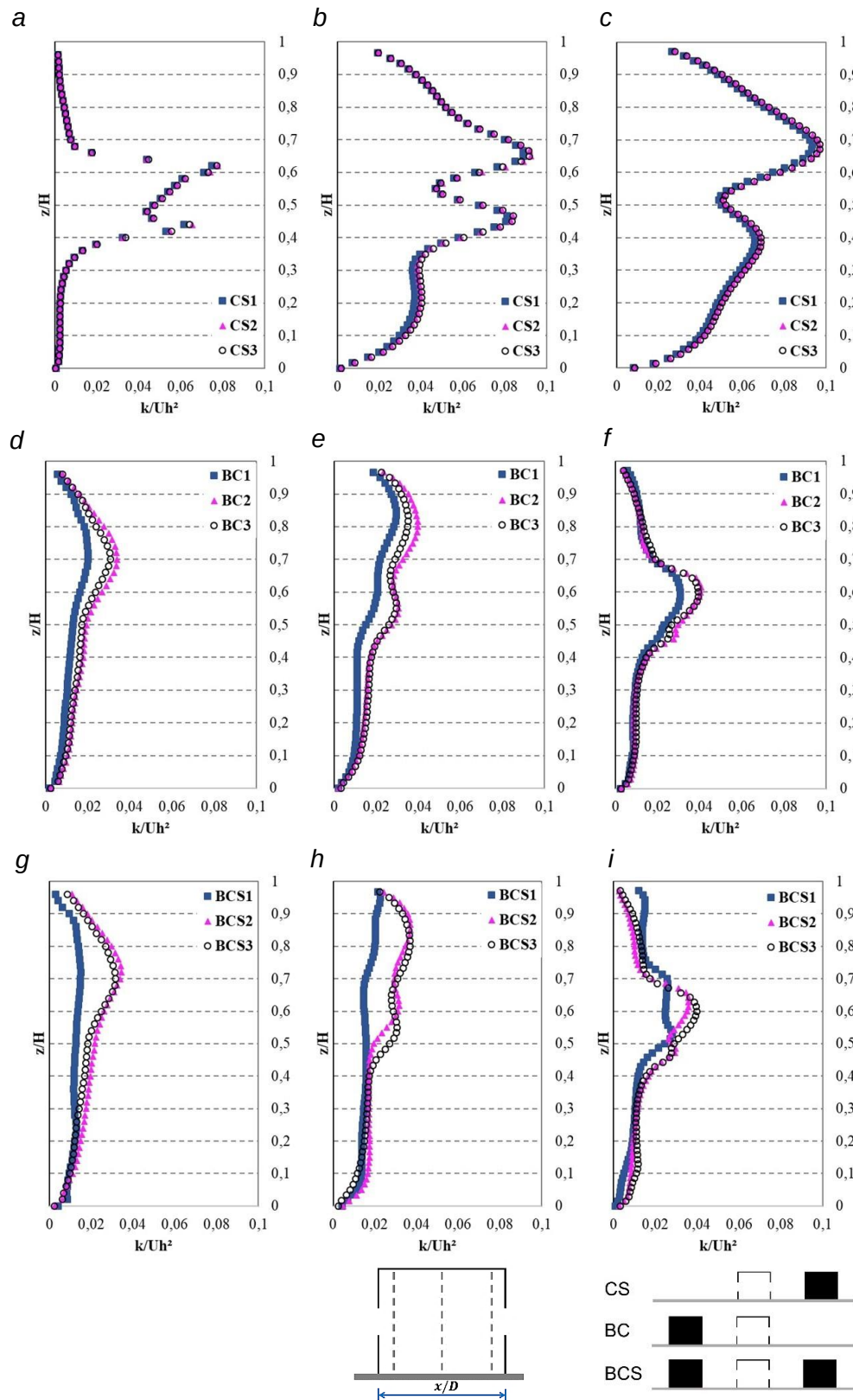
Fonte: A Autora (2023)

Percebe-se que os casos CS apresentam pouca mudança na distribuição de velocidade com a variação da distância entre as edificações. O sentido do escoamento ocorre da esquerda para direita, assim como no caso do modelo isolado, ver Gráfico 4, e o escoamento no interior da edificação em análises pouco é afetado devido à inexistência de obstáculos a montante. O máximo valor de U_x/U_h localiza-se aproximadamente em $z/H = 0,55$, caracterizando uma trajetória do jato praticamente horizontal. Pode-se verificar a existência de dois pares de vórtices contrarrotativos nos três cortes, entretanto, somente nos cortes $x/D = 0,5$ e $0,875$ observa-se o mesmo sentido de rotação.

Para os casos BC e BCS, observa-se na edificação em análises uma inversão no sentido do escoamento, indo da abertura posterior para a anterior, além de uma significativa variação no máximo valor de U_x/U_h e de sua localização, decorrentes da mudança do espaçamento entre as edificações. Conforme incrementa-se a distância L , o valor máximo da velocidade tende a aumentar e sua posição relativa tende a deslocar-se para baixo. No caso BC, nos cortes (d) e (f), o máximo valor de U_x/U_h localiza-se aproximadamente em $z/H = 0,55$. Já no corte no eixo central da edificação, sua localização z/H varia de $0,70$ com $1L$ para $0,65$ com $2L$ e $3L$, caracterizando um jato com direção ascendente. No caso BCS, percebe-se que a distribuição da velocidade é fortemente influenciada pelo distanciamento entre as edificações. Os casos com $2L$ e $3L$ apresentam variações consideráveis em relação ao caso com $1L$. Conforme a distância entre as edificações aumenta, a localização do máximo valor de U_x/U_h tende a se aproximar da posição média obtida nos casos BC. A menor distância entre as edificações apresenta uma variação significativa na localização da máxima velocidade, sendo aproximadamente 15% no corte (h). O jato também evidencia uma trajetória ascendente para os casos BCS.

A distribuição da energia cinética adimensionalizada nos mesmos cortes e casos considerados para a velocidade está representada no Gráfico 7. Nos casos do modelo CS, observa-se pouca mudança em relação à variação da distância entre as edificações. No entanto, nos casos BC e BCS, ocorre uma significativa alteração da distribuição da energia cinética em relação às distâncias L , sendo mais acentuada nos modelos com $1L$ e especialmente nos casos com edificação a barlavento e sotavento, simultaneamente.

Gráfico 7 – Comparação da energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) para os casos de vizinhança ao longo de três linhas verticais no interior da edificação em (a, d, g) $x/D = 0,125$, (b, e, h) $x/D = 0,5$, (c, f, i) $x/D = 0,875$

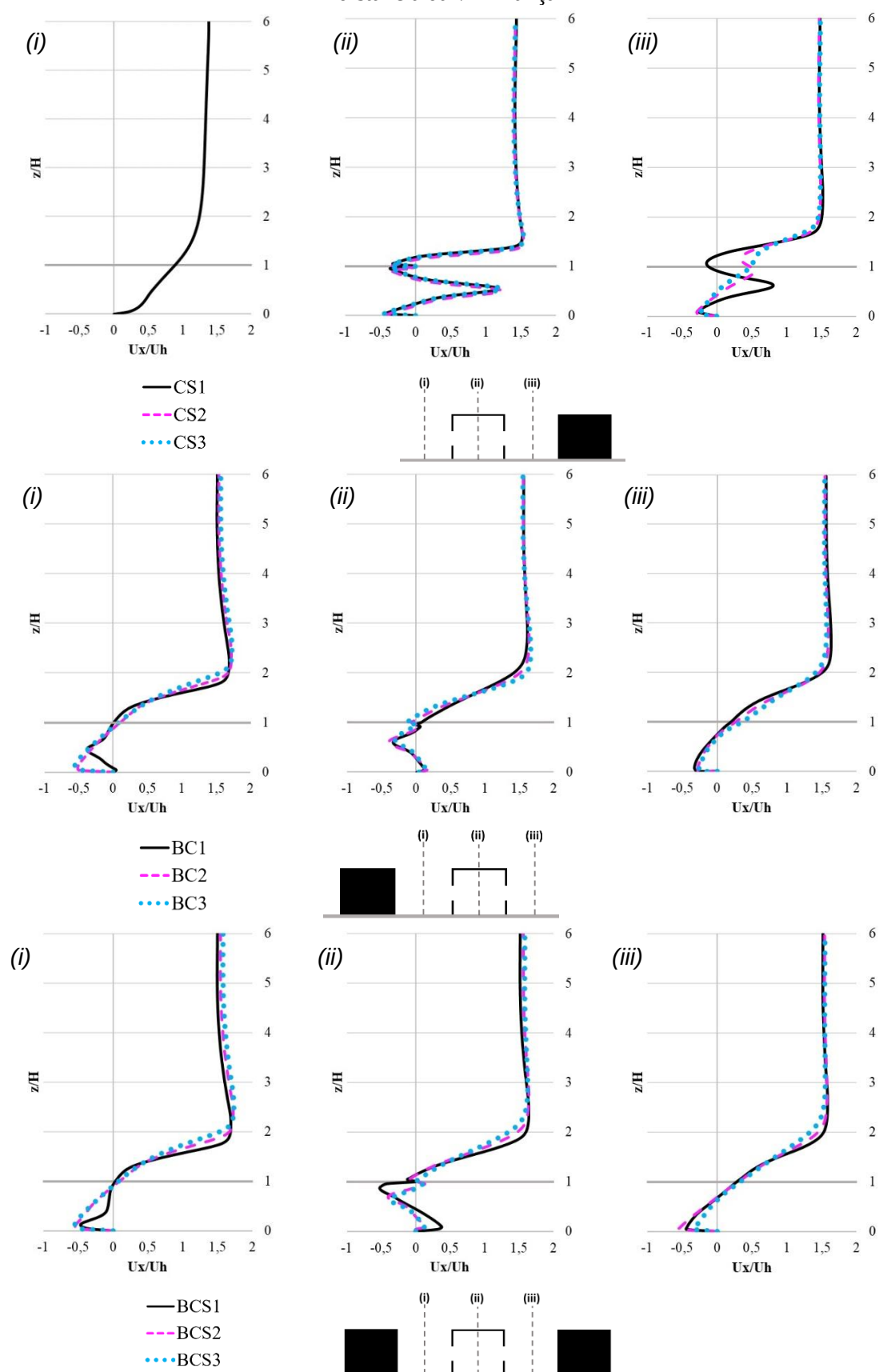


Fonte: A Autora (2023)

Para uma melhor compreensão do comportamento da distribuição das variáveis velocidade e energia cinética entre os cânions formados por duas edificações vizinhas, foram realizados cortes verticais em diferentes regiões do domínio conforme apresentam-se nos gráficos 8 e 9. Esses cortes incluem o corte a montante (i), o corte a jusante (iii), localizado no centro de cada cânion, e o corte no eixo central da edificação com abertura (ii) para todos modelos simulados.

O perfil de velocidade média adimensionalizada, ver Gráfico 8, nas proximidades das edificações ($0 < z/H < 2,0$), sofre uma fortemente influência pela variação das distâncias entre as edificações conforme o caso analisado. Isso fica mais evidente ao comparar os modelos com distanciamento $1L$ com os modelos com $2L$ e $3L$ para o corte a montante (i). No corte no eixo central da edificação com aberturas (ii), é perceptível que a maior variação do perfil de velocidade ocorre dentro da unidade habitacional ($0 < z/H < 1$) para o modelo BCS, enquanto o modelo CS apresenta a menor variação, uma vez que não há interferência a barlavento ou variação de distância a montante. No corte a jusante (iii), o perfil de velocidade mostra uma pequena variação conforme muda-se as distâncias entre as edificações nos modelos BCS e BC. No entanto, para o caso CS, o perfil apresenta variações significativas, estendendo-se até aproximadamente $z/H \leq 1,5$ nos casos com maior espaçamento ($2L$ e $3L$). Isso é causado pelo jato proveniente do escoamento cruzado, que se direciona para cima da edificação a jusante.

Gráfico 8 – Velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) em cortes verticais posicionados nos cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança

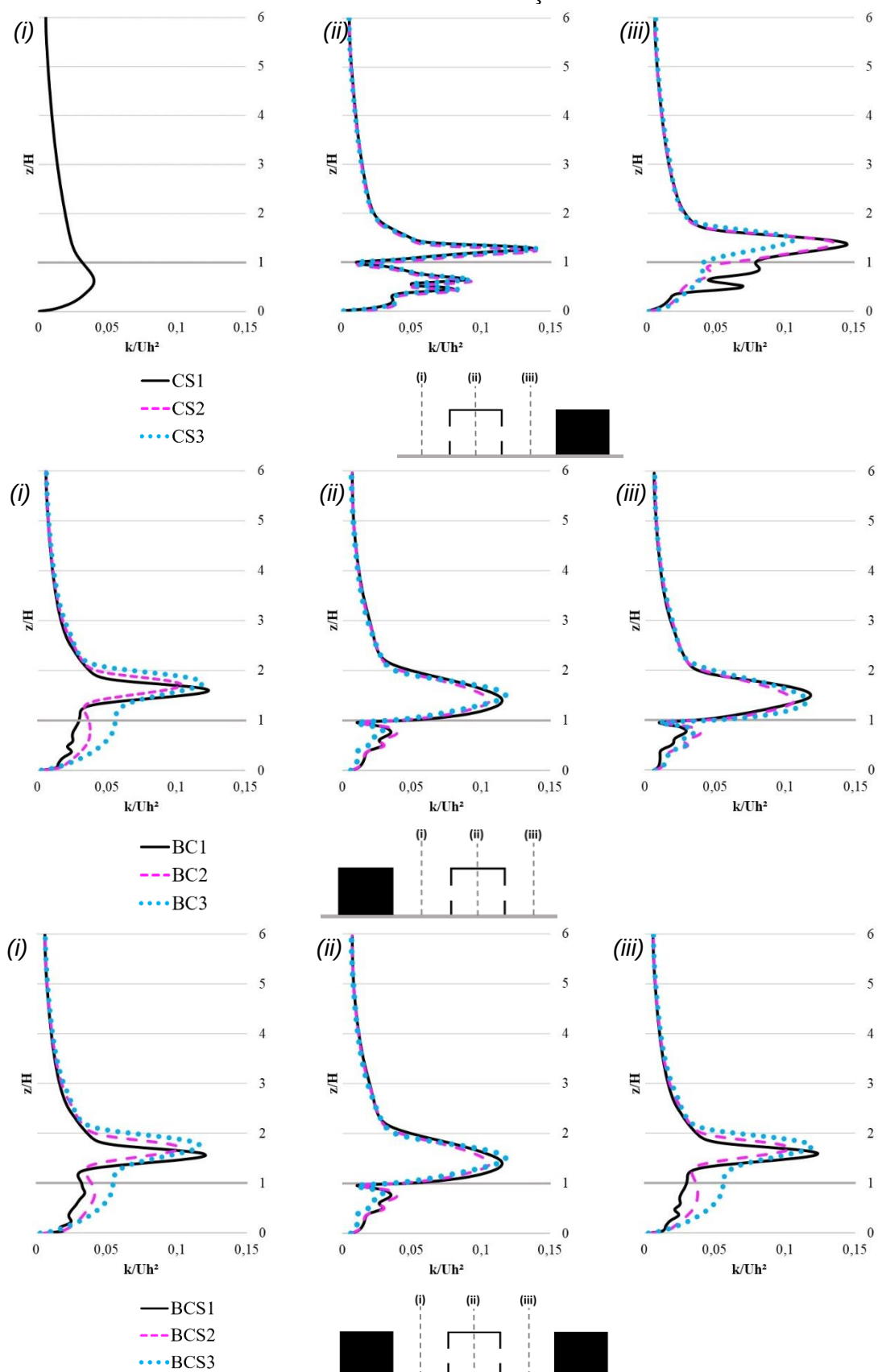


Fonte: A Autora (2023)

A partir dos perfis de energia cinética adimensionalizada, ver Gráfico 9, podem-se observar zonas ($1 < z/H < 2$) que concentram altos valores de k/U_h^2 . O máximo valor da energia cinética localiza-se ligeiramente acima das cavidades e do teto da edificação. Entretanto, o valor da energia cinética reduz significativamente no interior dos cânions formado entre as edificações e no interior da edificação com aberturas, ou seja, para $0 < z/H < 1$.

Percebe-se que no modelo CS, se atingem os máximos valores de energia cinética turbulenta, aproximadamente 22% maior em comparação com os casos BCS e BC. Isto acontece devido à ausência da edificação a barlavento, portanto, a energia cinética turbulenta associada à separação do escoamento é mais intensa. Nos cortes a montante (i) e jusante (iii) no Gráfico 9, observa-se na região entre $0 < z/H < 1$ a influência que tem a distância entre as edificações na dissipação da energia. Quanto maior o espaçamento, menor é o valor da energia cinética. Na região imediatamente acima do teto da edificação, entre $1 < z/H < 2$, é observado que o mínimo valor da energia cinética acontece nos casos BCS2 e BC2 ($k/U_h^2 = 0,01043$).

Gráfico 9 – Energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) em cortes verticais posicionados nos cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança

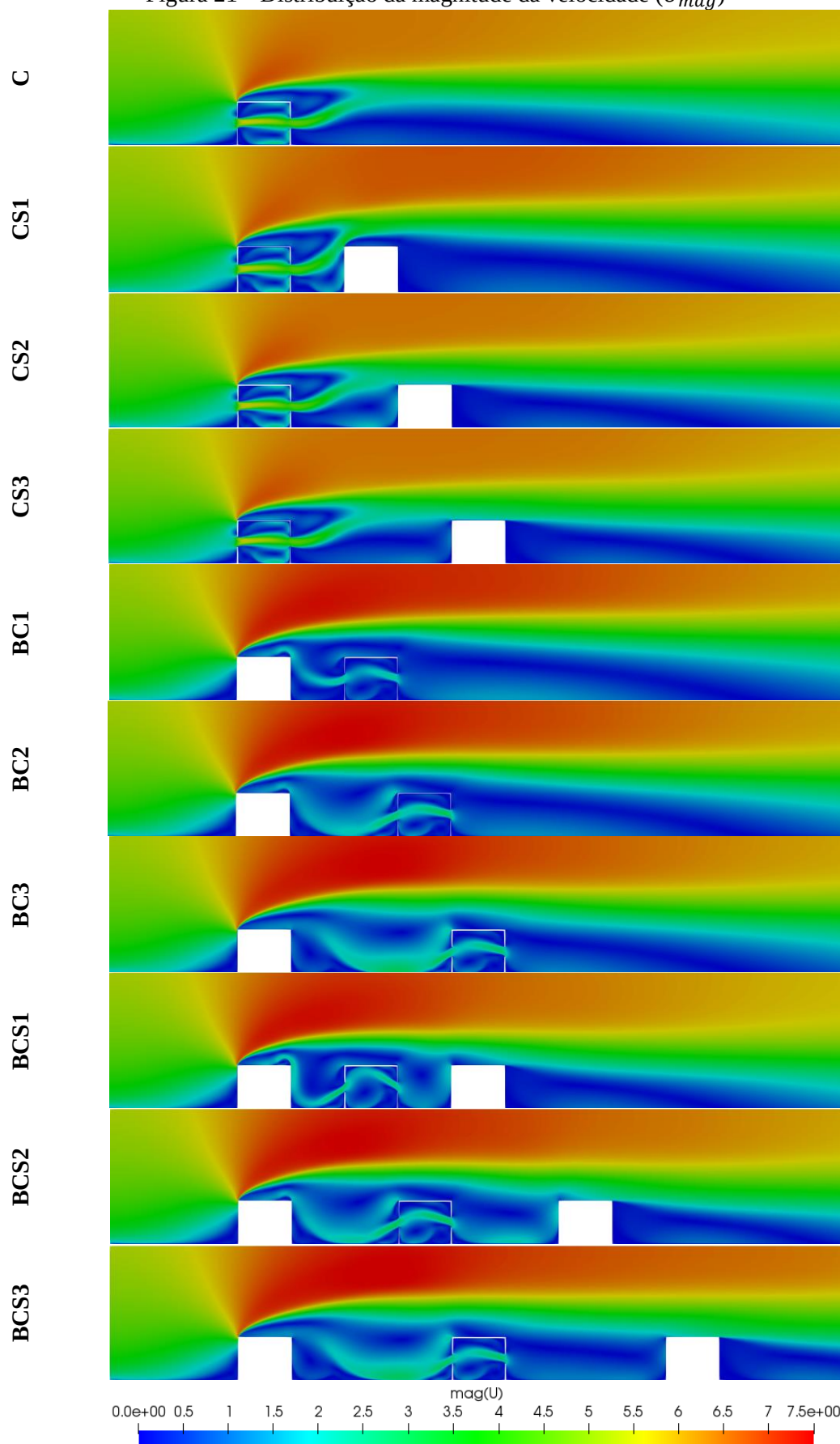


Fonte: A Autora (2023)

Os cortes a montante (i) dos casos CS, gráficos 8 e 9, só foram apresentados para o modelo com espaçamento $1L$, já que não há variação na entrada do domínio.

A partir da visualização da distribuição da magnitude da velocidade para os modelos estudados, apresentada na Figura 21, é possível observar o comportamento do escoamento em todo o domínio, incluindo o direcionamento e espalhamento do jato nas aberturas cruzadas da edificação, desconsiderando o efeito temporal. Também pode-se observar a interferência que o espaçamento entre as edificações estabelece no escoamento cruzado. Nos casos BC e BCS com $1L$ e $2L$, observa-se que a inversão no sentido do jato, ver figuras 24 e 26, induz a separação da camada limite e consequentemente a formação da “bolha de separação” no teto da primeira edificação. Esse fenômeno pode ser observado em Shirzadi, Tominaga e Mirzale (2020b), Shirzadi, Mirzale e Tominaga (2021) e Jooss *et al.* (2022), onde verifica-se um fluxo reverso acima do telhado do edifício a montante, com a formação do vórtice.

Figura 21 – Distribuição da magnitude da velocidade (U_{mag})

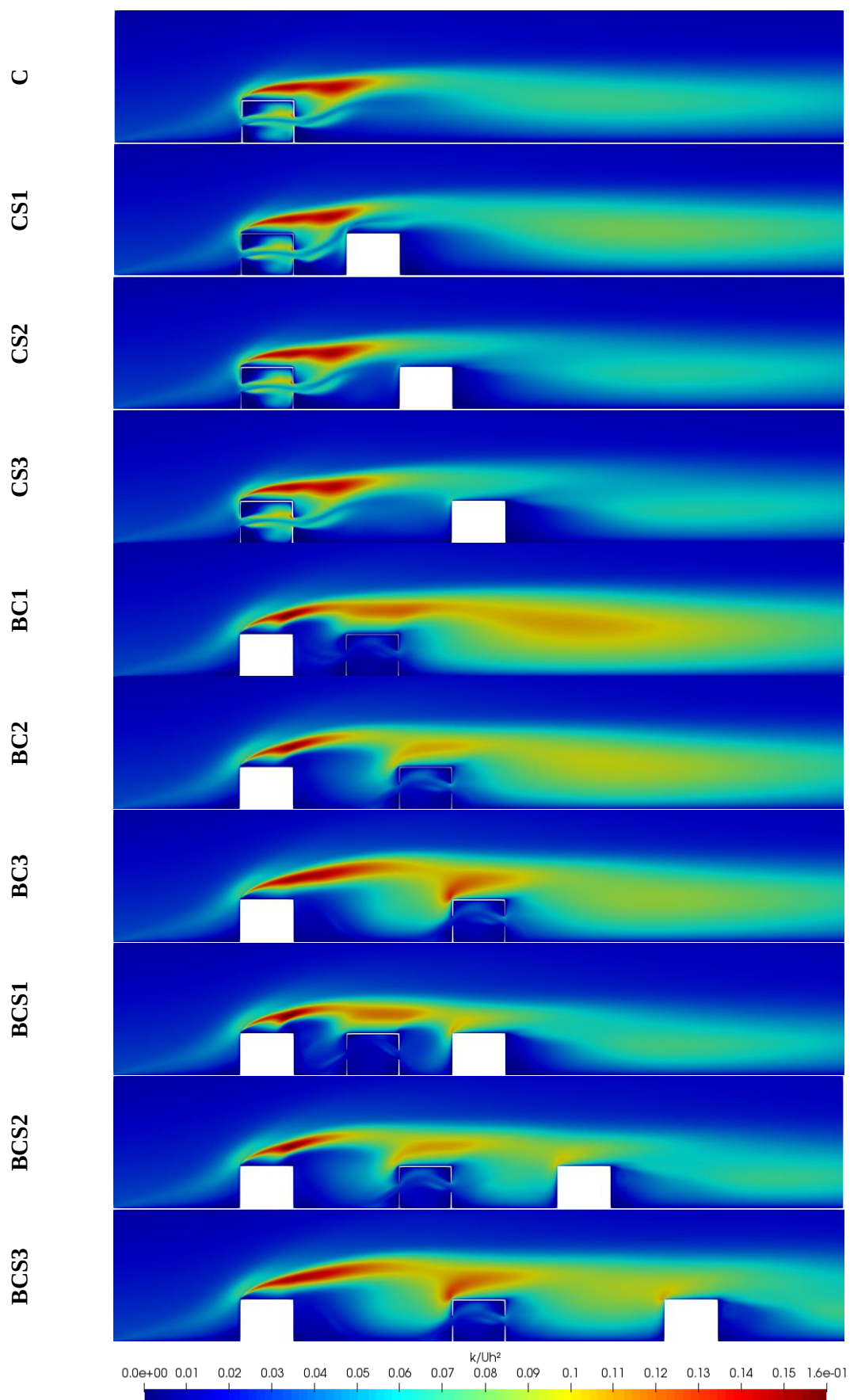


A distribuição da energia cinética turbulenta adimensionalizada para cada caso é mostrada na Figura 22, esclarecendo visualmente a análise anteriormente realizada nos cortes dos gráficos 7 e 9. Nas regiões em tons quentes, é possível observar as zonas de alta energia decorrentes da separação do escoamento e regiões de intensa circulação. Por outro lado, nas regiões de tons mais frios da escala, identificam-se as regiões de baixa energia cinética, como nas regiões entre os cânions e interior da edificação.

Os valores mais elevados de energia cinética turbulenta originam-se no exterior das edificações, onde está presente uma grande área com elevados valores de energia cinética ($k/U_h^2 > 0,16$), assim como observado por Shirzadi, Mirzaei e Tominaga (2021). Na região do jato de entrada (abertura frontal), a energia cinética é maior nos casos C e CS ($k/U_h^2 > 0,065$). Já nos casos BC e BCS são observados valores menos significativos ($k/U_h^2 < 0,03$) à medida que se reduz o espaçamento entre as edificações.

Na zona de esteira dos modelos em série, observa-se uma grande área com elevado valor de energia cinética turbulenta, resultado da separação da camada limite da primeira edificação somada a energia gerada devido à separação na segunda edificação em série, fazendo incremento a energia cinética na esteira. Esse fenômeno é mais significativo nos casos com menor espaçamento entre as edificações (CS1, BC1 e BCS1).

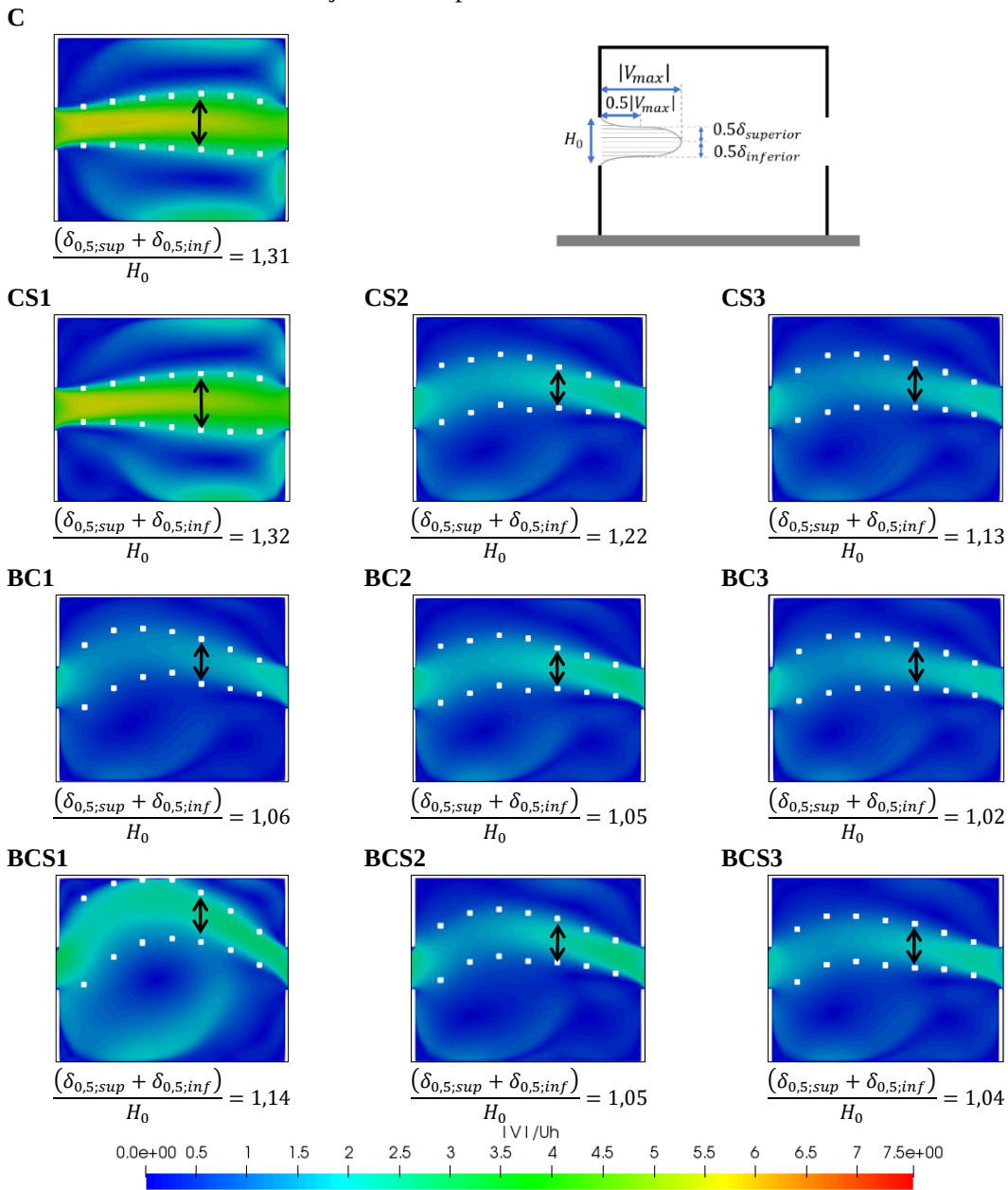
Figura 22 – Distribuição da energia cinética turbulenta adimensionalizada (k/U_h^2)



Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 23, apresenta-se a distribuição da velocidade média adimensionalizada ($|V|/U_h$) e a localização da largura do jato nas edificações com aberturas para os diferentes modelos. O espalhamento do jato é estimado calculando a expressão $(\delta_{0,5;superior} + \delta_{0,5;inferior})/H_o$ em $x/D = 0,625$, sendo H_o a altura da abertura. Conforme Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017), a meia largura do jato $\delta_{0,5}$ é definida como a distância vertical entre a magnitude da velocidade máxima local do jato ($|V_{m\acute{a}x}|$) e o local onde a magnitude da velocidade é igual à metade dessa velocidade máxima, ou seja $0,5|V_{m\acute{a}x}|$, destacada por pontos brancos na figura.

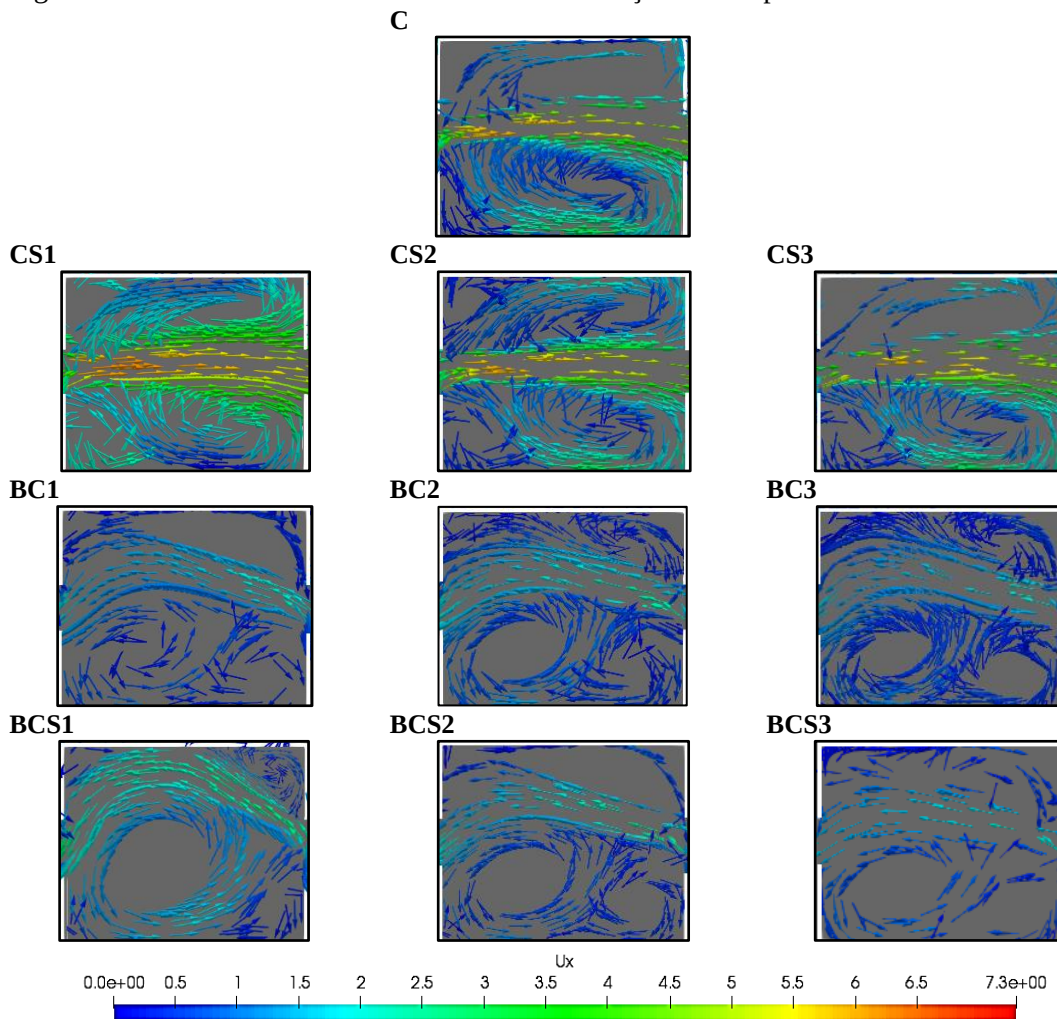
Figura 23 – Distribuição da velocidade média adimensional ($|V|/U_h$) e localização da largura do jato obtida para os dez casos estudados



Percebe-se que o parâmetro do espalhamento do jato é maior nos casos nos quais não existe nenhuma barreira a montante da edificação que interfira no escoamento de ar, ou seja, para os casos do modelo isolado (C) e CS. Para os modelos BC e BCS, é possível observar os menores valores do parâmetro. Nota-se que o aumento da distância entre as edificações influencia diretamente no tamanho do espalhamento do jato, que tende a diminuir à medida que se aumenta o espaçamento entre as edificações. No entanto, essa diminuição é mais acentuada para o modelo CS em comparação com os modelos BC e BCS.

A distribuição dos vetores associados à componente x da velocidade (U_x) no interior da edificação é apresentado na Figura 24, para cada um dos casos analisados. Pode-se observar, por meio da orientação dos vetores, que no interior dos modelos de edificações BC e BCS existe uma inversão no sentido do escoamento, ou seja, o escoamento entra pela abertura posterior e sai pela abertura anterior.

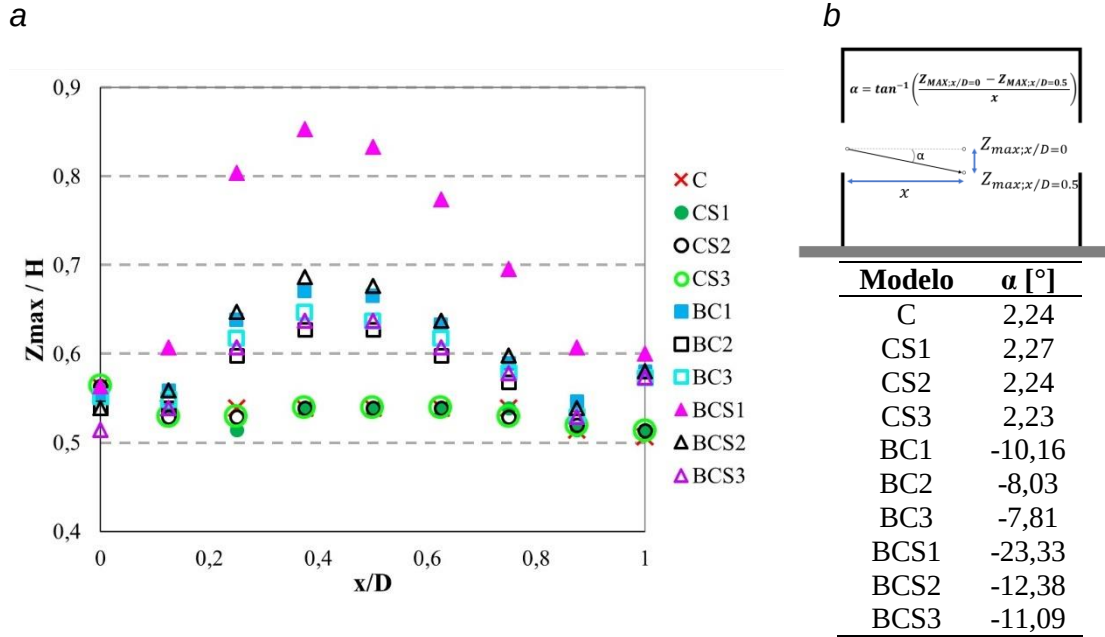
Figura 24 – Sentido das linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)



Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 25, mostra-se a trajetória do jato com base na velocidade de sua linha central e o ângulo do jato formado. Na Figura 25.a, os símbolos representam a localização vertical da velocidade máxima do jato local ao longo de sete linhas verticais no interior da edificação com aberturas.

Figura 25 – (a) Posição vertical (Z_{MAX}/H) da velocidade máxima ($|V|_{MAX}$) ao longo da edificação e (b) ângulo do jato na abertura de entrada baseado em $|V|_{MAX}$ em $x/D = 0$ e $x/D = 0,5$



Fonte: A Autora (2023)

Observa-se que os modelos CS e C apresentam uma trajetória aproximadamente horizontal na posição média das aberturas. Já os modelos BC e BCS apresentam uma trajetória ascendente, sendo mais acentuada no modelo BCS1, como já relatado nos cortes dos perfis de velocidade anteriormente. Percebe-se que o aumento do espaçamento entre as edificações induz uma redução no ângulo do jato na abertura de entrada.

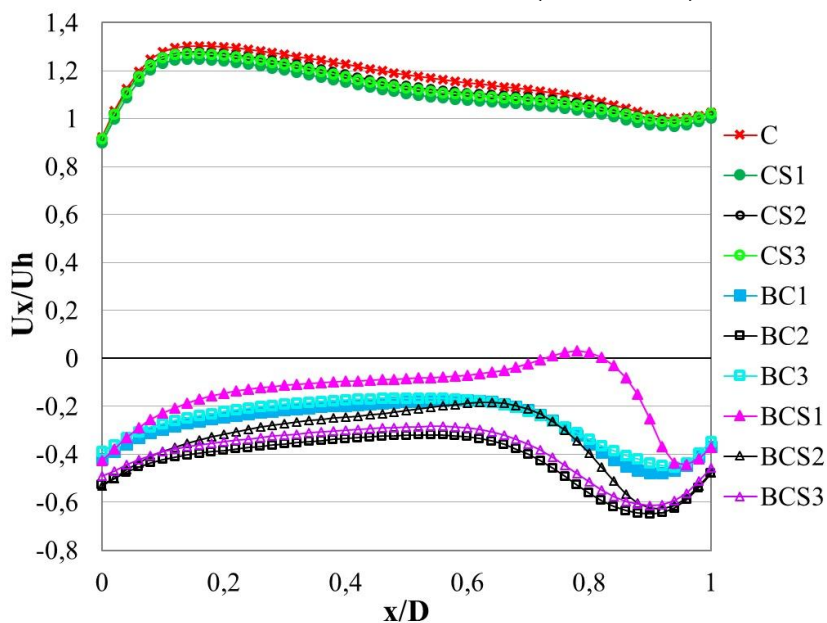
Na Figura 25.b, apresenta-se o ângulo do jato da abertura de entrada α para os diferentes casos. Esse ângulo é definido com base na localização do valor da velocidade máxima ($|V|_{MAX}$), na posição da abertura frontal e no eixo central da edificação ($x/D = 0,5$). O parâmetro α é definido conforme a Equação 63 e foi utilizado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) e Bazdidi-Tehrani, Masoumi-Verki e Gholamalipour (2020), entre outros estudos.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{MAX; x/D=0} - Z_{MAX; x/D=0.5}}{x} \right) \quad (63)$$

O valor do ângulo do jato de entrada varia entre $2,23^\circ$ e $-23,33^\circ$ para os casos analisados. Com base nos ângulos do jato, é possível concluir e reforçar o que já havia sido relatado anteriormente, onde os modelos C e CS, em função do seu baixo ângulo, levam a jatos com trajetória horizontal. Já nos casos BC e BCS, onde são observados valores negativos, reforça-se a direção ascendente do jato, indicando que a velocidade máxima no ponto central da edificação está localizada em uma altura superior em comparação ao mesmo parâmetro na abertura frontal.

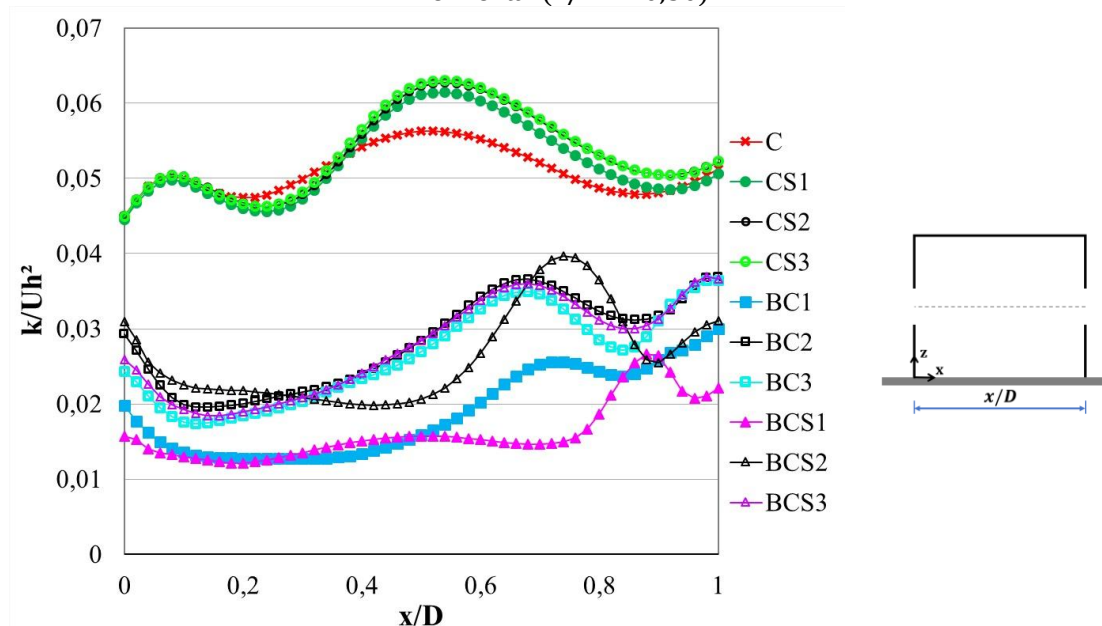
A variação da componente da velocidade na direção x (U_x/U_h) ao longo da linha média entre as duas aberturas, $z/H = 0,5$, é apresentada no Gráfico 10. Ao analisar as distribuições de velocidade, é possível separar os modelos em dois grupos com características diferentes. O primeiro grupo é composto pelo modelo isolado (C) e os casos CS, que alcançam valores mais elevados de velocidade, com U_x/U_h quase que inteiramente superando o valor 1,0. O segundo grupo é formado pelos modelos BC e BCS, nos quais se observam valores negativos da velocidade na direção x , correspondentes ao sentido inverso do escoamento, ou seja, entrando pela abertura posterior e se deslocando em direção à abertura frontal. Percebe-se que independentemente da entrada do escoamento, abertura frontal ou posterior, sempre existe a formação de um pico de velocidade (positivo ou negativo) nas proximidades da abertura de entrada do jato.

Gráfico 10 – Velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_h) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$)



No Gráfico 11, apresenta-se a distribuição da energia cinética adimensionalizada na direção x ao longo de uma linha horizontal, em $z/H = 0,5$. Os modelos sem edificações a barlavento (C e CS) exibem um comportamento semelhante, enquanto os demais modelos (BC e BCS) apresentam oscilações e picos de energia próximos à abertura posterior, por onde o jato do escoamento entra. Isso confirma a distinção entre os dois grupos e destaca a influência das edificações adjacentes na distribuição da energia cinética.

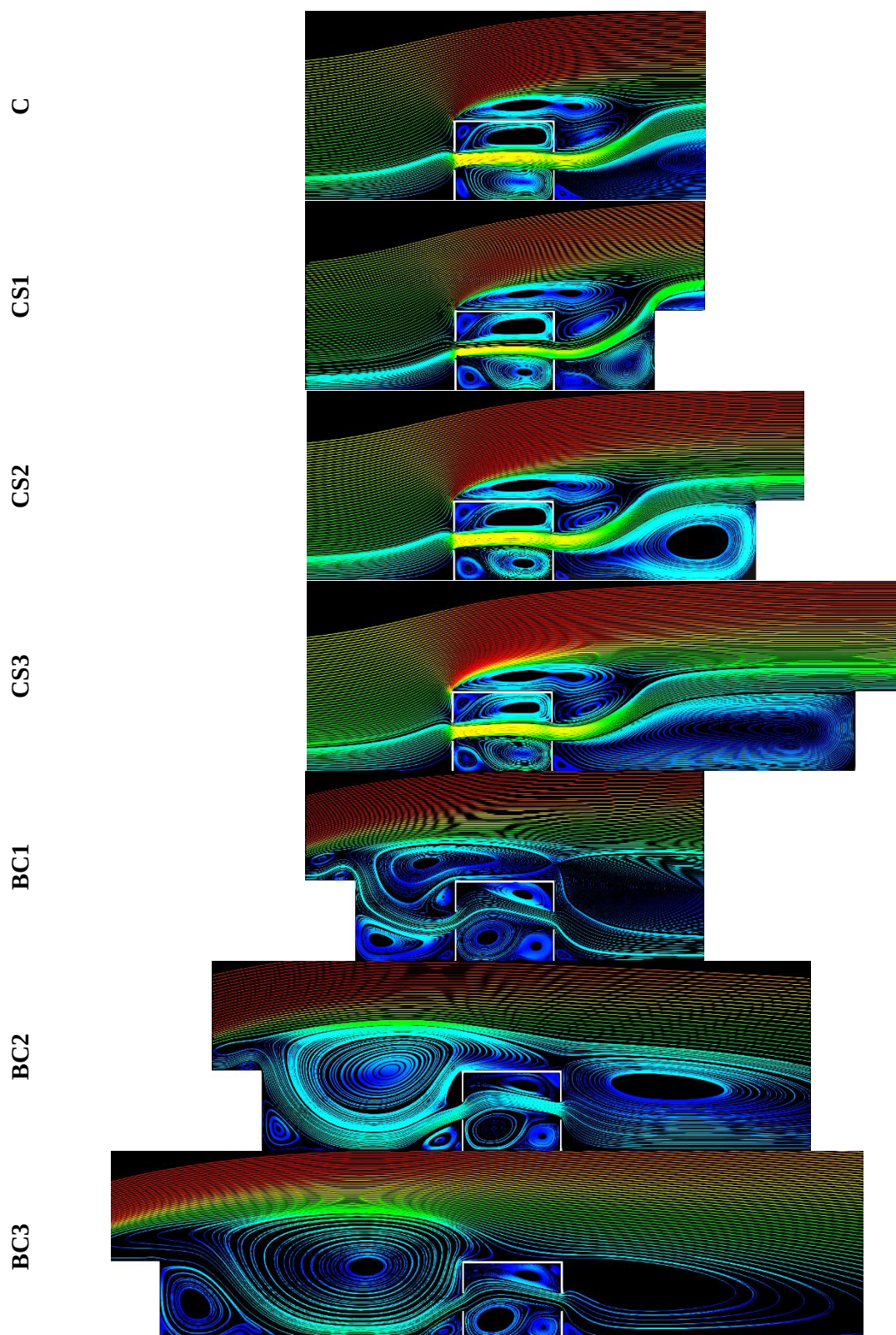
Gráfico 11 – Energia cinética adimensionalizada na direção x (k/U_h^2) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$)

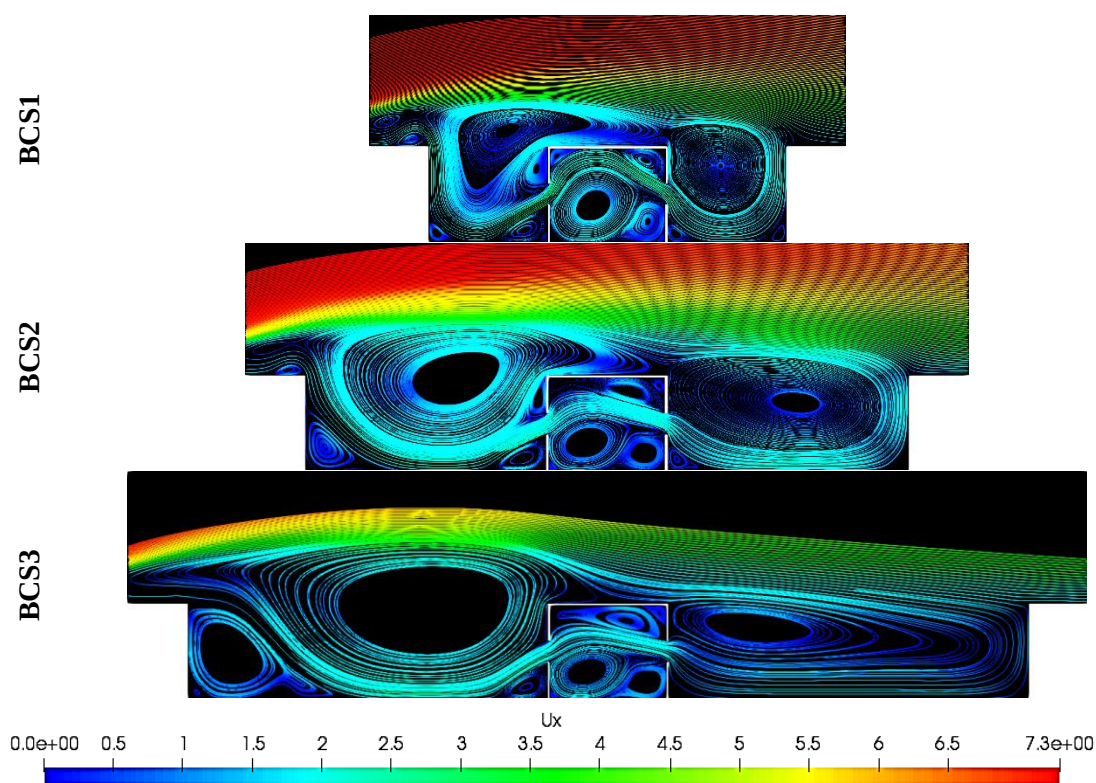


Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 26, mostra-se a disposição do escoamento dentro e ao redor da edificação com aberturas, através das linhas de corrente e a distribuição da velocidade na direção x . Observa-se que as linhas de corrente apresentam diferenças significativas de acordo com o modelo e o espaçamento entre as edificações. Nos casos C e CS os vórtices formados no interior da edificação apresentam um certo grau de simetria com relação à posição do jato horizontal entre as aberturas. Pode-se observar dois pares de vórtices contrarrotativos, sendo que o tamanho dos vórtices na região da abertura frontal é pequeno em comparação com vórtices na região da abertura posterior. É possível observar a formação da “bolha de separação” no teto da edificação a barlavento dos casos BC1/BC2 e BCS1/BCS2, assim como observado na Figura 21, caracterizado como um fenômeno decorrente da inversão do sentido do jato que induz a separação da camada limite.

Figura 26 – Linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)





Fonte: A Autora (2023)

Na Tabela 6, apresentam-se os valores de vazão adimensionalizada na abertura para todos os modelos de edificações em série analisados. Para fins comparativos, também é incluído o valor da vazão para o modelo de edificação isolada (C) para cálculo dos desvios em relação aos modelos de edificação em série. Observa-se que nos modelos com edificação a montante (BC e BCS), há uma redução superior a 55% em comparação com a vazão do modelo isolado. Por outro lado, nos modelos com edificação apenas a jusante (CS), essa diferença se torna insignificante, aproximadamente 1% em relação ao modelo isolado.

Pode-se observar que o valor da vazão sempre foi máximo nos casos em que o distanciamento entre as edificações vale $2L$, independentemente do tipo de configuração analisada (CS, BC e BCS). Os valores negativos de vazão correspondem ao sentido invertido do jato nas aberturas da edificação ventilada dos modelos BC e BCS, onde o jato entra pela abertura posterior e segue em direção a abertura frontal.

Tabela 6 – Vazão adimensionalizada

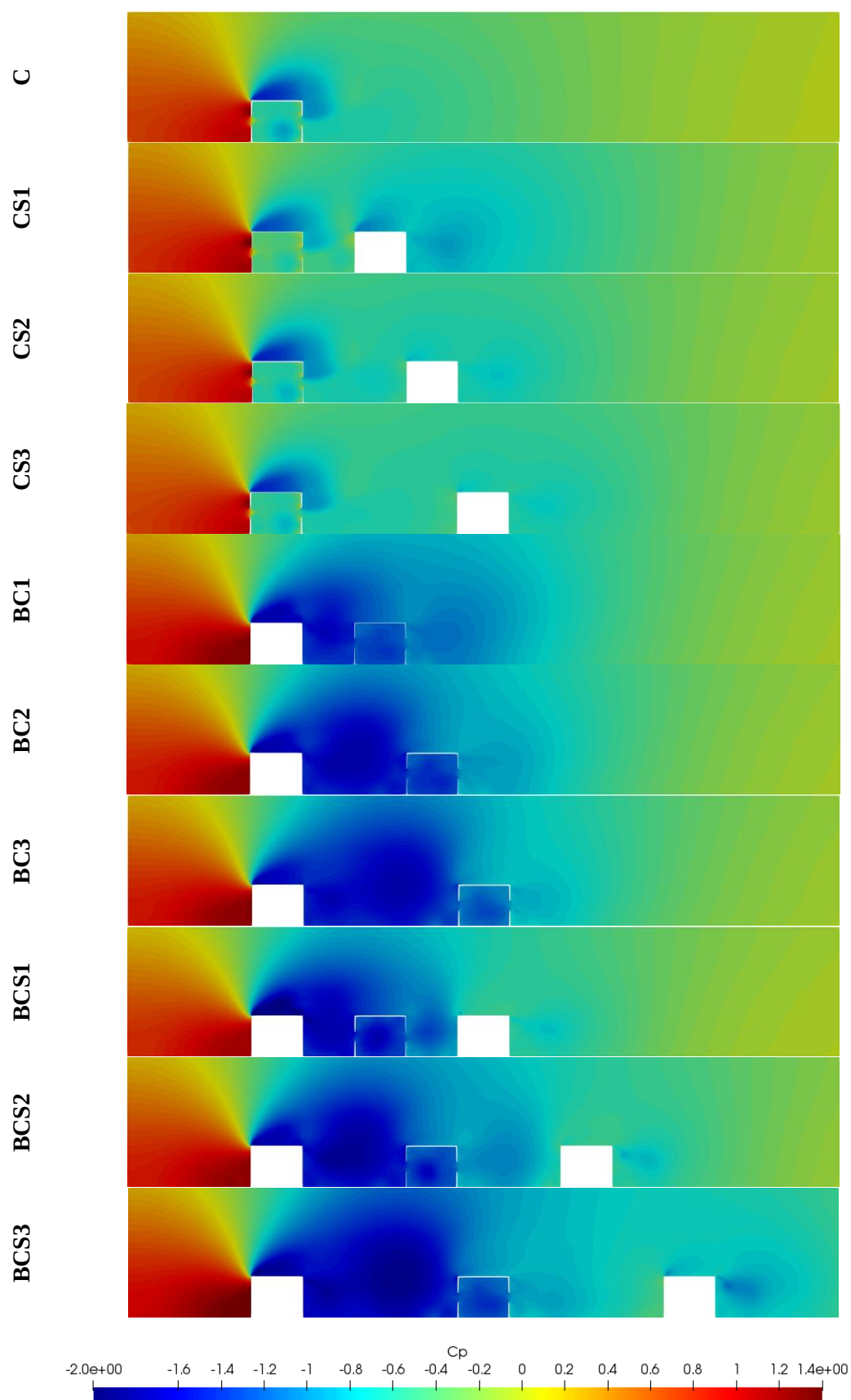
Modelo	$\frac{Q}{u_H A_{abertura}}$	Desvio (%)
C	0,874	-
CS1	0,865	1,04%
CS2	0,875	0,10%
CS3	0,874	0,07%
BC1	-0,324	62,90%
BC2	-0,380	56,49%
BC3	-0,329	62,39%
BCS1	-0,326	62,74%
BCS2	-0,386	55,82%
BCS3	-0,341	60,96%

Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 27, mostra-se a distribuição do coeficiente de pressão médio para cada um dos dez casos estudados. Conforme esperado para esse tipo de geometria, observa-se uma região de alta pressão na parte frontal da edificação a barlavento, seguida por uma drástica redução após a separação do escoamento na região de esteira. No teto da primeira edificação, devido à separação da camada limite, ocorre a redução da pressão, chegando a valores negativos. Para os modelos BC e BCS, essa região de pressão negativa é bem mais significativa, se estendendo além dos cânions entre as edificações.

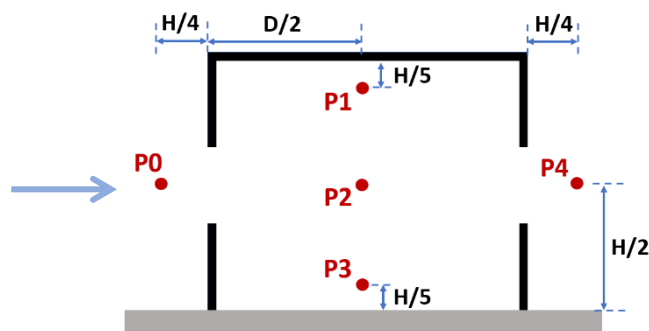
Observa-se que a pressão no interior das edificações é muito semelhante nos casos C e CS devido à diferença de pressões entre as duas aberturas. Essa diferença de pressão é fundamental e favorece a ventilação natural. Entretanto, nos casos BC e BCS os valores da pressão junto às aberturas ficam muito próximos, fazendo com que a diferença de pressão seja pequena e, portanto, reduza a ventilação natural.

Figura 27 – Distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação (C_p)



No decorrer das simulações, foram coletados dados em pontos estratégicos referentes à componente x da velocidade (U_x) e à pressão (p) para análise da convergência dos parâmetros nos diferentes modelos, incluindo a edificação isolada. Na Figura 28, mostra-se a localização desses pontos.

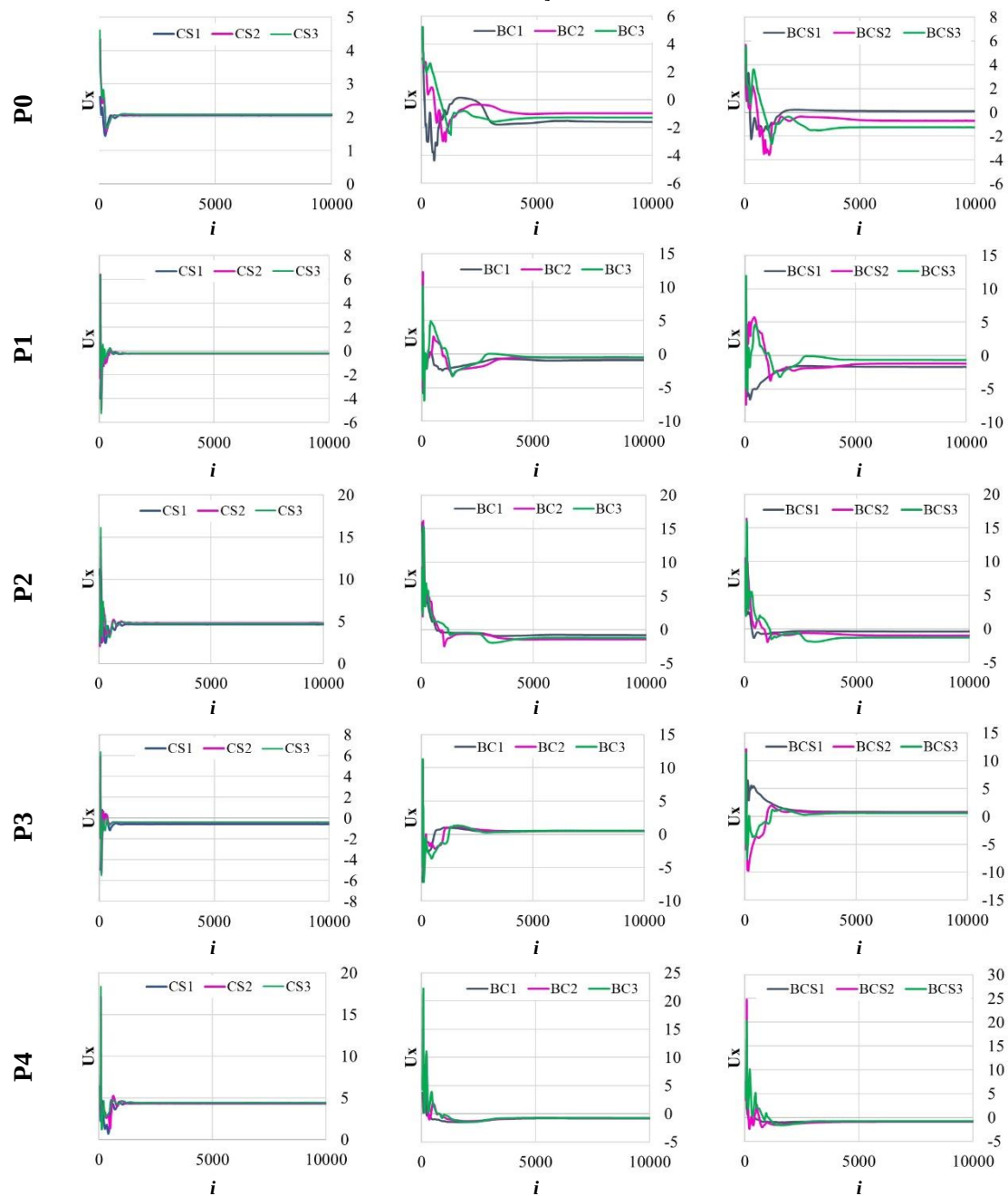
Figura 28 – Localização dos pontos de coleta da componente x da velocidade e da pressão no processo de simulação



Fonte: A Autora (2023)

Percebe-se como a introdução de uma edificação a barlavento sem abertura (casos BC e BCS) causa perturbação no escoamento, exigindo um maior número de passos de tempo para a convergência do parâmetro velocidade. Isso pode ser observado no Gráfico 12 para cada ponto de coleta, principalmente nos pontos P0 e P1, que correspondem à região próxima da abertura frontal e ao teto da edificação, respectivamente, para os modelos BC e BCS.

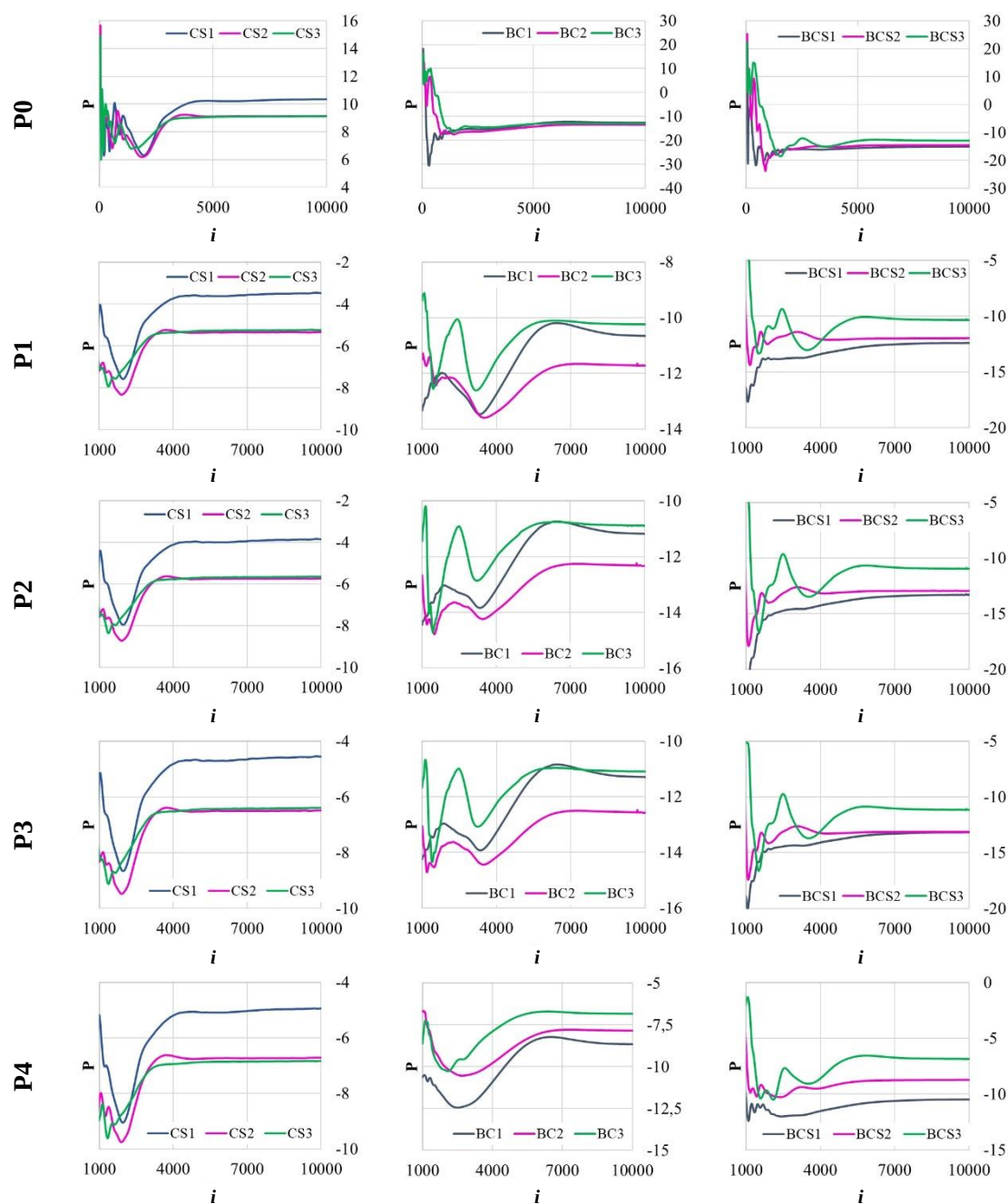
Gráfico 12 – Convergência da velocidade nos pontos coletados para cada modelo com vizinhança



Fonte: A Autora (2023)

O mesmo pode ser observado no Gráfico 13, para a variável da pressão, onde os modelos BC e BCS demandam uma quantidade maior de passos de tempo em comparação com a convergência da variável velocidade.

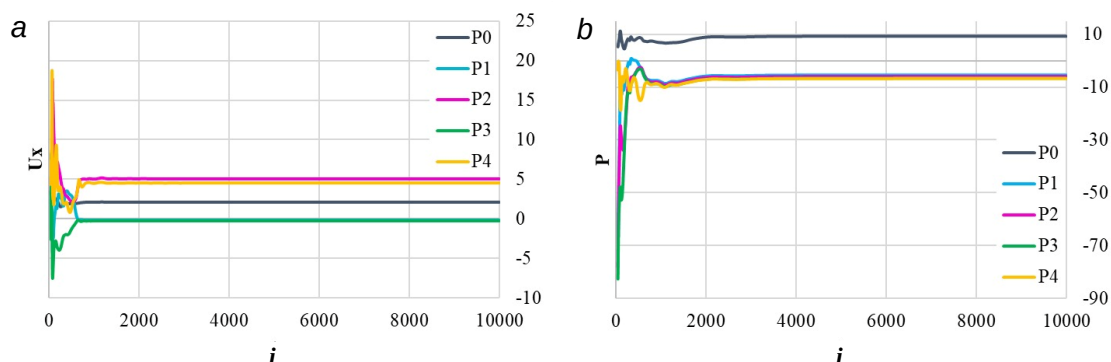
Gráfico 13 – Convergência da pressão nos pontos coletados para cada modelo com vizinhança



Fonte: A Autora (2023)

No Gráfico 14, apresentam-se os parâmetros da velocidade e pressão em função do número de iterações para o caso da edificação isolada. Ambas as variáveis possuem aproximadamente o mesmo intervalo de convergência.

Gráfico 14 – Convergência dos dados de (a) velocidade e (b) pressão nos pontos coletados para o modelo de edificação isolada



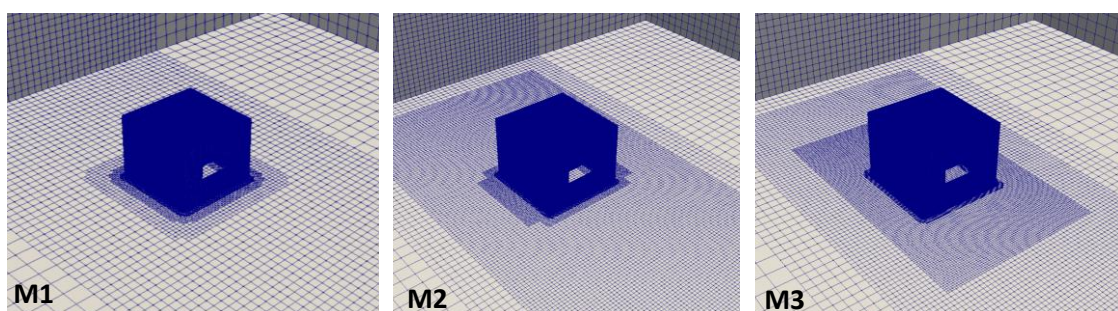
Fonte: A Autora (2023)

6.2 CASO 3D

6.2.1 Análise de sensibilidade de malha 3D

Como o modelo de validação 3D é o mesmo modelo do estudo numérico do caso isolado (C), faz-se inicialmente um estudo de independência de malha utilizando três níveis de discretização espacial. As malhas utilizadas são as malhas menos refinada (M1), média (M2) e fina (M3), contendo respectivamente 545.311, 1.449.49 e 2.249.436 volumes de controle. A representação das três malhas nas proximidades da edificação pode ser observada na Figura 29.

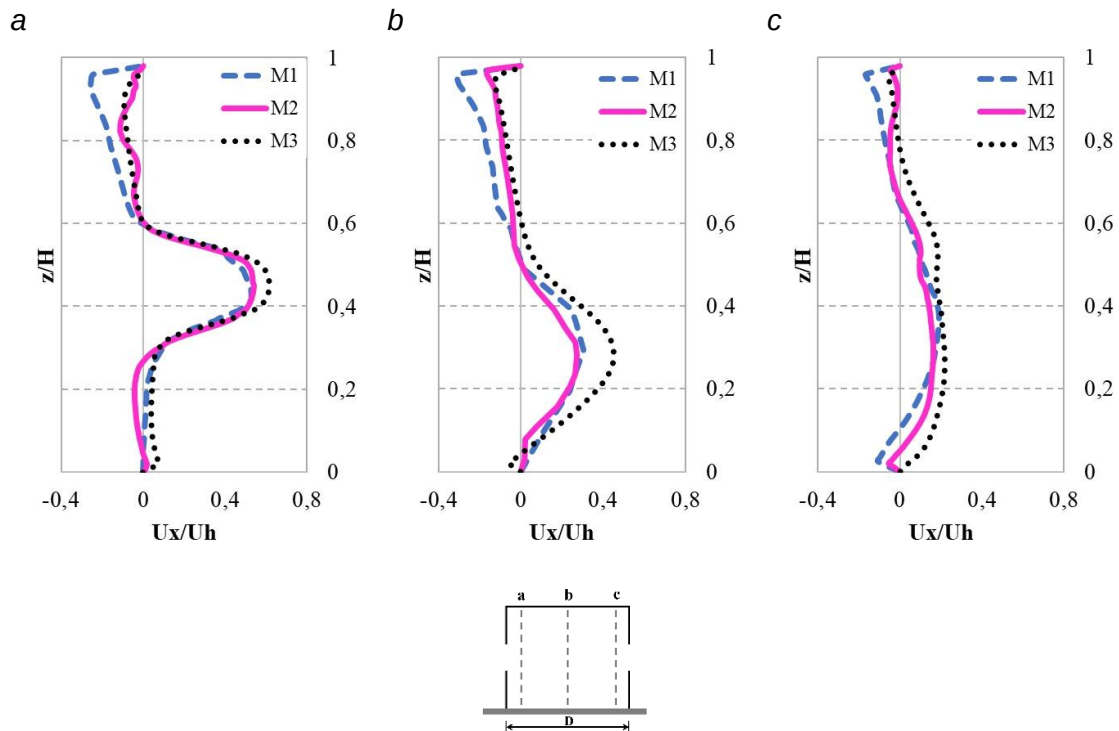
Figura 29 – Discretização para análise de sensibilidade de malha do caso 3D



Fonte: A Autora (2023)

No Gráfico 15, mostra-se a distribuição da componente da velocidade média na direção x adimensionalizada (U_x/U_h) ao longo de três cortes verticais no interior da edificação: (a) $x/D = 0,125$, (b) $x/D = 0,5$, (c) $x/D = 0,875$. Nos cortes, observa-se que não há uma tendência entre os resultados, onde ora as malhas M1 e M2 são semelhantes em algumas alturas, ora as malhas M2 e M3 se assemelham em escoamento.

Gráfico 15 – Análise de sensibilidade de malha (a – c): comparação da velocidade média adimensionalizada na direção x obtida com três diferentes discretizações (menos refinada, média e fina) ao longo de três linhas verticais dentro do edifício no plano central vertical.



Fonte: A Autora (2023)

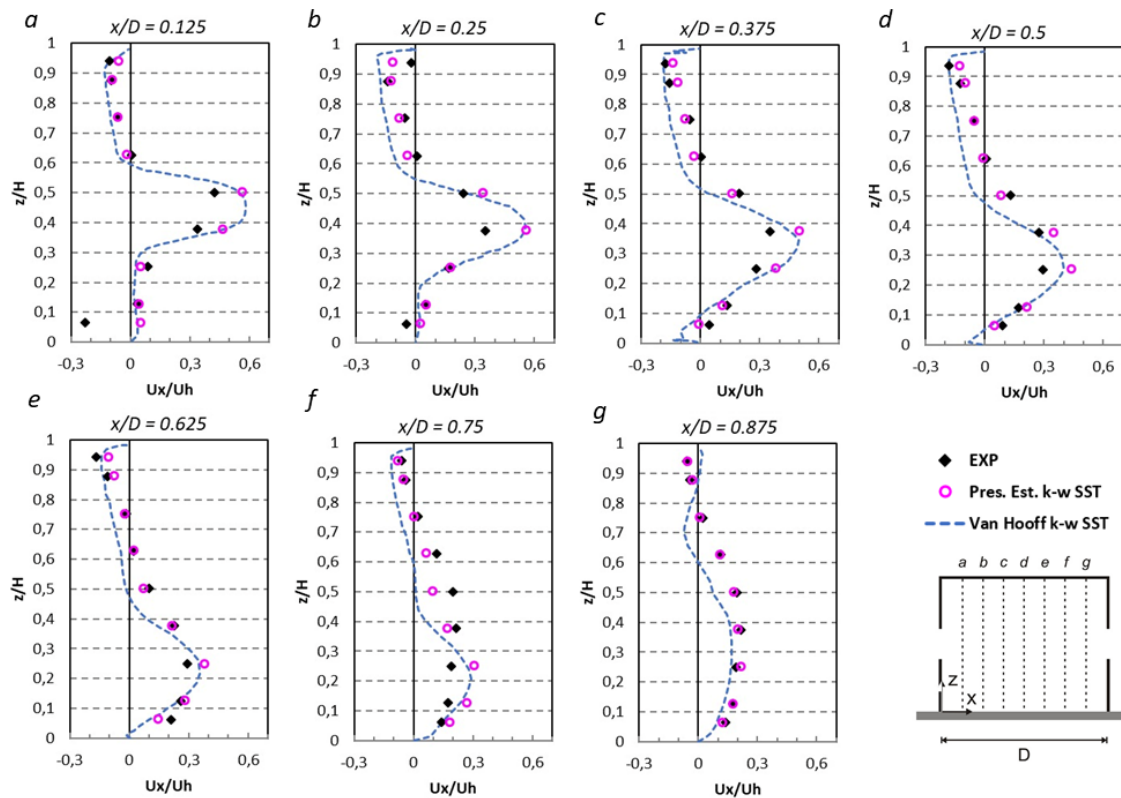
Para avaliar a qualidade da malha, é utilizado o índice GCI (*Grid Convergence Index*), adotando a vazão volumétrica como variável de interesse. Ao avaliar as malhas, os resultados mostraram que para a malha M3 (com cerca de 2 milhões de volumes), há uma incerteza numérica de aproximadamente 0,13% ($GCI^{21}_{M3} = 0,01251$), valor que está dentro dos limites utilizados na literatura (Rojano *et al.*, 2019; Zhang; Weerasuriya; Tse, 2020; Wang *et al.*, 2021). A razão $[GCI^{32}_{M1}/(r^p GCI^{21}_{M3})]$ resulta em 1,09, muito próximo de 1,00, o que indica que os resultados estão dentro da faixa de convergência assintótica. O fator de refinamento de malha (r) foi maior que 1,3 e a ordem de acurácia observada (p) foi usada conforme sugerido por Celik *et al.* (2008). Portanto, a malha M3 é considerada adequada para ser adotada como malha-base nos modelos tridimensionais simulados.

De forma semelhante ao caso bidimensional, é utilizado um refinamento de malha compatível com o estudo de independência de malha realizado para o modelo isolado (M3). Assim, dentro e nas proximidades da edificação, é aplicada uma discretização proporcional ao tamanho do domínio nos casos com edificações em série (BCS1, BCS2, BCS3).

6.2.2 Validação 3D

Para validar quantitativamente o desempenho do modelo de fechamento $k - \omega$ SST utilizado nos modelos tridimensionais, foram empregadas as mesmas métricas de validação utilizadas para validar o modelo bidimensional. Além disso, foram aplicadas as mesmas condições de contorno, perfis das variáveis de turbulência e funções de parede utilizadas nos modelos de edificação 2D e 3D deste estudo. Os parâmetros observados foram a velocidade adimensionalizada (U_x/U_h) e energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2), com base nos dados experimentais de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). Esses dados foram coletados em 63 locais de medição distribuídos em sete perfis verticais ao longo da edificação, conforme ilustrado nos gráficos 16 e 17, representados pela simbologia preta.

Gráfico 16 – Comparação da velocidade média adimensional (U_x/U_h) obtida no presente estudo, no estudo de Van Hooff (linha tracejada) e com medições de túnel de vento ao longo de sete linhas verticais dentro do edifício

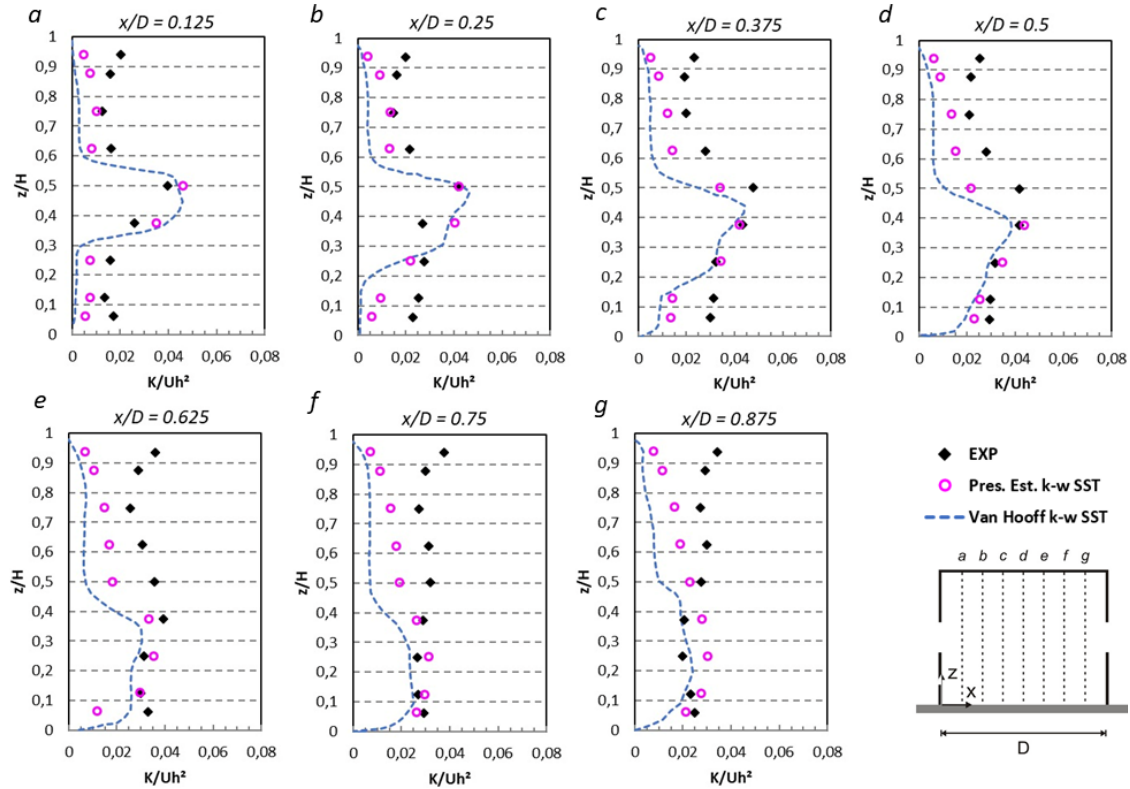


Fonte: A Autora (2023)

É possível observar nos gráficos dos sete cortes, representando a velocidade (Gráfico 16) e energia cinética (Gráfico 17), que tanto o presente estudo numérico quanto o estudo de Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) apresentam distribuições

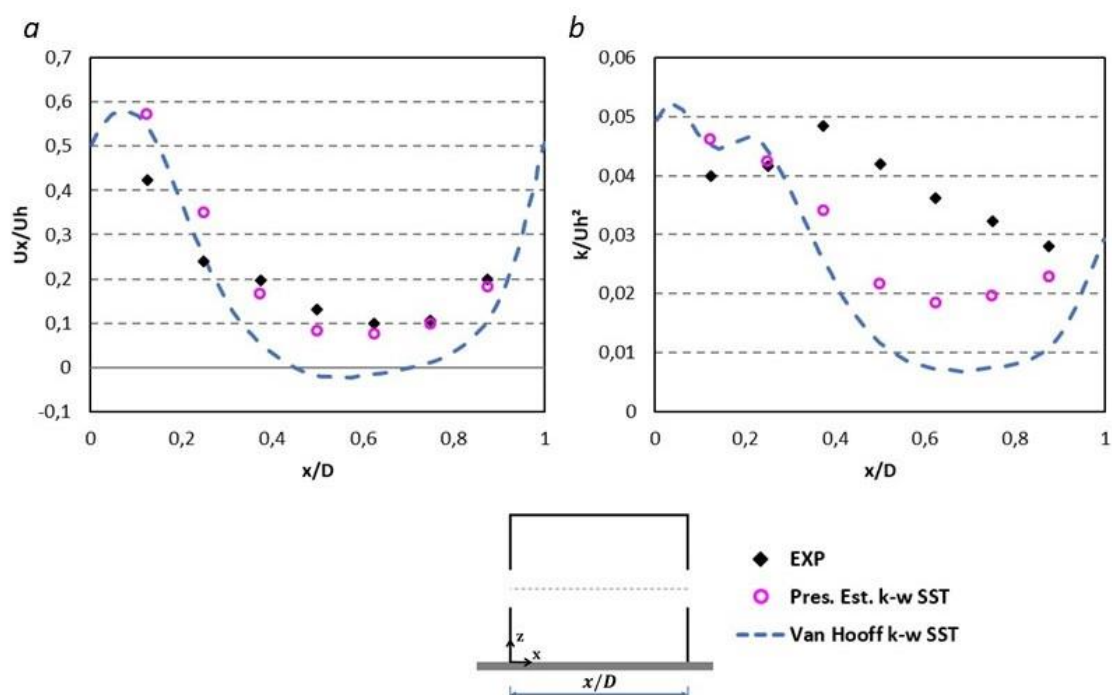
semelhantes em cada corte. Verifica-se que o presente estudo possui pontos que se sobrepõem sobre os dados experimentais, especialmente no caso da velocidade adimensionalizada.

Gráfico 17 – Comparação da energia cinética adimensional (k/U_h^2) obtida no presente estudo, no estudo de Van Hooff (linha tracejada) e com medições de túnel de vento ao longo de sete linhas verticais dentro do edifício



Para uma melhor visualização do comportamento da velocidade e da energia cinética, ambas adimensionalizadas, na posição da altura média das aberturas ($z/H = 0,5$), é apresentado na Gráfico 18 uma comparação dos parâmetros obtidos no presente estudo e no estudo realizado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) em relação ao dado experimental. Dessa forma, é possível observar a proximidade dos resultados quando se compara o presente estudo ao experimental, principalmente em relação a velocidade. Apesar do estudado realizado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) também apresentar uma tendência em direção aos perfis experimentais.

Gráfico 18 – Comparação da (a) velocidade média adimensional (U_x/U_h) e da (b) energia cinética adimensional (k/U_h^2) obtida no presente estudo, no estudo de Van Hooff (linha tracejada) com medições de túnel de vento ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,5$)



Fonte: A Autora (2023)

São apresentados na Tabela 7 os resultados das métricas de validação para velocidade adimensionalizada (U_x/U_h) e para energia cinética turbulenta (k/U_h^2), correlacionado aos resultados do presente estudo numérico e do estudo realizado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017), ambos utilizando o modelo de fechamento $k - \omega$ SST, com os dados experimentais de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011).

Tabela 7 – Métricas de validação para velocidade adimensionalizada (U_x/U_h) e energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2)

Caso	Modelo	U_x/U_h		k/U_h^2		
		FAC2	FAC1.3	FAC2	FB	NMSE
Presente estudo	SST	0,84	0,38	0,67	0,18	0,77
Van Hooff <i>et al.</i> (2017)		0,56	0,32	0,38	0,69	1,38
<i>Valor ideal</i>		1	1	1	0	0

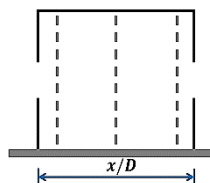
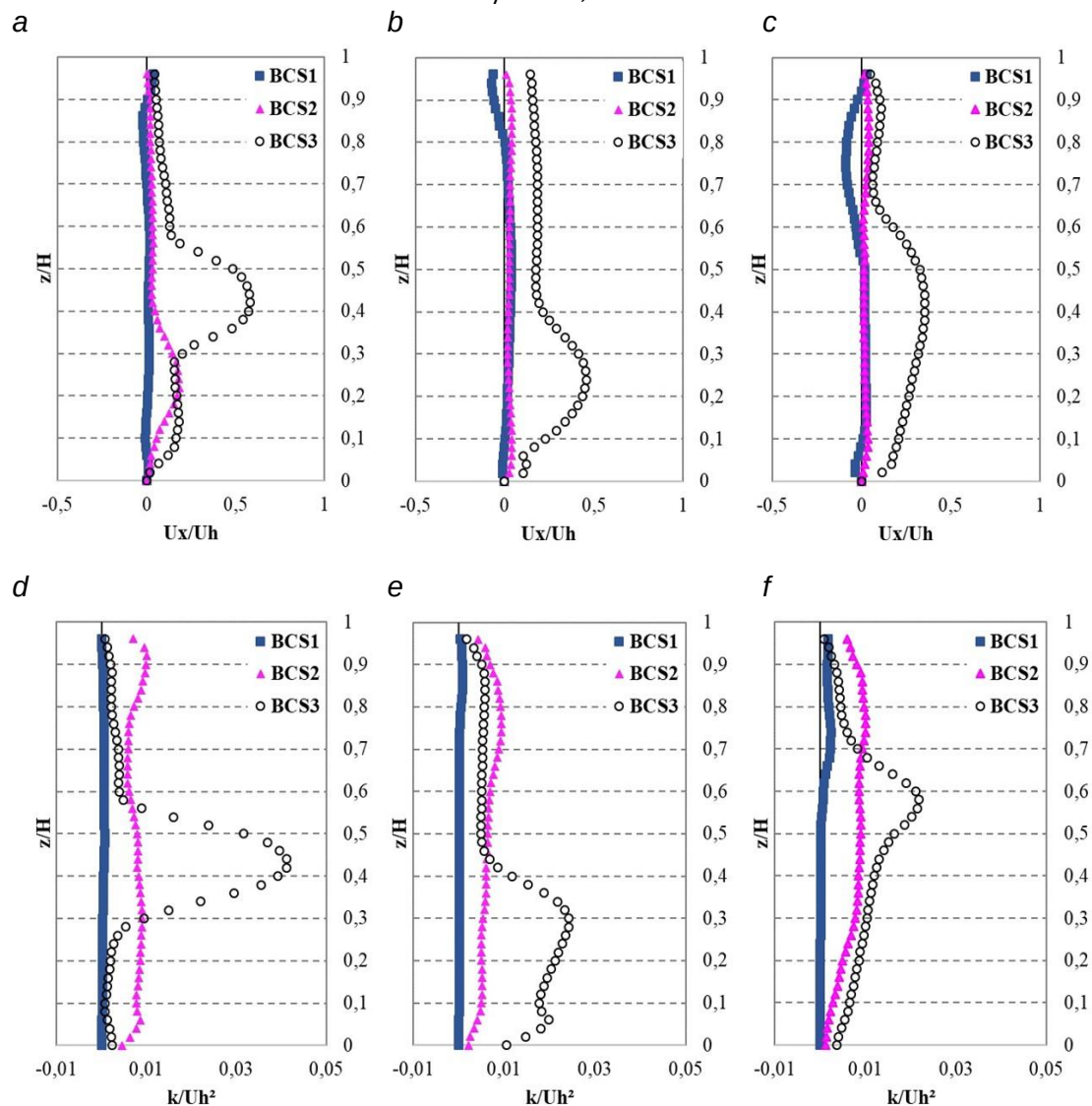
Fonte: A Autora (2023)

Nota-se que o presente estudo numérico apresenta uma concordância melhor com os dados experimentais do que o estudo validado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017), de acordo com as métricas utilizadas. Portanto, pode-se concluir que o modelo numérico e discretização adotados apresentam resultados confiáveis.

6.2.3 Resultados caso 3D

Neste item, apresentam-se os resultados para o caso das edificações modeladas tridimensionalmente. No Gráfico 19, mostra-se uma comparação da distribuição da velocidade na direção x e da energia cinética adimensionalizadas ao longo de três linhas verticais localizadas no interior do modelo de edificação com aberturas, para os casos BCS com as três variações de espaçamento.

Gráfico 19 – (a – c) Comparação da velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) e da (d – f) energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) para os casos de vizinhança ao longo de três linhas verticais no interior da edificação em (a, d) $x/D = 0,125$, (b, e) $x/D = 0,5$ e (c, f) $x/D = 0,875$



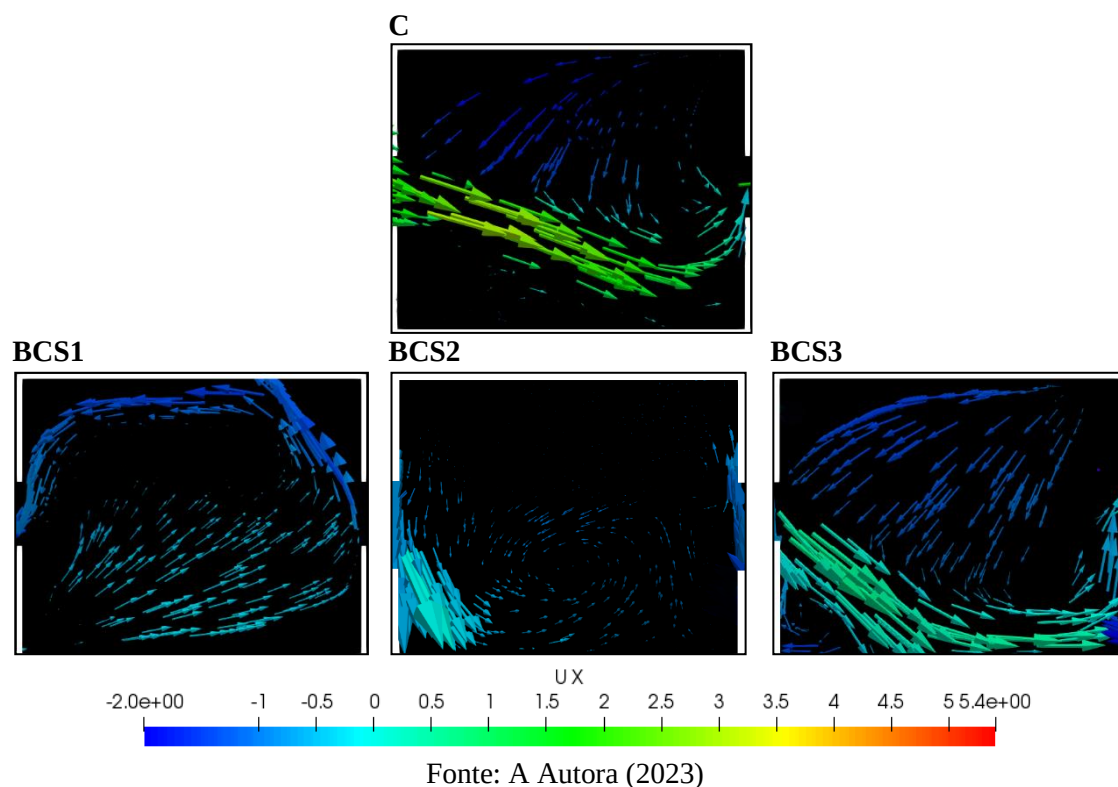
Fonte: A Autora (2023)

Percebe-se que tanto para a velocidade quanto para a energia cinética, os modelos com espaçamento $1L$ e $2L$ possuem pouca variação em seus perfis. No entanto, o modelo com $3L$ apresenta uma maior variação. Nesse caso, isso acontece devido à edificação com aberturas, nos casos BCS1 e BCS2, sempre ficar na esteira de separação da primeira edificação. Na Figura 35, pode-se ver como os vórtices originados nos cânions entre as edificações impedem o escoamento através das aberturas. Diferente do que é observado nos casos bidimensionais, o sentido do escoamento para os modelos com maiores espaçamentos (BCS2 e BCS3) ocorre na direção do escoamento na entrada do domínio, diferindo do BCS1, onde o mesmo ocorre no sentido oposto, com a máxima velocidade na direção x (U_x) negativa. Essa característica é observada no estudo realizado por Shirzadi, Tominaga e Mirzaei (2020) e fica mais evidente ao observar o sentido das linhas de corrente no interior da edificação, conforme apresentado na Figura 30.

Pode-se observar uma variação significativa no máximo valor de U_x/U_h e em sua localização devido ao aumento do espaçamento entre as edificações, como também verificado nos casos bidimensionais, tendendo a valores mais altos à medida que se aumenta a distância. Nos casos BCS1 e BCS2, o valor máximo de U_x/U_h , nos cortes b e c , localiza-se aproximadamente em z/H entre 0,7 e 0,9. Já para o caso BCS3, o valor máximo tende a se aproximar da altura média da abertura ($z/H = 0,5$) nos cortes próximos às aberturas de entrada e saída do escoamento, com uma queda relativa de posição no corte central ($z/H = 0,25$).

O sentido das linhas de corrente e a distribuição da componente x da velocidade (U_x) no interior da edificação para os modelos BCS e C pode ser verificado na Figura 30, para um corte no eixo central perpendicular à direção y do domínio. Ao analisar a orientação dos vetores, pode-se confirmar o que foi mencionado anteriormente em relação à direção do escoamento para cada modelo.

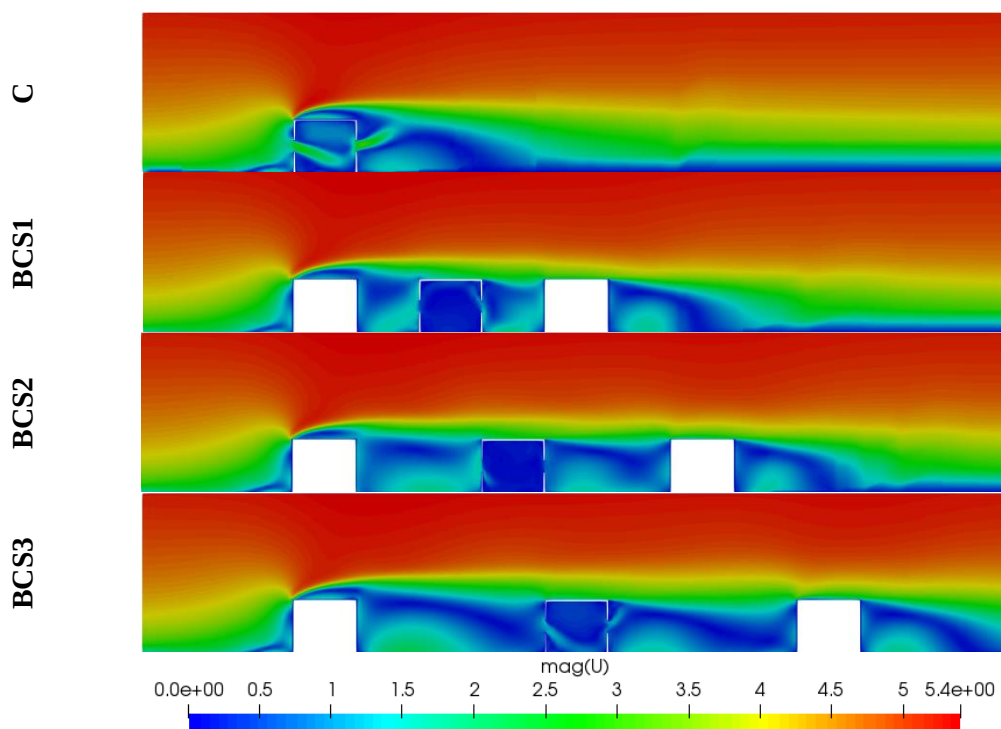
Figura 30 – Sentido das linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)



Fonte: A Autora (2023)

A partir da distribuição da magnitude da velocidade no plano xz dos modelos tridimensionais, apresentada na Figura 31, é possível observar o comportamento do escoamento nos diferentes casos, como o direcionamento e espalhamento do jato na edificação com aberturas. Para a edificação isolada (C), o jato entra diretamente no edifício através da abertura frontal formando um escoamento descendente, assim como observado nos modelos BCS2 e BCS3. Análogo ao caso 2D, a inversão do sentido do jato é observada apenas para o modelo BCS1, ver Figura 30, onde o jato entra pela abertura posterior da edificação com um escoamento ascendente, direcionando-se ao teto da edificação.

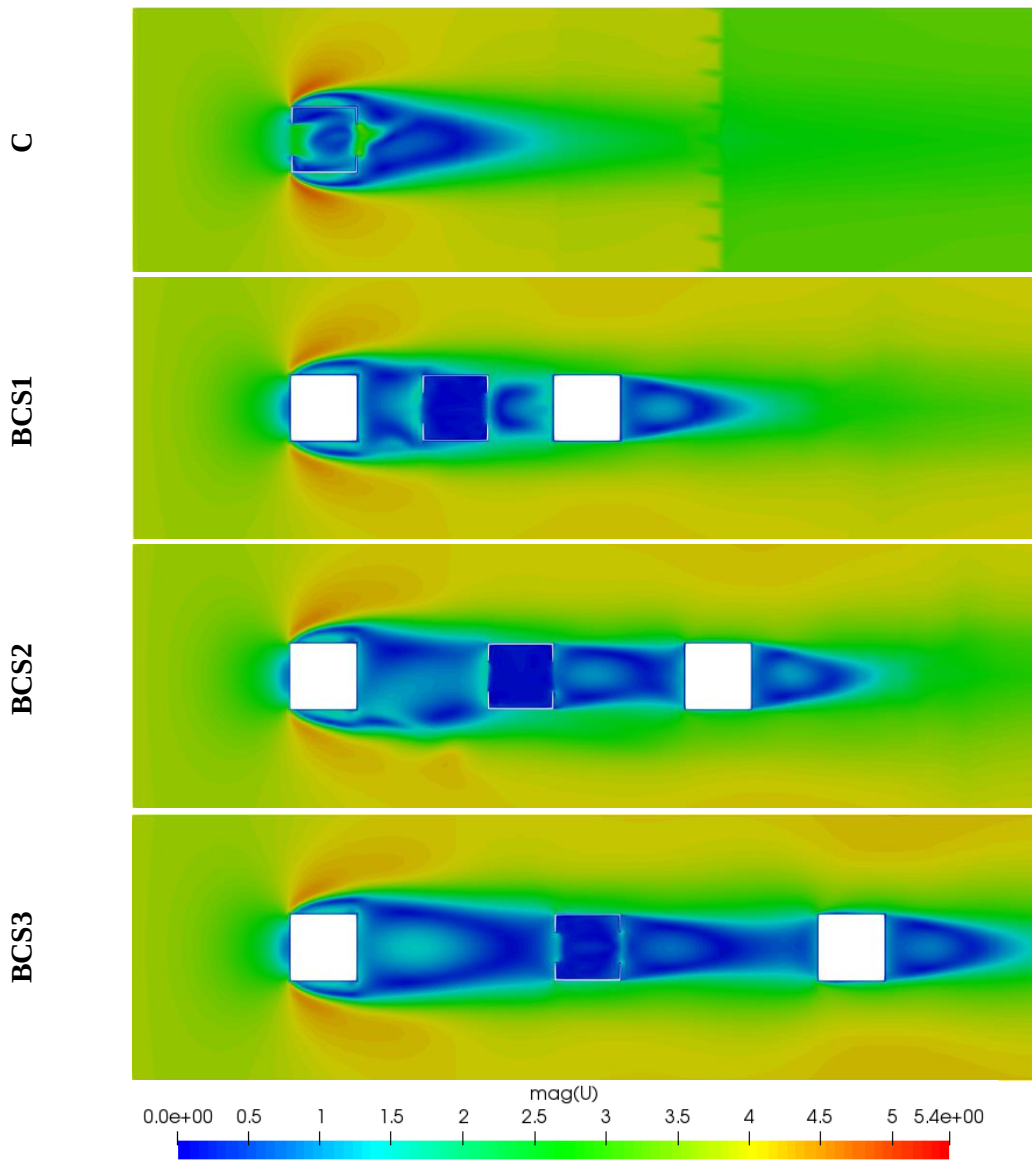
Figura 31 – Distribuição da magnitude da velocidade (U_{mag}) no plano xz



Fonte: A Autora (2023)

A distribuição da magnitude da velocidade no plano horizontal xy ($z = 0,5H$), apresentada na Figura 32, mostra a presença do jato incidente no interior da edificação para o modelo C ($U_{mag} \geq 2,5$) e um jato fraco quase imperceptível para os modelos BCS, aumentando visivelmente para os casos menos densos (BCS3). Conforme observado por Shirzadi, Mirzaei e Tominaga (2021), a característica mais importante sobre o plano horizontal é a formação de dois vórtices contra-rotativos simétricos na cavidade entre a primeira e a segunda edificação, sendo mais nítido no modelo BCS1. Também é possível notar que os vórtices formados a sotavento da edificação com aberturas redirecionam o fluxo de ar através da abertura posterior no modelo BCS1, ocasionando a inversão do sentido do jato. Este fenômeno também é observado por Shirzadi, Mirzaei e Tominaga (2021) para a menor proporção de área simulada, ou seja, o modelo com menor espaçamento entre as edificações.

Figura 32 – Distribuição da magnitude da velocidade (U_{mag}) no plano xy ($z = 0,5H$)

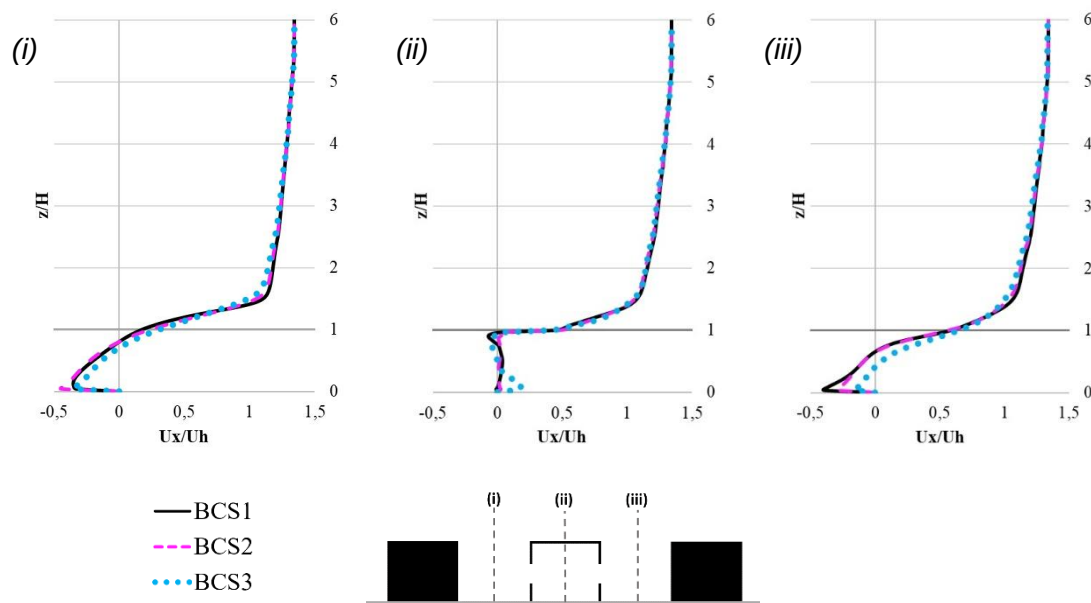


Fonte: A Autora (2023)

Uma análise da distribuição da velocidade na direção x e da energia cinética turbulenta foi realizada em perfis verticais nos centros dos cânions para os modelos tridimensionais, tanto a montante (i) quanto a jusante (iii) da edificação com aberturas, além do plano central da edificação em análise (ii). No caso 3D, a principal variação do perfil de velocidade média adimensionalizada em relação ao espaçamento L entre as edificações acontece em $0 < z/H < 1$, ver Gráfico 20. Já no caso 2D, essa mudança ocorre na região $0 < z/H < 2.5$, ver Gráfico 8. Também se percebe que no caso 2D a máxima velocidade é aproximadamente $U_x/U_h \cong 1.5$, na região $z/H = 2$. Entretanto, no caso 3D não se observa esse aumento de velocidade. Cabe destacar que no caso 2D as

velocidades são superestimadas, sendo que no interior da edificação isso fica mais evidente, ver corte (ii).

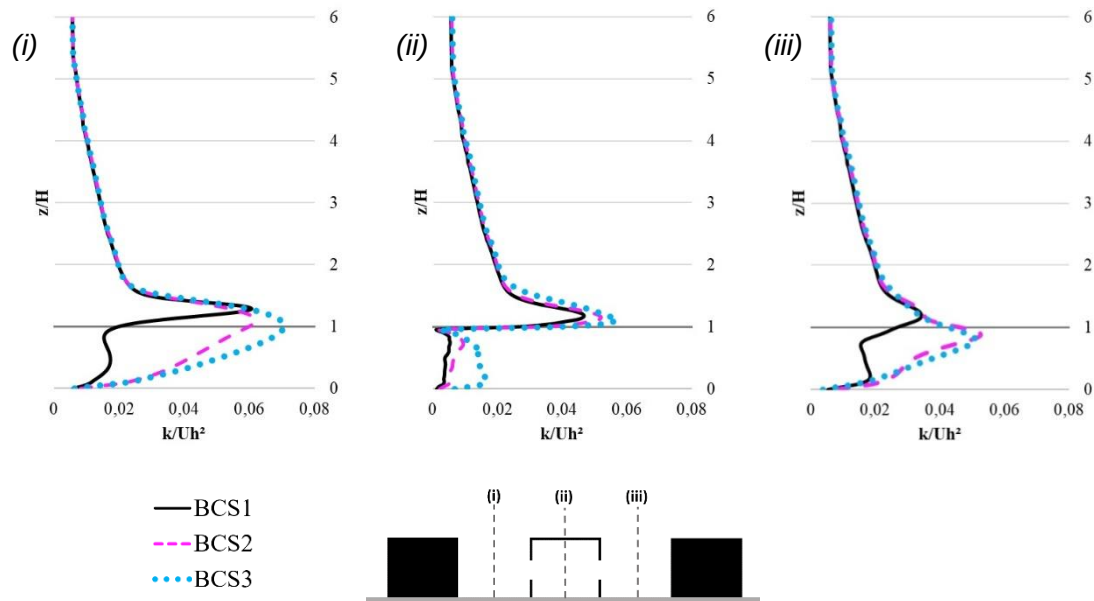
Gráfico 20 – Velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) em perfis verticais posicionados entre os cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança



Fonte: A Autora (2023)

Já com relação aos perfis de energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2), conforme ilustrado no Gráfico 21, é possível observar que as regiões de alta energia, apresentam um pico de energia inferior ao observado nos casos bidimensionais ($k/U_h^2 = 0,12$), atingindo no máximo $k/U_h^2 = 0,07$. Essa energia é decorrente da separação do escoamento. À medida que o escoamento se direciona para o interior do cânion ($0 < z/H < 1$), a energia cinética tende a diminuir, especialmente no interior da edificação, devido à redução da velocidade causada pela resistência do atrito com as paredes internas.

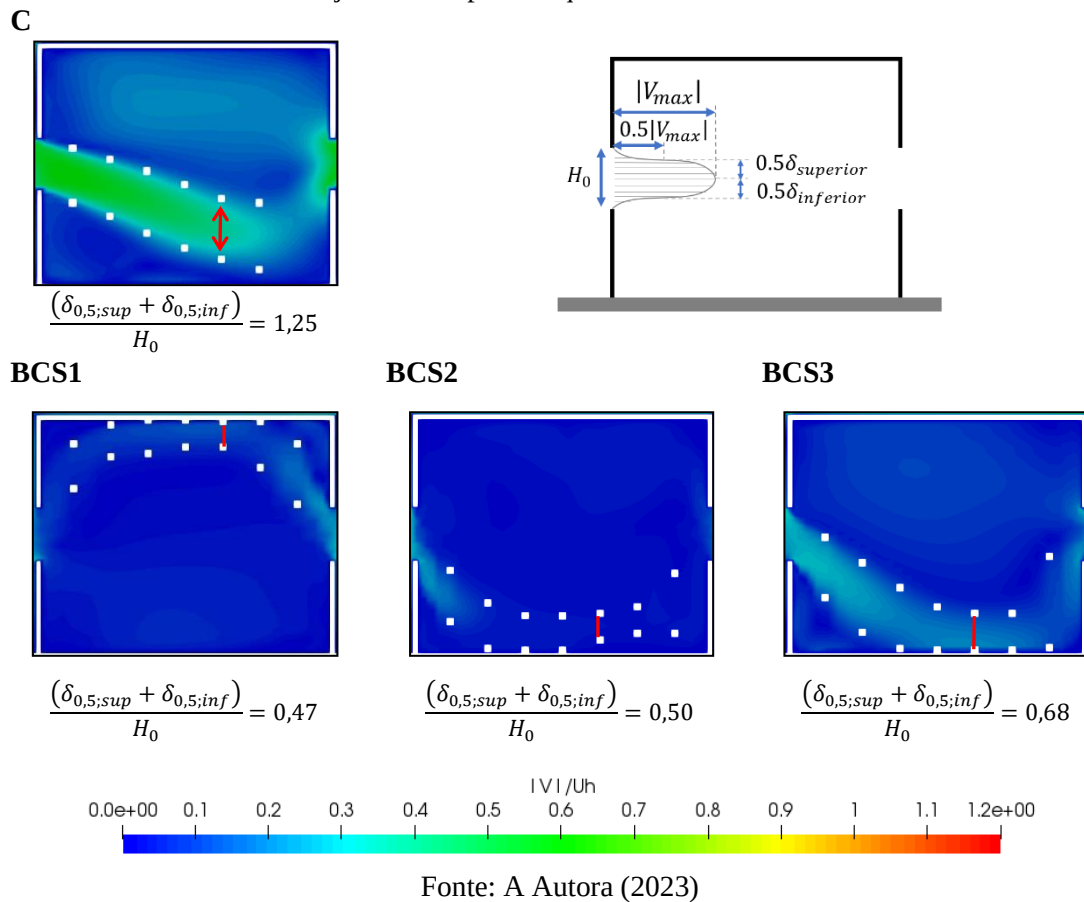
Gráfico 21 – Energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2) em perfis verticais posicionados nos cânions a montante (i), jusante (iii) e no eixo central da edificação (ii), variando a distância da vizinhança



Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 33, são apresentadas a distribuição da velocidade média adimensionalizada ($|V|/U_h$) e a localização da largura do jato para os três modelos BCS, além de sua comparação com o modelo de edificação isolada C.

Figura 33 – Distribuição da velocidade média adimensional ($|V|/U_h$) e localização da largura do jato obtida para os quatro casos estudados

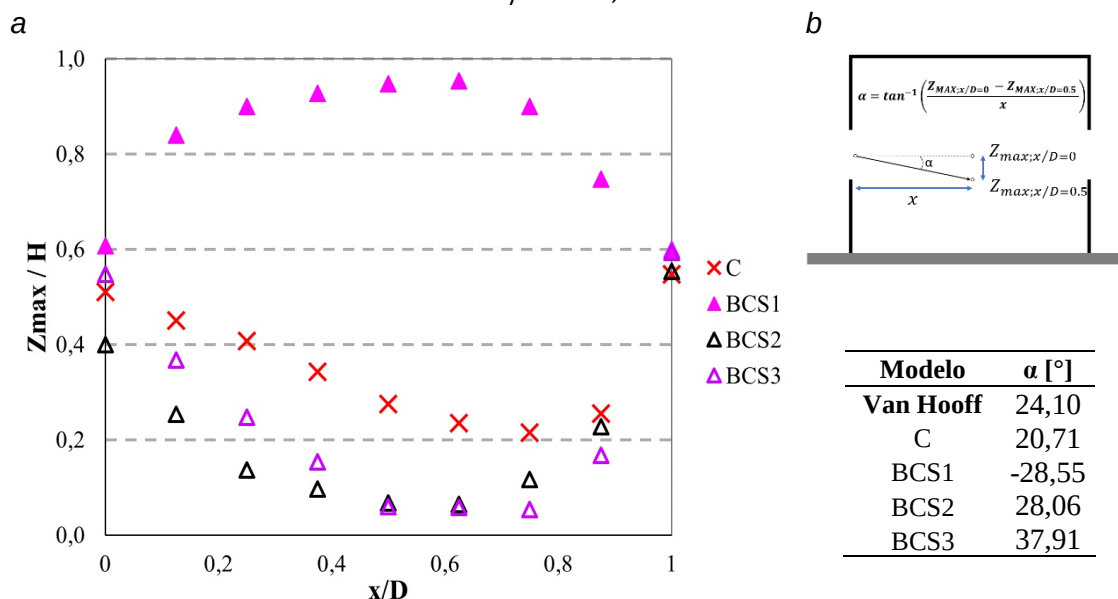


Existe uma importante variação na trajetória do jato simulada tanto em duas dimensões quanto em três dimensões, seja o modelo isolado ou os modelos BCS. No caso do modelo C, o jato passa de uma trajetória quase horizontal (2D) para uma trajetória descendente (3D). O espalhamento do jato calculado, $(\delta_{0,5;superior} + \delta_{0,5;inferior})/H_0$, é de 1,25 para o caso isolado, apresentando uma diferença relativa de 4% em relação ao estudo realizado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017).

A partir da analogia com os resultados obtidos com os modelos BCS em 2D e 3D, é possível observar a redução do espalhamento do jato nos modelos 3D, sendo amortecido em aproximadamente 50% em relação ao 2D. No caso do modelo BCS1, é possível observar uma trajetória do escoamento similar à apresentada para o caso 2D, onde o jato entra pela abertura posterior e segue em direção ao teto. Já nos modelos BCS2 e BCS3, a trajetória ocorre de forma distinta ao observado em 2D. Além disso, esses modelos apresentam um jato mais inclinado em direção ao solo, aproximando o caso BCS3 da trajetória observada no modelo isolado (C).

Na Figura 34, observa-se a trajetória do jato, com base na velocidade de sua linha central e do ângulo formado. Os símbolos representam a localização vertical da velocidade máxima do jato local ao longo de sete linhas verticais no interior da edificação com aberturas.

Figura 34 – (a) Posição vertical (Z_{MAX}/H) da velocidade máxima ($|V|_{MAX}$) ao longo da edificação e (b) ângulo do jato na abertura de entrada baseado em $|V|_{MAX}$ em $x/D = 0$ e $x/D = 0,5$

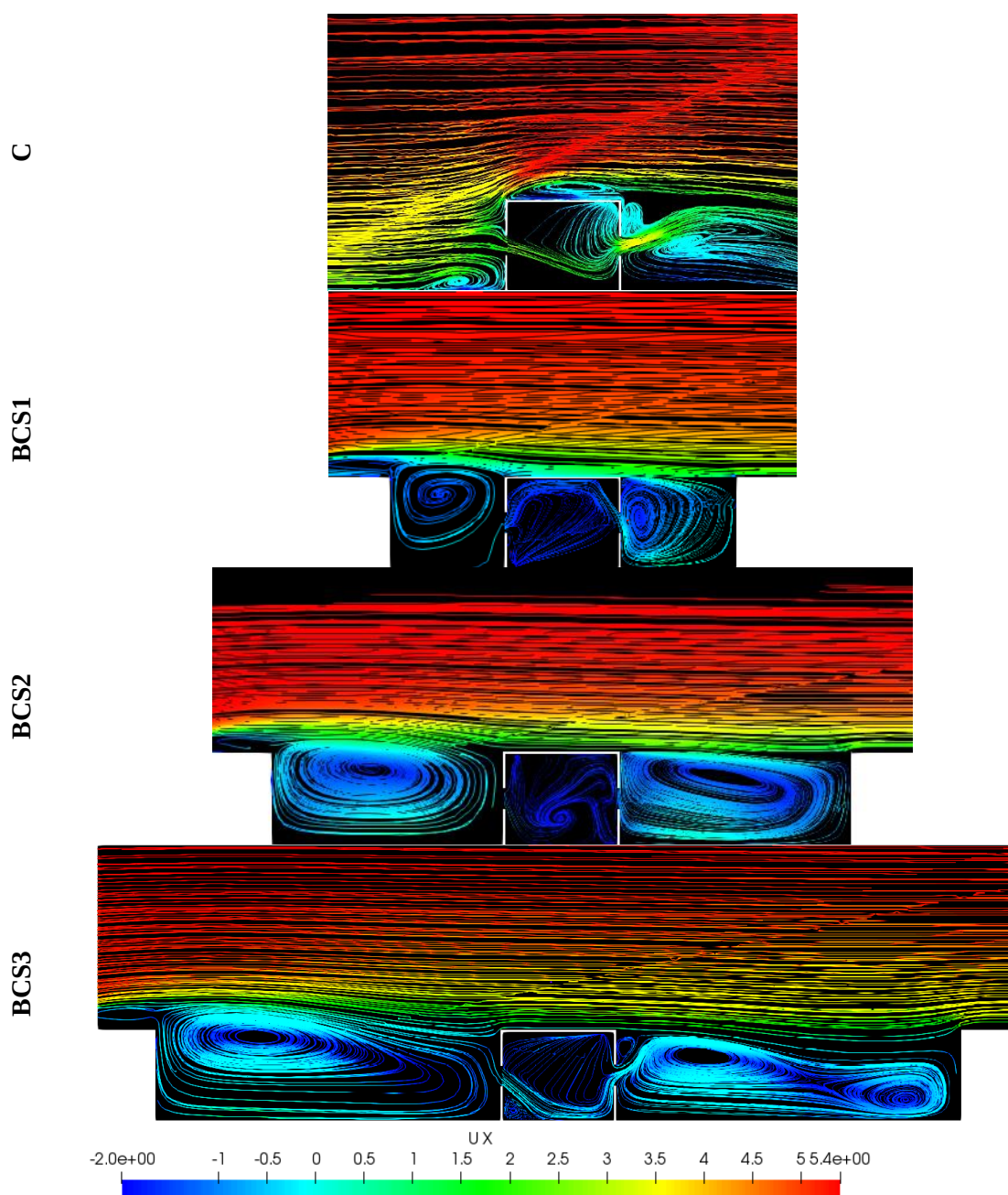


Fonte: A Autora (2023)

Observa-se que a posição vertical da velocidade máxima nos modelos BCS varia em relação ao espaçamento entre as edificações. A posição se alterna da parte superior próxima ao teto da edificação no caso BCS1 para a região inferior, próxima do solo, nos modelos BCS2 e BCS3. Na Figura 34.b, mostra-se o ângulo do jato na abertura de entrada α . Nos modelos BCS, o ângulo do jato varia entre $-28,55^\circ$ e $37,91^\circ$, onde o caso BCS1 apresenta um ângulo do jato negativo, ou seja, uma direção ascendente do jato com relação à abertura frontal. No caso do modelo de edificação isolada (C), foi calculado um ângulo de inclinação do jato correspondente a $20,7^\circ$, que representa uma diferença relativa de 14% em relação ao mesmo modelo de fechamento empregado por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017).

As linhas de corrente e a distribuição da velocidade na direção x são apresentadas na Figura 35 para análise do escoamento no plano de simetria xz dos modelos simulados tridimensionalmente.

Figura 35 – Linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x)



Fonte: A Autora (2023)

Comparando as linhas de corrente do modelo BCS1 com o modelo simulado por Shirzadi, Tominaga e Mirzaei (2020), é possível observar uma boa concordância, como a presença de um vórtice de recirculação sobre a fachada a barlavento, além do sentido do escoamento dentro da unidade habitacional. O escoamento entra pela abertura posterior com sentido ascendente em direção ao teto e sai pela abertura posterior.

Na Tabela 8, apresentam-se os valores das vazões volumétricas calculadas para o modelo isolado, comparando-as com o estudo numérico realizado por Van Hooff,

Blocken e Tominaga (2017) e aos valores obtidos experimentalmente por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011).

Tabela 8 – Vazão adimensionalizada, modelo de edificação isolada

Modelo	$\frac{Q}{u_H A_{abertura}}$	Desvio (%)
EXP. Karava (2011)	0,5	-
NUM. Van Hoof SST k-ω SST (2017)	0,516	3,2%
C	0,458	8,4%

Fonte: A Autora (2023)

Na Tabela 9, são apresentados os valores adimensionalizados das vazões volumétricas calculadas para os modelos de edificações em série. Estes são comparados com o caso estudado por Shirzadi, Mirzaei e Tominaga (2020), onde se simula um modelo de edificação com abertura em faces opostas cercado por oito edifícios semelhantes sem abertura, espaçados a uma proporção de $1L$, empregando o modelo de fechamento $k - \omega$ SST. Também são apresentados os dados experimentais utilizados para esta configuração de nove edificações (Shirzadi; Tominaga; Mirzaei, 2020b).

Tabela 9 – Vazão adimensionalizada, modelo de edificação em série

Modelo	$\frac{Q}{u_H A_{abertura}}$	Desvio (%)
EXP. Shirzadi (2020b)	0,120	-
NUM. Shirzadi k-ω SST (2020)	-0,150	3,0%
BCS1	-0,188	6,8%
BCS2	0,119	-
BCS3	0,216	-

Fonte: A Autora (2023)

A partir da comparação dos dados de vazão adimensionalizada para os modelos com edificação em série, nota-se que, assim como na simulação realizada por Shirzadi, Tominaga e Mirzaei (2020), o caso com mesmo espaçamento entre as edificações (BCS1) no presente estudo numérico apresenta um valor negativo de vazão. Segundo o autor, esse comportamento está relacionado ao modelo de fechamento empregado ($k - \omega$ SST), que subestima significativamente o coeficiente de pressão sobre a fachada de barlavento, resultando em um escoamento reverso no interior da edificação e uma taxa de escoamento cruzado totalmente imprecisa.

O desvio calculado na Tabela 9 está relacionado aos dados experimentais estudados por Shirzadi, Tominaga e Mirzaei (2020b). Observa-se que os resultados numéricos obtidos por Shirzadi, Tominaga e Mirzaei (2020) apresentam um desvio de 3%, enquanto que o presente estudo, com um espaçamento igual entre as edificações, apresenta um desvio de 6,8%. Essa variação se deve ao fato de o presente estudo não possuir exatamente a mesma configuração utilizada pelos autores, que empregaram um conjunto com nove edificações, enquanto neste estudo foram utilizadas apenas três edificações em série.

Para os modelos BCS2 e BCS3, observa-se que a vazão se torna positiva, conforme o sentido do escoamento previamente mencionado. O modelo com um espaçamento de $2L$ se aproximou significativamente da vazão observada no caso experimental com $1L$. O modelo BCS3 apresentou a maior vazão adimensionalizada calculada entre os modelos deste estudo.

A distribuição do coeficiente de pressão no plano de simetria xz do domínio é apresentada na Figura 36 para os modelos BCS e C. Conforme mencionado anteriormente e observado por Shirzadi, Tominaga e Mirzaei (2020), existe uma região de alta pressão sobre a fachada a barlavento e uma região de baixa pressão (negativa) devido à separação do escoamento. Essa região de baixa pressão se estende além da edificação com aberturas no caso BCS1, causando o escoamento reverso. Essa característica não é observada nos modelos BCS2 ou BCS3.

Figura 36 – Distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação no plano xz

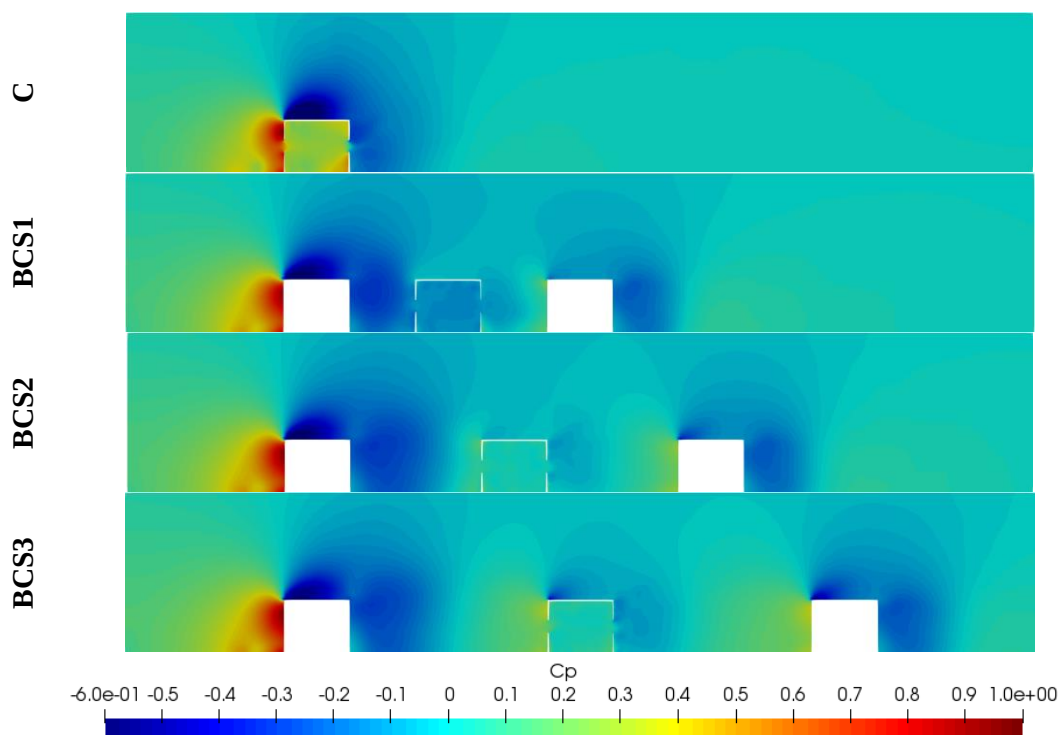
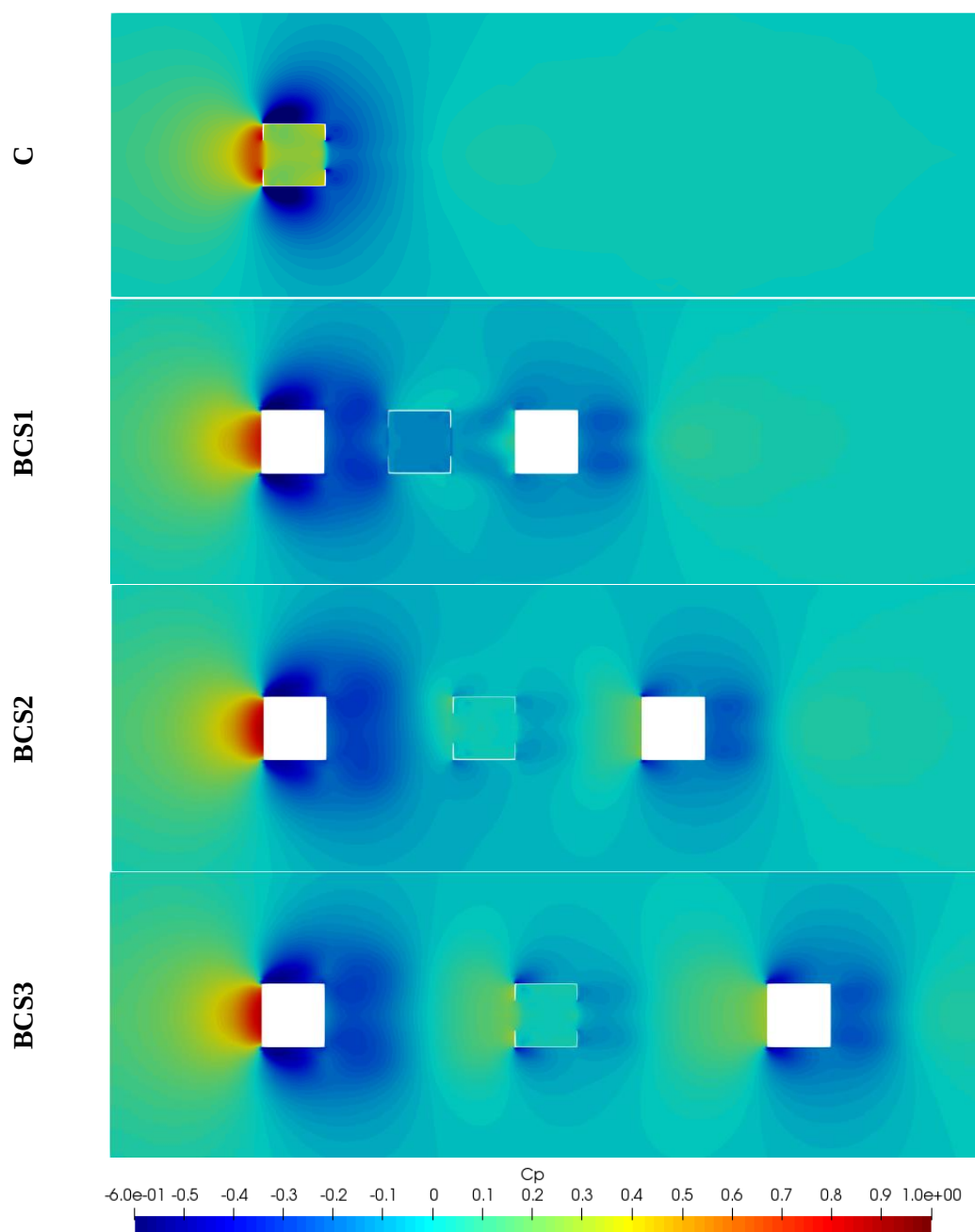


Figura: A Autora (2023)

Na Figura 37, mostra-se a distribuição do coeficiente de pressão médio no plano horizontal xy localizado no centro da abertura ($z/H = 0,5$). No interior da edificação, percebe-se que o modelo C apresenta um valor significativo de coeficiente de pressão em comparação com os demais casos, devido à inexistência de edificações a montante. Essa diferença de pressão favorece a ventilação natural. Nos modelos com variação de L , observa-se que a distribuição de pressão entre a primeira e a última edificação é semelhante, embora a intensidade seja muito maior na primeira. Em BCS2 e BCS3, percebe-se um aumento na diferença de pressão entre as fachadas da edificação à medida que cresce a distância entre elas. Isso está relacionado ao maior potencial de ventilação cruzada, como indicado pelas vazões apresentadas na Tabela 9.

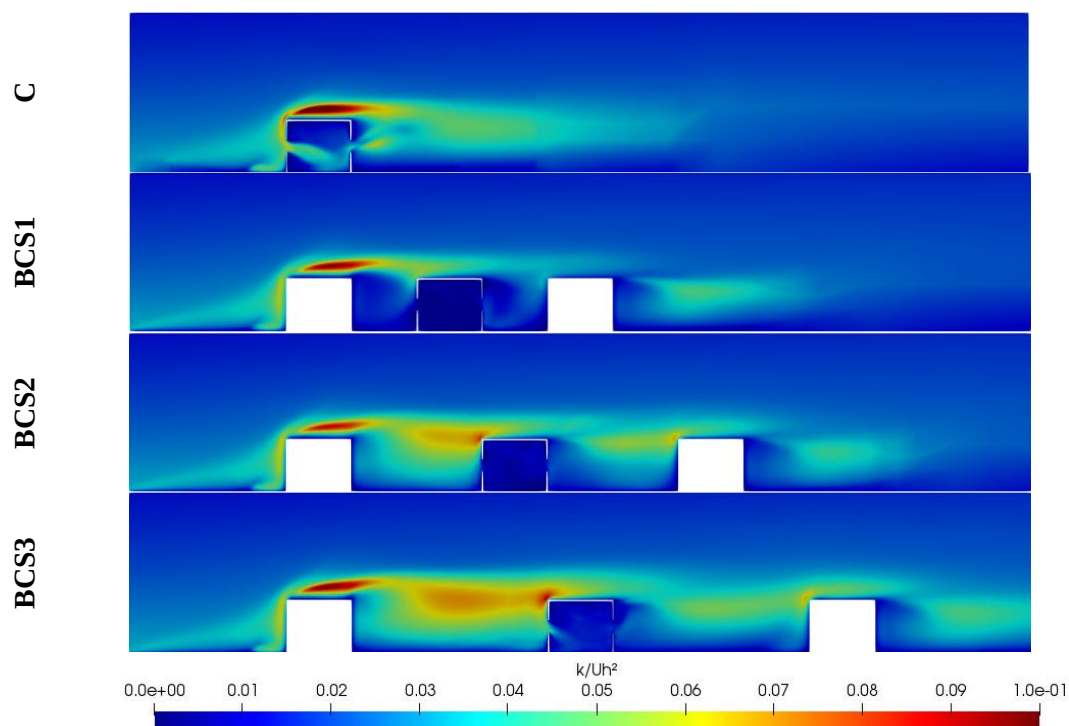
Figura 37 – Distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação no plano xy ($z = 0,5H$)



Fonte: A Autora (2023)

As distribuições da energia cinética turbulenta adimensionalizada no plano de simetria xz e no plano xy ($z = 0,5H$) são apresentadas nas figuras 38 e 39, respectivamente. As zonas de alta energia no telhado originam-se devido à separação do escoamento, apresentando uma área de influência de menor tamanho e intensidade em comparação aos modelos simulados em duas dimensões. As regiões entre cânions nos casos BCS2 e BCS3 mostram zonas de alta energia devido à intensa circulação de ar, associada à turbulência e à formação de vórtices.

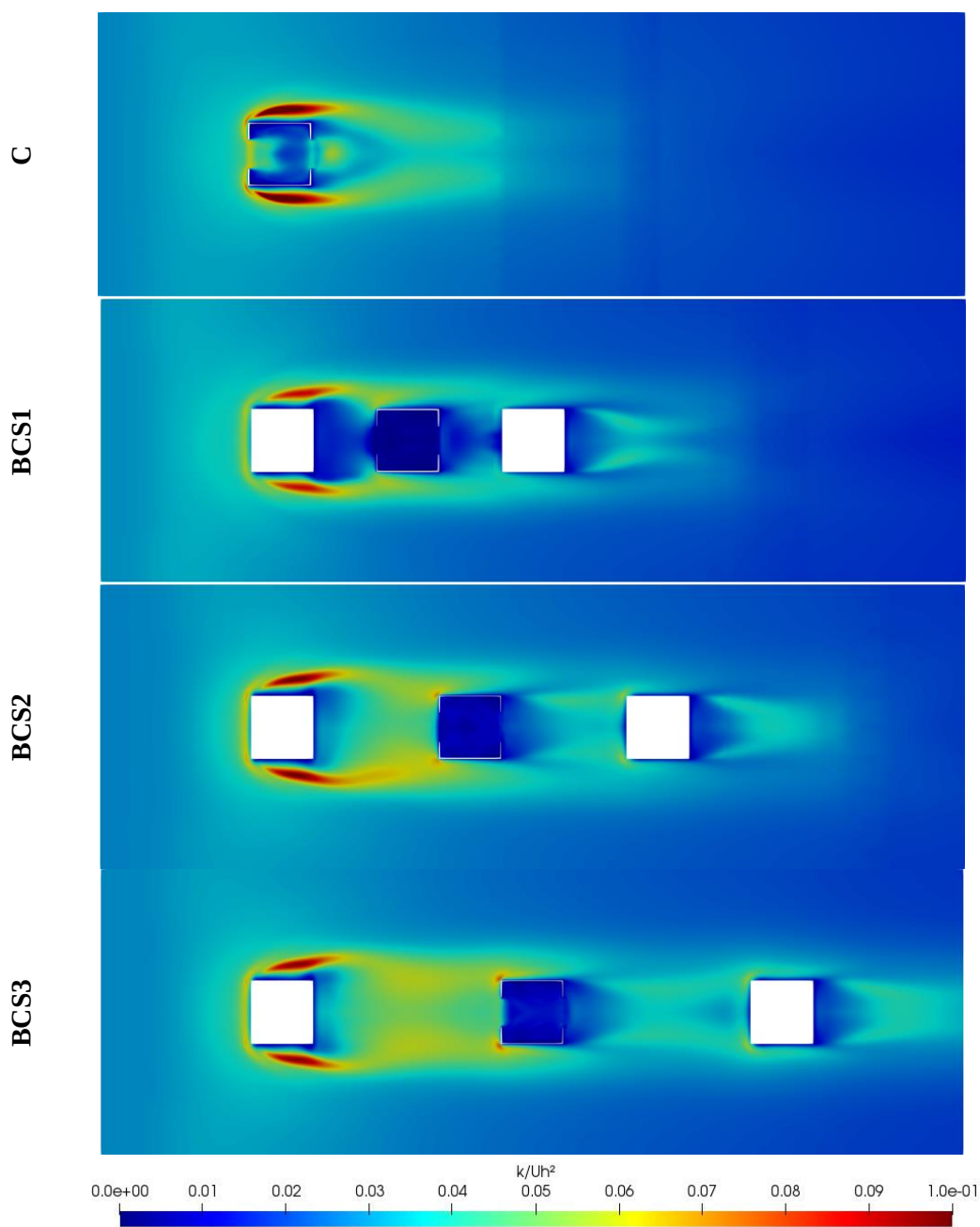
Figura 38 – Distribuição da energia cinética turbulenta adimensionalizada (k/U_h^2) no plano xz



Fonte: A Autora (2023)

No modelo de edificação isolada (C), o jato que entra no interior da edificação possui um alto nível de energia cinética turbulenta adimensionalizada ($k/U_h^2 = 0,06$). Por outro lado, nos modelos com vizinhança, esse parâmetro diminui visivelmente no interior da edificação à medida que a configuração se torna mais densa ($BCS3 > BCS2 > BCS1$), conforme observado por Shirzadi, Mirzaei e Tominaga (2021). Portanto, à medida que a configuração das edificações se torna mais densa, os valores de L diminuem, reduzindo as regiões de circulação de ar e, conseqüentemente, a taxa de energia cinética no interior das edificações e nos cânions formados. Observa-se, no entanto, que dentro da edificação com abertura, a energia cinética é praticamente nula, devido à segunda edificação estar inserida dentro da zona de influência da bolha de separação da primeira edificação.

Figura 39 – Distribuição da energia cinética turbulenta adimensionalizada (k/U_h^2) no plano xy ($z = 0,5H$)

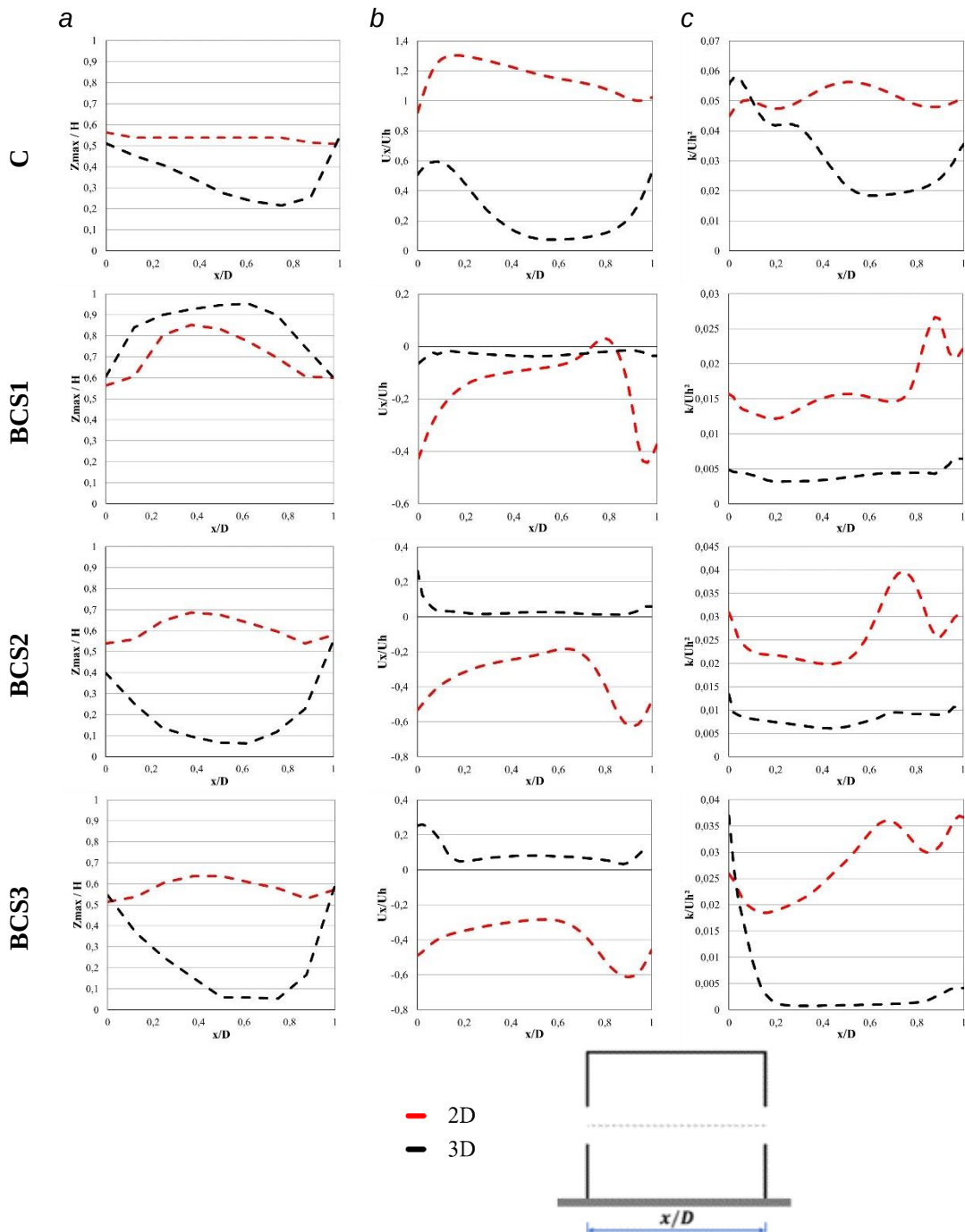


Fonte: A Autora (2023)

6.3 ESTUDO PARAMÉTRICO

No Gráfico 22, observa-se a comparação da trajetória do escoamento dos casos 2D e 3D para diferentes parâmetros analisados no interior da edificação com aberturas.

Gráfico 22 – (a) Posição vertical (Z_{MAX}/H) da velocidade máxima ($|V|_{MAX}$) ao longo da edificação, (b) velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_h) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$) e (c) energia cinética adimensionalizada na direção x (k/U_h^2) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,50$)



Fonte: A Autora (2023)

A posição vertical da velocidade máxima, apresentada no Gráfico 22.a, mostra que o BCS1 é o único modelo que possui concordância entre os casos 2D e 3D, em que a máxima velocidade se direciona a uma posição vertical acima da altura média da abertura ($Z_{MAX}/H > 0,5$). Nos demais modelos (C, BCS2 e BCS3), a máxima velocidade tende a

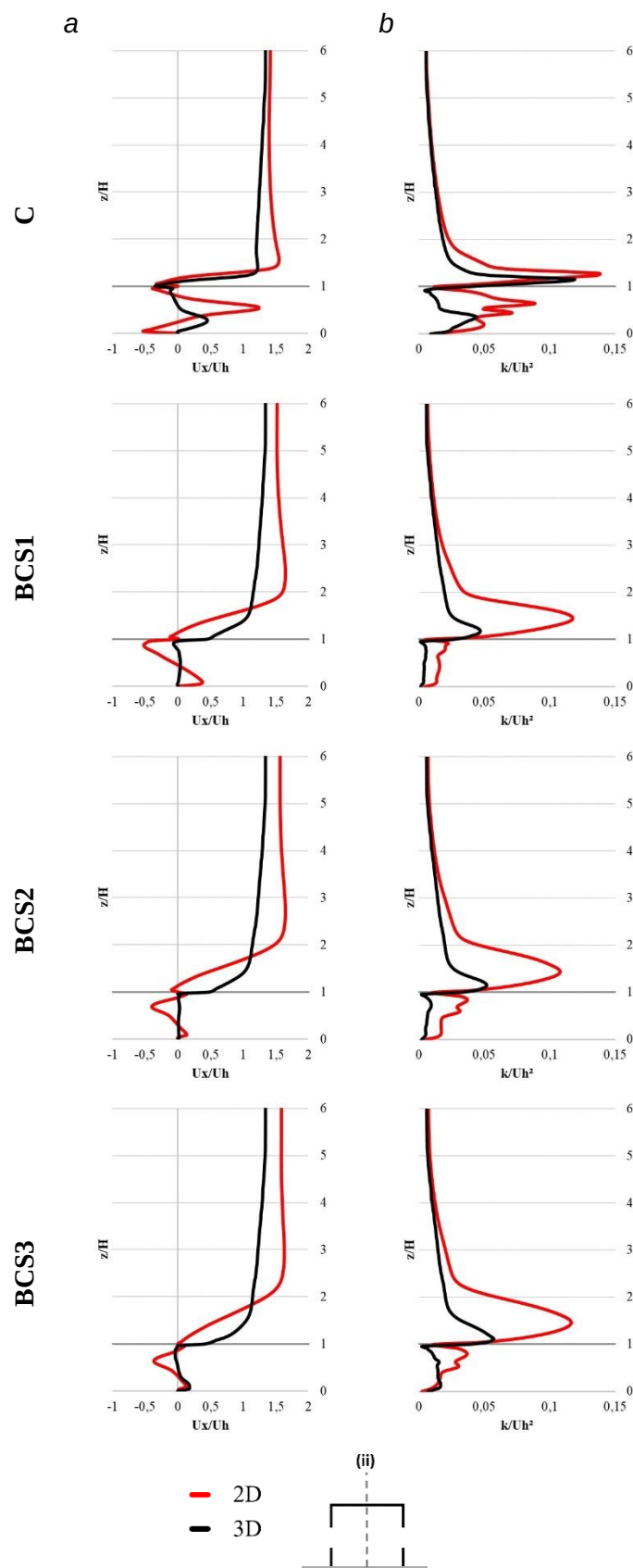
se direcionar ao piso da edificação para o caso 3D ($0 < Z_{MAX}/H < 0,3$), ficando acima da linha média para o modelos com vizinhança do caso 2D ($0,6 < Z_{MAX}/H < 0,7$) e seguindo uma trajetória horizontal para o caso isolado bidimensional ($Z_{MAX}/H \cong 0,65$).

A velocidade adimensionalizada na direção x ao longo de uma linha média entre as duas abertura ($z/H = 0,5$), apresentada no Gráfico 22.b, revela divergências entre os casos 2D e 3D dos modelos estudados. O modelo de edificação isolada (C) alcança os máximos valores de velocidade, sendo superestimado no caso 2D, como já observado anteriormente. Os modelos com vizinhança (BCS) apresentam uma trajetória semelhante para diferentes espaçamentos, onde a velocidade tende a se estabilizar e aumentar à medida que a densidade da área ocupada diminui. Os resultados dos modelos no plano e no espaço mostram que o modelo com espaçamento $1L$ (BCS1) apresenta escoamento similar, com um valor negativo de velocidade que caracteriza o sentido inverso do escoamento. Já os modelos com $2L$ e $3L$ apresentam escoamentos distintos para o caso 2D e 3D.

A energia cinética adimensionalizada também foi comparada para os modelos simulados no plano e no espaço, ao longo de uma linha média entre as duas aberturas da edificação ($z/H = 0,5$), como ilustrado no Gráfico 22.c. Observa-se uma baixa energia cinética no interior da edificação com vizinhança dos modelos tridimensionais ($k/U_h^2 < 0,01$), com exceção do modelo BCS3, que apresenta um pico de energia próximo à abertura de entrada do jato de escoamento, superior ao simulado no caso 2D. A distribuição da energia cinética dos modelos BCS1 e BCS2 varia em uma faixa aproximada de 33% para os casos 2D e 3D, sendo que o caso bidimensional se distingue do tridimensional pelo pico de energia superestimado na abertura posterior por onde o jato de escoamento entra.

No Gráfico 23, apresenta-se uma comparação dos parâmetros de velocidade e energia cinética adimensionalizada em um corte vertical no eixo central da edificação com aberturas ($x/D = 0,5$) em relação aos casos 2D e 3D. Observa-se que tanto o perfil da velocidade média (Gráfico 23.a) quanto o da energia cinética (Gráfico 23.b) no caso 2D apresentam valores em módulo superiores aos do 3D.

Gráfico 23 – Comparação do corte vertical no eixo central da edificação com aberturas em relação aos casos 2D e 3D: (a) velocidade média adimensionalizada (U_x/U_h) e (b) energia cinética adimensionalizada (k/U_h^2)

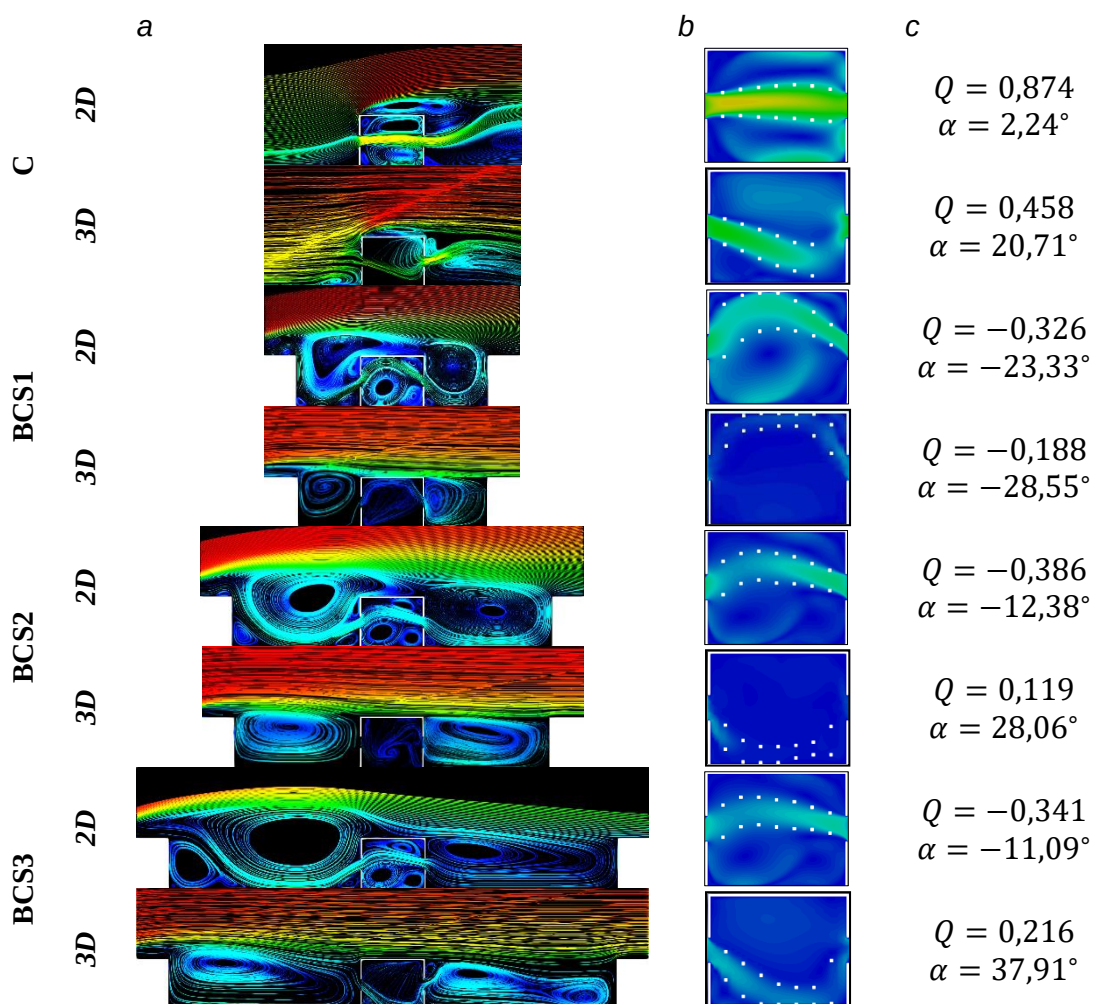


Fonte: A Autora (2023)

Na altura imediatamente acima da edificação ($z/H > 1$), o perfil do modelo isolado é o que mais se assemelha entre os casos 2D e 3D, enquanto os modelos com vizinhança apresentam maior variação em trajetória e nos valores máximos e mínimos de velocidade e energia. No caso BCS 2D, a máxima velocidade tende a se posicionar na região $z/H > 2$, enquanto no 3D, a máxima velocidade fica na região da superfície do teto da edificação. Esse fenômeno está relacionado ao desprendimento da camada limite de cada espaço simulado, pois no caso 2D, observa-se a formação de vórtices entre os cânions a montante que ultrapassam a altura da edificação com abertura, estendendo-se sobre as mesmas. Já no 3D, esses vórtices tendem a permanecer no interior do cânion a montante, resultando em um escoamento rente ao teto da edificação com aberturas, como observado na Figura 40.a.

Para a velocidade média adimensionalizada no interior da edificação com aberturas entre os casos 2D e 3D, apresentada na Figura 40.b, observa-se a variação da trajetória do jato em cada espaço simulado. O modelo BCS1 é o único modelo semelhante com um jato ascendente e ângulo negativo, com vazão relativamente menor para o caso tridimensional devido à baixa velocidade. Os demais modelos com vizinhança (BCS2 e BCS3) apresentam trajetórias distintas, ascendente no 2D e descendente no 3D. As vazões negativas estão relacionadas ao sentido inverso do escoamento em todos os modelos BCS bidimensionais e no modelo BCS1 tridimensional.

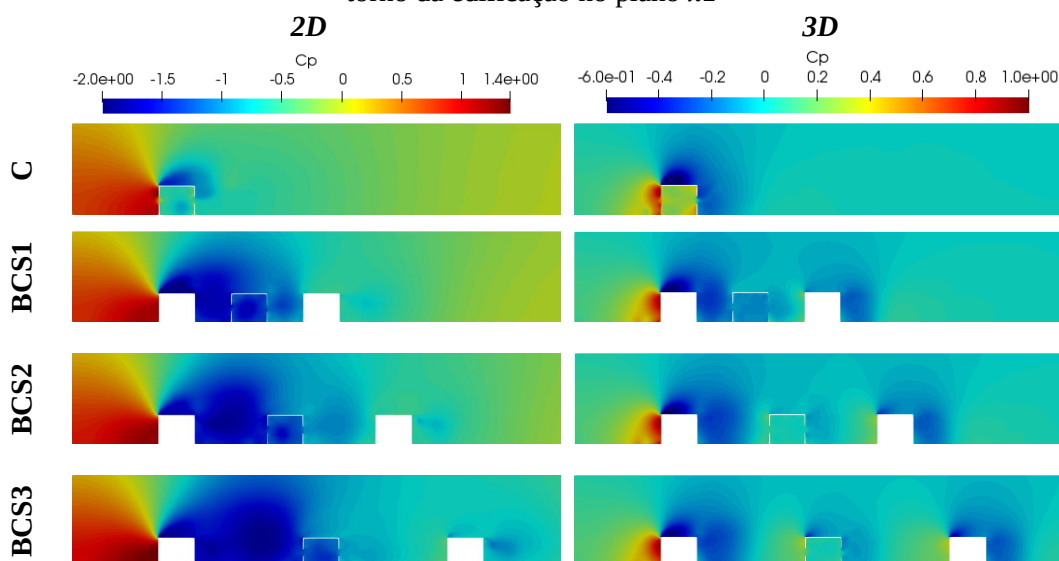
Figura 40 – Comparação dos resultados 2D e 3D: (a) linhas de corrente e distribuição da componente x da velocidade (U_x), (b) jato da velocidade média adimensional ($|V|/U_h$) no interior da edificação com aberturas e (c) valores da vazão adimensionalizada e ângulo do jato na abertura de entrada do escoamento



Fonte: A Autora (2023)

Na comparação da distribuição do coeficiente de pressão entre os casos 2D e 3D no plano xz , apresentada na Figura 41, observa-se uma significativa região de alta pressão na parte frontal da edificação a barlavento dos modelos 2D, em comparação aos modelos 3D, seguida por uma drástica redução após a separação do escoamento na região de esteira, principalmente nos modelos BCS, estendendo-se além dos cânions formados. Esse fenômeno causa o escoamento reverso nos modelos BCS 2D e BCS1 3D. Além disso, observa-se que o modelo de edificação isolada apresenta um valor significativo de coeficiente de pressão devido à diferença de pressão entre as aberturas, o que é fundamental para favorecer a ventilação natural. Pode-se notar que, nos modelos de vizinhança, essa diferença de pressão começa a se tornar mais significativa à medida que se aumenta a distância entre as edificações.

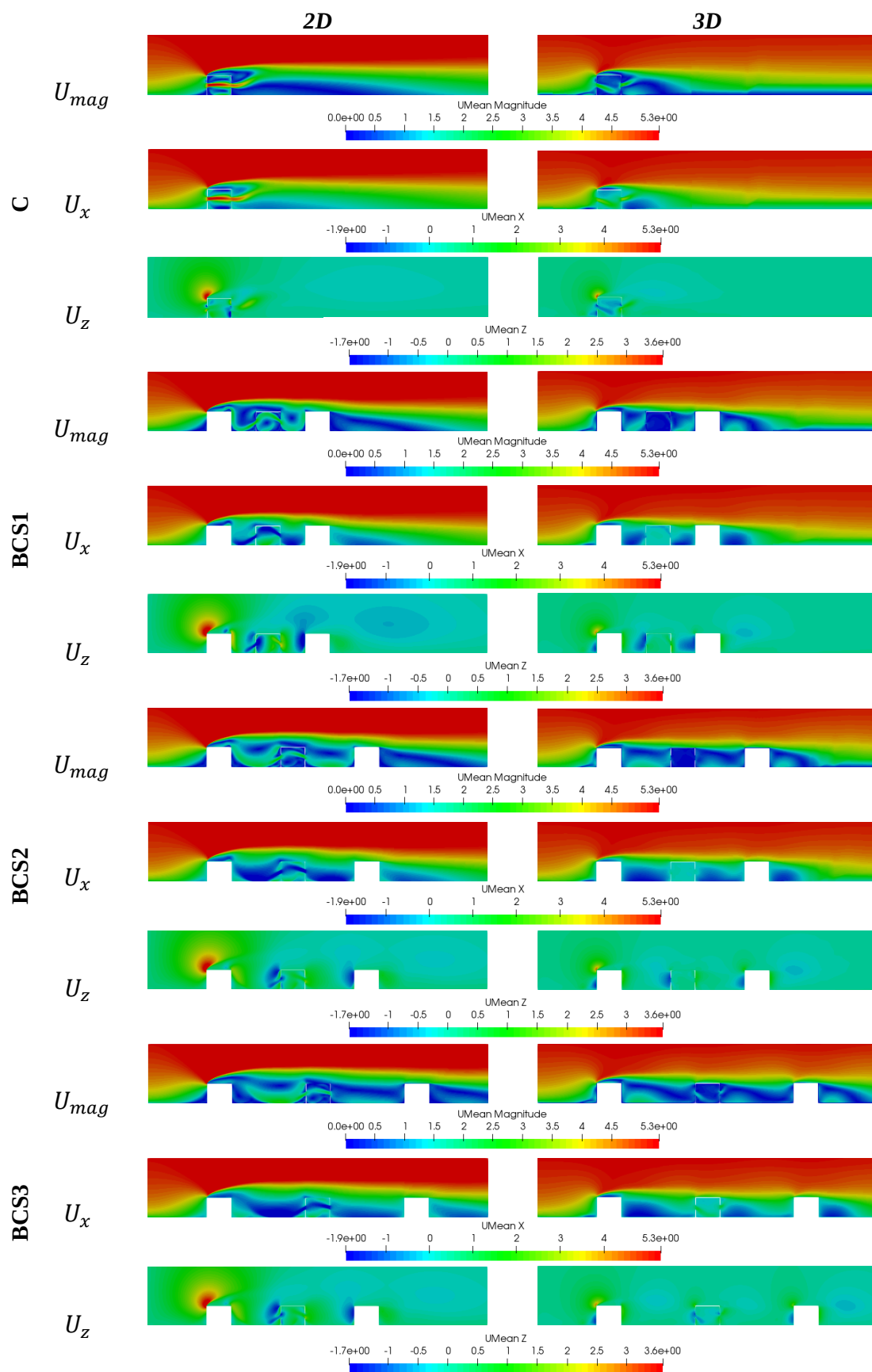
Figura 41 – Comparação dos casos 2D e 3D da distribuição do coeficiente de pressão em torno da edificação no plano xz



Fonte: A Autora (2023)

O perfil de velocidade ao longo do domínio, apresentado na Figura 42, mostra a distribuição da velocidade nas direções x e z , além da magnitude da velocidade, comparando o caso 2D ao 3D. Com base no perfil da magnitude da velocidade (U_{mag}), pode-se observar que os modelos simulados bidimensionalmente apresentam uma maior velocidade de escoamento nos jatos que entram nas aberturas das edificações e nos vórtices formados nas regiões dos cânions de ruas, assim como na esteira. No perfil de velocidade na direção x (U_x), observa-se a direção predominante do escoamento, onde o jato escoava com sentido positivo entre as aberturas da edificação nos modelos isolados (2D e 3D) e nos modelos BCS2 e BCS3 do caso 3D, enquanto escoava com sentido negativo para ambos os casos BCS 2D e BCS1 3D. O perfil de velocidade na direção z (U_z) evidencia a variação de velocidade com a altura, onde observam-se as zonas de separação da camada limite próximas às superfícies sólidas, destacadas nas regiões superiores da fachada a barlavento de cada modelo e significativamente mais intensas nos casos 2D.

Figura 42 – Comparação dos casos 2D e 3D do perfil de velocidade (U_{mag} , U_x , U_z)



Fonte: A Autora (2023)

Ainda, foram analisados os tempos de processamento entre os modelos simulados no espaço bidimensional e tridimensional, conforme apresentado na Tabela 10. Pode-se observar que os modelos 3D demandaram, no mínimo, quinze vezes mais tempo de processamento do que o necessário para simular o mesmo modelo em 2D. Apesar de as simulações 2D demandarem menos tempo, deve-se levar em conta a falta de adequação do modelo 2D para o escoamento, devido à sua modelagem simplificada e à consideração do escoamento em apenas duas dimensões. Além disso, o tempo de processamento pode variar dependendo da complexidade do modelo, resolução da malha, *software* empregado e máquina utilizada nas simulações.

Tabela 10 – Tempo de processamento dos casos estudados

Modelo	Tempo de processamento (h)	
	2D	3D
C	1,2	17,9
BCS1	1,3	22,3
BCS2	1,6	27,1
BCS3	2,1	36,8

Fonte: A Autora (2023)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, com o objetivo de avaliar a influência da ventilação natural cruzada em edificações, foram realizadas simulações numéricas com modelos bidimensionais e tridimensionais de um conjunto de edificações em série. Para isso, foi empregado o *software* livre de código aberto OpenFOAM, aplicando o modelo de turbulência RANS com fechamento $k - \omega$ SST.

Para aferir a acurácia e o desempenho do *software* e do modelo de turbulência utilizado, realizou-se a validação dos modelos com dados experimentais e numéricos de outros autores. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade de malha considerando o índice GCI e métricas de validação.

Inicialmente, a simulação de ventilação natural foi realizada em dez modelos 2D de edificação com o objetivo de avaliar o comportamento do escoamento nas edificações com aberturas variando em posição entre cada modelo. Os modelos 2D foram compostos por:

- Um modelo de edificação isolada com aberturas (C);
- Três modelos em série compostas com edificações com aberturas e edificações sem aberturas a sotavento (CS);
- Três modelos em série compostas com edificações sem abertura a barlavento e edificações com aberturas (BC);
- Três modelos em série compostas com edificações sem aberturas a barlavento e a sotavento intercaladas com edificações com abertura (BCS);

Os três diferentes casos de edificações em série (CS, BC e BCS) variaram em três unidades de espaçamento ($L = 1, 2$ e 3).

Posteriormente, o modelo isolado C e os modelos em série BCS, com suas três configurações de espaçamento, foram simulados no espaço 3D. Em ambos os casos, foram analisados os perfis e distribuições de velocidade e energia cinética, além da obtenção dos valores de vazão nas aberturas, coeficiente de pressão, linhas de corrente, trajetória, espalhamento e ângulo do jato.

Os modelos simulados podem ser divididos em dois grupos: aqueles em que a edificação com aberturas fica a barlavento (C e CS) e aqueles em que há uma barreira que a antecede (BCS e BC), onde C representa a edificação com aberturas. No primeiro grupo, há pouca variação da distribuição de velocidade e energia cinética em função do

aumento do espaçamento entre as edificações. Já no segundo grupo, essa característica tem significativa influência no máximo valor do parâmetro e na sua posição.

Devido à simplificada modelagem 2D em comparação com a modelagem 3D, algumas limitações na representação da ventilação natural são observadas, resultando em subestimação de parâmetros como velocidade e energia cinética. Entre os resultados obtidos, destacam-se:

- Maiores velocidades no interior da edificação 2D, com a posição vertical da velocidade máxima localizada em regiões significativamente mais elevadas do que observado em 3D.
- O jato é sempre ascendente com escoamento invertido para os modelos em série 2D e BCS1 3D, e descendente com o jato entrando na abertura frontal para os modelos 3D C, BCS2 e BC3.
- Nos modelos 2D, observa-se uma região de alta pressão na parte frontal da edificação a barlavento e uma drástica redução na região de esteira, que se estende além dos cânions de ruas formados, causando a inversão do sentido do jato nos modelos em série e, consequentemente, resultando em maiores valores de velocidade e vazão devido à diferença significativa de pressão.
- Nos modelos 3D, a pressão negativa na região de esteira da separação do escoamento só alcança a edificação ventilada do modelo BCS1, sendo esse o único modelo com escoamento invertido dentre os modelos tridimensionais simulados.
- Parâmetros como vazão e largura do jato seguem a mesma proporção em relação ao espaçamento dos modelos 2D e 3D, aumentando à medida que os modelos em série se tornam menos densos, com maior espaçamento.
- O modelo de edificação isolada tridimensional (C) apresenta resultados similares aos obtidos nas simulações realizadas por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) com uma diferença relativa de 14% em relação ao ângulo de inclinação do jato e 11% em relação ao valor da vazão, mesmo empregando apenas 14% do nível de refinamento utilizado pelos autores. Isso evidencia a eficácia da simulação, do modelo de turbulência e do *software* empregado.

No entanto, em todos os casos, é possível identificar a influência da configuração e distanciamento da vizinhança em relação ao aumento da ventilação natural em

edificações, afetando o padrão do escoamento e a distribuição da velocidade. Nesse sentido, o aumento da distância entre as edificações favorece a ventilação natural.

Apesar de suas limitações, o uso do espaço bidimensional é uma estratégia viável para realizar um estudo prévio dos fenômenos da ventilação natural e compreender o comportamento do escoamento de ar em diferentes configurações de modelos com geometria relativamente simples. Em casos em que a dimensão transversal pode não ser um fator crítico para os parâmetros de interesse, a modelagem 2D pode ser suficiente para obter resultados significativos, como é o caso de galpões industriais, nos quais a dimensão longitudinal é muito maior em comparação com as dimensões da seção na direção do escoamento.

A escolha do espaço para simulação deve ser orientada pelas necessidades e complexidade do modelo, equilibrando a precisão desejada com o tempo disponível para realizar as simulações. Geralmente, modelos 2D são empregados em estudos introdutórios para uma rápida avaliação de diferentes cenários, devido à sua modelagem simplificada e ao processo de execução rápido. No entanto, é importante considerar e interpretar corretamente as limitações inerentes a esse tipo de abordagem.

Por outro lado, embora as simulações com modelagem 3D sejam mais precisas, elas demandam mais tempo de processamento, que pode variar de acordo com a complexidade do modelo, a resolução da malha, a capacidade do *hardware* e o *software* de simulação utilizado. Nesse caso, podem ser aplicadas técnicas de otimização da resolução da malha e o uso de recursos de computação paralela para reduzir esse tempo de processamento.

Por fim, com base na validação realizada, comparando os resultados obtidos no presente estudo numérico com os resultados de outros autores, tanto numéricos quanto experimentais, foi possível constatar a eficácia do *software* OpenFOAM e do modelo de turbulência utilizado. Esses resultados comprovam que o OpenFOAM é uma excelente ferramenta para o estudo da ventilação natural em edificações.

Dentre as dificuldades enfrentadas com a ferramenta, destaca-se o tempo necessário para aprender a manipulá-la a partir de um contato inicial nunca antes realizado. A complexidade da configuração inicial do caso, especialmente para iniciantes, bem como a disponibilidade de documentações e manuais com especificações limitadas, torna a solução de problemas mais desafiadora. No entanto, as comunidades virtuais de usuários do *software* produzem e disponibilizam tutoriais, além de criar fóruns de discussão, o que ajuda a minimizar as desvantagens associadas ao uso do OpenFOAM.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas questões permanecem e devem ser melhoradas em trabalhos futuros. Recomenda-se explorar o uso de diferentes modelos de fechamento, como o RLZ (*Realizable $k - \epsilon$*), RNG (*Renormalization Group $k - \epsilon$*), SA (*Spalart-Allmaras*) e outros. Além disso, é indicado empregar técnicas de simulações mais avançadas, como a Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulations*) e os modelos híbridos RANS/LES (DES – *Detached-eddy simulation*).

Investigar diferentes posições e dimensões das aberturas na edificação ventilada, realizando simulações tridimensionais com um conjunto de oito edificações vizinhas cercando a edificação ventilada, a fim de avaliar como o espaçamento entre a vizinhança influencia o escoamento de ar. Pode-se ainda avaliar a distribuição de calor e espécies químicas no interior e ao redor das edificações, simulando configurações tipicamente encontradas em meios urbanos.

Realizar um estudo investigativo de modelos em que se torna possível uma análise 2D, como no caso de galpões com cânions de grande extensão transversal ao escoamento, envolvendo a caracterizando do domínio e da geometria capaz de fornecer resultados com boa acurácia e de rápida execução.

Essas abordagens contribuirão para aprimorar a compreensão dos fenômenos da ventilação natural em edificações e no meio urbano.

REFERÊNCIAS

- ABDEEN, A. *et al.* Solar chimney optimization for enhancing thermal comfort in Egypt: An experimental and numerical study. **Solar Energy**, v. 180, p. 524-536, 2019.
- AL-AGHBARI, O. H. *et al.* Study on the Impact of Sawtooth Roof Inclination Angles and Asymmetrical Opening Positions for An Isolated Building in Cross Ventilation. **Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering**, v. 16, n. 5, 2022.
- ALBERTI, F. A. **Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: Contribuição para a revisão de fatores de vizinhança da NBR-6123**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 124p., 2015.
- AMARAL, D.; ASSIS, E. S. Impacto da variação de altura de edificações em modelos urbanos teóricos para estudos de ventilação natural em edificações residenciais. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 3, n. 10, 2020.
- ARCHDAILY. **Ampliação da Escola Primária de Gando**. Kéré Architecture. ArchDaily Brasil, 2016. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/787376/anexo-da-escola-primaria-de-gando-kere-architecture>> ISSN 0719-890. Acesso em: 28 jul. 2022.
- ARENS, Edward *et al.* A study of occupant cooling by personally controlled air movement. **Energy and buildings**, v. 27, n. 1, p. 45-59, 1998.
- ARGYROPOULOS, C. D.; MARKATOS, N. C. Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. **Applied Mathematical Modelling**, v. 39, n. 2, p. 693-732, 2015.
- ASFOUR, O. S.; GADI, M. B. A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and environment**, v. 42, n. 12, p. 4079-4085, 2007.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2013**, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **ABNT NBR-15220-3**. Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- AWBI, H. B. Application of computational fluid dynamics in room ventilation. **Building and environment**, v. 24, n. 1, p. 73-84, 1989.
- AYDIN, Y. C.; MIRZAEI, P. A. Wind-driven ventilation improvement with plan typology alteration: A CFD case study of traditional Turkish architecture. In: **Building Simulation**. Tsinghua University Press, p. 239-254, 2017.

BALOGH, M.; PARENTE, A.; BENOCCI, C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 104, p. 360-368, 2012.

BARRADAS, A. C. M. **Avaliação do desempenho do OpenFOAM em estudos de ventilação natural**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

BAZDIDI-TEHRANI, F.; MASOUMI-VERKI, S.; GHOLAMALIPOUR, P. Impact of opening shape on airflow and pollutant dispersion in a wind-driven cross-ventilated model building: Large eddy simulation. **Sustainable Cities and Society**, v. 61, p. 102196, 2020.

BEVILAQUA, C. P. *et al.* Análise da ventilação natural: simulações CFD e ensaios em um modelo físico reduzido. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019022-e019022, 2019.

BIANCHIN, G. P. **Análise numérica da ventilação e mitigação de cargas aerodinâmicas em edificações baixas usando spoilers com controle PID**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 170p., 2021.

BLESSMANN, J. **Ação do vento em edifícios**. 2. ed. 81 p. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989.

BLOCKEN, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. **Building and Environment**, v. 91, p. 219-245, 2015.

CARPEGGIANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CAVALCANTE, M. C. A. D. C. **Influência da geometria da edificação na aerodinâmica de sistemas eólicos integrados utilizando OpenFoam**. 2019. 133p. Dissertação (Mestrado) – Universidade federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

CEBECI, T; BRADSHAW, P. Momentum Transfer in Boundary Layers. **Hemisphere Publishing Corporation**, 1977.

CELIK, I. B. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, 2008.

CHEN, Q. Ventilation performance **prediction for buildings: A method overview and recent applications**. **Building and environment**, v. 44, n. 4, p. 848-858, 2009.

CHENG, W. C.; LIU, C. Large-eddy simulation of flow and pollutant transports in and above two-dimensional idealized street canyons. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 139, n. 3, p. 411-437, 2011.

CHOW, W. K. Application of computational fluid dynamics in building services engineering. **Building and Environment**, v. 31, n. 5, p. 425-436, 1996.

COCHRAN, L.; DERICKSON, R. Low-rise Buildings and Architectural Aerodynamics. **Architectural Science Review**, v. 48, n. 3, p. 265-276, 2005.

COSTA, R. L. *et al.* Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, p. 100254, 2020.

DA SILVA, P. J. A.; FREIRE, E. R. C. G. Simulação computacional do escoamento em degrau por volumes finitos utilizando o OpenFOAM. **Revista de Matemática**, v. 1, 2020.

DALLASTRA, M. *et al.* Caracterização da ventilação natural em Tangará da Serra/MT, Brasil sob o viés da construção civil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 3, p. 198-209, 2020.

DAMA, A.; ANGELI, D.; LARSEN, O. K. Naturally ventilated double-skin façade in modeling and experiments. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 17-29, 2017.

DE DEAR, Richard J. *et al.* Developing an adaptive model of thermal comfort and preference/discussion. **ASHRAE transactions**, v. 104, p. 145, 1998.

DE DEAR, Richard J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-561, 2002.

DE QUADROS, B. M.; ORDENES, M. O Impacto de Brises na Ventilação Natural: Avaliação Integrada em uma Enfermaria em Florianópolis (SC). Paranoá: **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, v. 19, 2017.

DICK, J. B. The Fundamentals of Natural Ventilation of Houses. **Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers**, v. 18, n. 179, p. 123-34, 1950.

EFTHIMIOU, G., SANTIAGO, J., & MARTILLI, A. **COST 732 in practice: The MUST model evaluation exercise**, 2011.

EMBRAPA. **Barragem subterrânea: acesso e usos múltiplos da água no Semiárido brasileiro**. Recife, PE: ASA Brasil, 2021. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1138379>>. Acesso em 15 de jun. 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa energética. **Nota Técnica DEA 13/15**. Demanda de energia 2050. Ministério de Minas e Energia. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019 Ano base 2018**. Ministério de Minas e Energia. EPE: Rio de Janeiro, 2019.

_____. **Nota Técnica EPE 030/2018**. Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Ministério de Minas e Energia. EPE: Rio de Janeiro, 2018.

ESPATH, L. F. R. *et al.* Two-and three-dimensional direct numerical simulation of particle-laden gravity currents. **Computers & geosciences**, v. 63, p. 9-16, 2014.

ETHERIDGE, D. **Natural ventilation of buildings: theory, measurement and design**.

1ed. Department of Architecture and Built Environment, University of Nottingham. Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, 2012.

FERNANDES, T. F. D. D.; MOREIRA, N. L. Uma interface de controle para a Fluidodinâmica Computacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, p. 01-11, 2019.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3rd ed. Rev. Berlin: Springer, 2002.

FRANKE, J. *et al.* Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. Reino Unido: **COST Office**, 2007.

FREIRE, A. P. S.; MENUT, P. P. P.; SU, J. Turbulência In: **Anais da I escola de Primavera em transição e turbulência**. Anais. Rio de Janeiro: ABCM. p. 292, 2002.

GÄRTNER, J. W.; KRONENBURG, A.; MARTIN, T. Efficient WENO library for OpenFOAM. **SoftwareX**, v. 12, p. 100611, 2020.

GONZALEZ, G. M.; SANTOS, A. I. G. Evaluación del confort y discomfort térmico. **Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones**, v. 41, n. 3, p. 21-40, 2020.

HWANG, Y.; GORLÉ, C. Large-eddy simulations of wind-driven cross ventilation, Part1: validation and sensitivity study. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, p. 1-13, 2022.

IEA – International Energy Agency. **Global Energy Review 2021**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>>. Acesso em: 20 de jul. 2022.

_____. **World Energy Outlook 2018**. Disponível em: <<https://www.iea.org/weo2018/>>. Acesso em: 21 jul. 2022.

IMBABI, M. S. Computer validation of scale model tests for building energy simulation. **International Journal of Energy Research**, v. 14, n. 7, p. 727-736, 1990.

IZADYAR, N. *et al.* Impacts of façade openings' geometry on natural ventilation and occupants' perception: a review. **Building and Environment**, v. 170, p. 106613, 2020.

JAKIRLIC, S. **Extended excerpt related to the test case: Flow over a periodical arrangement of 2D hills**. Tech. Rep. ACP8-GA-2009-233710-ATAAC, TU Darmstadt, 2012.

JONES, P. J.; WHITTLE, G. E. Computational fluid dynamics for building air flow prediction – current status and capabilities. **Building and Environment**, v. 27, n. 3, p. 321-338, 1992.

JOOSS, Yannick *et al.* Influence of position and wind direction on the performance of a roof mounted vertical axis wind turbine. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 230, p. 105177, 2022.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. **Building and environment**, v. 46, n.

1, p. 266-279, 2011.

KASIM, N. F. M. *et al.* Computational Study on the Influence of Different Opening Position on Wind-induced Natural Ventilation in Urban Building of Cubical Array. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 256-263, 2016.

KIM, K. Y.; SON, J. W.; CHO, C. H. Assessment of Reynolds stress turbulence closures in the calculation of a transonic separated flow. **KSME international journal**, v. 15, p. 889-894, 2001.

KOPEC, D. **Health and Well-Being for Interior Architecture**. New York and London: Routledge, 2017.

KOSUTOVA, K. *et al.* Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, v. 154, p. 263-280, 2019.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. São Paulo: **PW Editores**, 1997.

LEUNG, K. K. *et al.* On the study of ventilation and pollutant removal over idealized two-dimensional urban street canyons. In: **Building Simulation**. Tsinghua Press, p. 359-369, 2012.

LI, B. *et al.* Evaluation of CFD simulation using various turbulence models for wind pressure on buildings based on wind tunnel experiments. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 2209-2216, 2015.

LIU, S. *et al.* CFD simulations of natural cross ventilation through an apartment with modified hourly wind information from a meteorological station. **Energy and Buildings**, v. 195, p. 16-25, 2019.

LÔBO, D. G. F.; BITTENCOURT, L. S. A influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 2, p. 57-67, 2003.

LOMAX, H. CFD in the 1980's from one point of view. In: **10th Computational Fluid Dynamics Conference**. p. 1526. 1991.

LUKIANCHUKI, M. A. *et al.* Influência do número de sheds e da distância horizontal entre eles no desempenho da ventilação natural. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 161-176, 2018.

MACHADO, E. P. *et al.* Avaliação dos impactos da forma urbana no microclima de bairros da cidade do Rio de Janeiro, Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 13, p. e022017-e022017, 2022.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2004.

MARTÍNEZ, Sofía Mareque. **Adaptación a climas áridos cálidos**. La arquitectura de Francis Kéré en Burkina Faso. ETSAC – Universidade da Coruña. Pintos Pena, Santiago.

2021. Disponível em :< <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/28204>>. Acesso em: 20 de jun. 2022.

MEI, Shuo-Jun *et al.* Street canyon ventilation and airborne pollutant dispersion: 2-D versus 3-D CFD simulations. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, p. 101700, 2019.

MENTER, F. R. *et al.* Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. **Turbulence, heat and mass transfer**, v. 4, n. 1, p. 625-632, 2003.

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA journal**, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.

MENTER, F.R.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. **Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model**. Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Begell House, Redding, CT, 2003.

MIRZA, Shahid *et al.* Studying impact of infrastructure development on urban microclimate: Integrated multiparameter analysis using OpenFOAM. **Energy Nexus**, v. 6, p. 100060, 2022.

MOLAR-OROZCO, M. E.; VELÁZQUEZ-LOZANO, J.; VÁZQUEZ JIMÁNEZ, M. G. Comportamiento térmico de tres prototipos en Saltillo, Coahuila (bloques de tierra, concreto y tapa de huevo). **Revista hábitat sustentable**, v. 10, n. 1, p. 22-31, 2020.

MOONEN, P. *et al.* Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. **Frontiers of Architectural Research**, v. 1, n. 3, p. 197-228, 2012.

MOUKALLED F., MANGANI L., DARWISH M., **The Finite Volume Method in Computacional Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and MATLAB**. Springer, 2015.

MURAKAMI, Y. *et al.* Coupled simulations of indoor-outdoor flow fields for cross-ventilation of a building in a simplified urban array. **Atmosphere**, v. 9, n. 6, p. 217, 2018.

NABONI, E. *et al.* A digital workflow to quantify regenerative urban design in the context of a changing climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, p. 109255, 2019.

NASCIMENTO, A. V. **Estudo da ventilação em edifícios através da engenharia do vento computacional com uso do software OpenFOAM**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

NASCIMENTO, A. V.; BONO, G. Numerical simulation of wind-driven ventilation of a three-generic low-rise building in various geometrical configurations. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 269-287, 2022.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. **Energy and buildings**, v. 36, n. 7, p. 628-637, 2004.

NOBRE, B. D. A. **Simulação RANS de configurações de jatos em tandem num escoamento cruzado**. Tese (Doutorado) – Universidade Nova de Lisboa, 2021.

OKE, Tim R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and buildings**, v. 11, n. 1-3, p. 103-113, 1988.

OMRANI, S. *et al.* Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools. **Building and Environment**, v. 116, p. 182-194, 2017.

ONU – Organização das Nações Unidas. **World Urbanization Prospects: The 2008 Revision**. New York: United Nations/ Department of Economic and Sozial Affairs, 2019. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/DataQuery/>>. Acesso em 28 de jul. 2022.

OpenFOAM Foundation. **OpenFOAM User Guide**. 2019. Disponível em: <<https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

PAPAKONSTANTINO, K. A.; KIRANOUDIS, C. T.; MARKATOS, N. C. Numerical simulation of air flow field in single-sided ventilated buildings. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 1, p. 41-48, 2000.

PERÉN, J. I. *et al.* CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. **Building and Environment**, v. 85, p. 263-276, 2015.

PETROVA, R. **Finite Volume Method: Powerful Means of Engineering Design**. 1ed. Croatia: InTech Rijeka, 2012.

QIN, H. *et al.* Influence of site and tower types on urban natural ventilation performance in high-rise high-density urban environment. **Building and Environment**, v. 179, p. 106960, 2020.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: impact of computational parameters. **Building and environment**, v. 53, p. 34-48, 2012.

RICCI, A. *et al.* Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment. **Building and Environment**. v. 171, 2020.

RICHARDS, P. J.; HOXEY, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k - \epsilon$ turbulence model. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 46, p. 145-153, 1993.

ROJANO, F. *et al.* Modelling the impact of air discharges caused by natural ventilation in a poultry house. **Biosystems Engineering**, v. 180, p. 168-181, 2019.

SAGAUT, P. **Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction**. Springer Science & Business Media, 2006.

SAKIYAMA, N. R. M. *et al.* Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, p. 109933, 2020.

SCHMELZER, M. *et al.* Discovery of algebraic Reynolds-Stress models using sparse symbolic regression. **Flow, Turbulence and Combustion**, v. 104, p. 579-603, 2020.

SHIRZADI, M. *et al.* Modelling enhancement of cross-ventilation in sheltered buildings using stochastic optimization. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 118, p. 758-772, 2018.

SHIRZADI, M.; MIRZAEI, P. A.; TOMINAGA, Y. LES analysis of turbulent fluctuation in cross-ventilation flow in highly-dense urban areas. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 209, p. 104494, 2021.

SHIRZADI, M.; NAGHASHZADEGAN, M.; MIRZAEI, P. A. Improving the CFD modelling of cross-ventilation in highly-packed urban areas. **Sustainable cities and society**, v. 37, p. 451-465, 2018.

SHIRZADI, M.; TOMINAGA, Y.; MIRZAEI, P. A. Experimental and steady-RANS CFD modelling of cross-ventilation in moderately-dense urban areas. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101849, 2020.

SHIRZADI, M.; TOMINAGA, Y.; MIRZAEI, P. A. Experimental study on cross-ventilation of a generic building in highly-dense urban areas: Impact of planar area density and wind direction. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 196, p. 104030, 2020a.

SHIRZADI, M.; TOMINAGA, Y.; MIRZAEI, P. A. CFD analysis of cross-ventilation flow in a group of generic buildings: Comparison between steady RANS, LES and wind tunnel experiments. In: **Building Simulation**. Tsinghua University Press, p. 1353-1372, 2020b.

SILVA, A. S.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55. **Building and Environment**, v. 102, p. 95-115, 2016.

SILVA, L. J. **Otimização topológica de edifícios considerando a influência das cargas de vento**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

SILVA, P. U. **Emprego de otimização topológica e DFC no projeto de sistemas de contraventamento em ambientes urbanos**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2022.

SILVA, S. V. O. *et al.* Ventilação natural e qualidade do ar em salas de aula: revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 13, p. e022021-e022021, 2022.

SILVEIRA NETO, A. **Escoamentos Turbulentos: Análise Física e Modelagem Teórica**. Universidade Federal de Uberlândia, 1 ed. Uberlândia: Composer, 2020.

SILVEIRA NETO, A. Fundamentos da Turbulência nos Fluidos. In: **Anais da I Escola de Primavera de Transição e Turbulência**, 1998.

SINGH, R. *et al.* Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2162-2185, 2018.

SKOTE, M. *et al.* Numerical and experimental studies of wind environment in an urban morphology. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 33, p. 6147-6158, 2005.

SLADE, M. **Opportunities for energy-efficient air conditioning**. International Energy Agency, p. 12, 2018. Disponível em: < <https://www.asiacleanenergyforum.org/wp-content/uploads/2018/06/Melanie-Slade-The-Future-of-Cooling-Opportunities-for-Energy-Efficient-Air-Conditioning.pdf> >. Acesso em: 10 maio 2022.

SMITH, E. G. The feasibility of using models for predetermining natural ventilation. College Station, Texas: **Texas Engineering Experiment Station**, 1951.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1-13, 2016.

SOUZA, H. A.; RODRIGUES, L. S. Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações. REM: **Revista Escola de Minas**, v. 65, p. 189-194, 2012.

SPALART, P. R. Detached-eddy simulation. **Annual review of fluid mechanics**, v. 41, n. 1, p. 181-202, 2009.

SPALART, P.R. *et al.* Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In: **Proceedings of first AFOSR international conference on DNS/LES**. Greyden Press, 1997.

TAN, Z.; DENG, X. Assessment of natural ventilation potential for residential buildings across different climate zones in Australia. **Atmosphere**, v. 8, n. 9, p. 177, 2017.

TENNEKES H., LUMLEY J. L., **A first course in Turbulence**. The MIT Press, Londres, 1972.

TOMINAGA, Y. *et al.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 1749-1761, 2008.

TOMINAGA, Y.; STATHOPOULOS, T. CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 4, p. 340-348, 2011.

TONG, Z.; CHEN, Y.; MALKAWI, A. Defining the Influence Region in neighborhood-scale CFD simulations for natural ventilation design. **Applied Energy**, v. 182, p. 625-633, 2016.

TUOMAALA, P. New building air flow simulation model: Theoretical basis. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 14, n. 4, p. 151-157, 1993.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; TOMINAGA, Y. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. **Building and Environment**, v. 114, p. 148-165, 2017.

VÁZQUEZ-TORRES, C. E. *et al.* Natural ventilation strategy in a social housing with sub-humid warm climate based on thermal comfort. **Rigas Tehniskas Universitates**

Zinatniskie Raksti, v. 25, n. 1, p. 508-524, 2021.

VENTILAÇÃO NATURAL. **Projeteee**: Projetando Edifícios Energicamente Eficientes. LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/projeteee> >. Acesso em: 22 jul. 2022.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. Computational fluid dynamics. **The finite volume method**, p. 1-26, 1995.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2ed. Pearson education, 2007.

WANG, H.; CHEN, Q. A new empirical model for predicting single-sided, wind-driven natural ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 386-394, 2012.

WANG, Y. *et al.* The influence of indoor thermal conditions on ventilation flow and pollutant dispersion in downstream industrial workshop. **Building and Environment**, v. 187, p. 1-55, 2021.

WHITTLE, G. E. Air flow modelling in atria. In: **IMechE**. Seminar on 'Atrium Engineering'. London, 1990.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3 ed. San Diego, California: DCW Industries, 2006.

WONG, N. H. *et al.* Indoor thermal comfort assessment of industrial buildings in Singapore. **Procedia engineering**, v. 169, p. 158-165, 2016.

XAVIER, A. C. A. *et al.* Visualização da ventilação natural em ensaios na mesa d'água comparado a simulações computacionais. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e020020-e020020, 2020.

XAVIER, A. C. A.; LUKIANTCHUKI, M. A. Análise da ventilação natural em uma habitação de interesse social, com diferentes configurações de muro, através de simulações CFD. **Risco Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, v. 19, p. 1-19, 2021.

XU, J. *et al.* Mean flow compressibility effects in transonic turbulence modeling. **Aerospace Science and Technology**, v. 79, p. 492-499, 2018.

YANG, F. *et al.* Impacts of cross-ventilation on the air quality in street canyons with different building arrangements. **Building and Environment**, v. 104, p. 1-12, 2016.

YANG, H. *et al.* Influences of street aspect ratios and realistic solar heating on convective heat transfer and ventilation in full-scale 2D street canyons. **Building and Environment**, v. 204, p. 108125, 2021.

YANG, H. *et al.* Numerical investigations of Re-independence and influence of wall heating on flow characteristics and ventilation in full-scale 2D street canyons. **Building and Environment**, v. 189, p. 107510, 2021a.

YU, X. *et al.* Predicting integrated thermal and acoustic performance in naturally

ventilated high-rise buildings using CFD and FEM simulation. In: **Building Simulation**. Springer Berlin Heidelberg. p. 507-518, 2018.

ZAKI, A.; RICHARDS, P.; SHARMA, R. Analysis of airflow inside a two-sided wind catcher building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 190, p. 71-82, 2019.

ZHAI, Z. Application of computational fluid dynamics in building design: aspects and trends. **Indoor and Built Environment**, v. 15, n. 4, p. 305-313, 2006.

ZHANG, X.; WEERASURIYA, A. U.; TSE, K. T. CFD simulation of natural ventilation of a generic building in various incident wind directions: comparison of turbulence modelling, evaluation methods, and ventilation mechanisms. **Energy and Buildings**, v. 229, p. 1-57, 2020.