



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

RAUL CÉSAR DE ANDRADE SOARES

**ESTUDO NUMÉRICO DA VENTILAÇÃO NATURAL E CONFORTO TÉRMICO EM
ARRANJOS DE EDIFICAÇÕES**

Caruaru

2023

RAUL CÉSAR DE ANDRADE SOARES

**ESTUDO NUMÉRICO DA VENTILAÇÃO NATURAL E CONFORTO TÉRMICO EM
ARRANJOS DE EDIFICAÇÕES**

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

Caruaru

2023

RAUL CÉSAR DE ANDRADE SOARES

**ESTUDO NUMÉRICO DA VENTILAÇÃO NATURAL E CONFORTO TÉRMICO EM
ARRANJOS DE EDIFICAÇÕES**

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.

Aprovada em: 30/08/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dra. Mariana Fernandes dos Santos Villela (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande

AGRADECIMENTO

Ao Deus Pai Todo-Poderoso, Criador dos céus e da terra; ao seu único filho, Jesus de Nazaré, nosso Senhor, que foi concebido da virgem Maria, por obra do Espírito Santo.

Aos professores Gustavo e Giuliana Bono, pelos mais de 13 anos de aprendizado e amizade.

À minha esposa Talita e ao meu filho Timóteo, que sempre estiveram ao meu lado.

À minha filha Maria, ainda no ventre.

Aos meus pais por me ensinarem o valor do trabalho.

Aos meus colegas Anderson e Calebe, por me auxiliarem nas etapas iniciais deste trabalho.

À secretaria do PPGECA, na pessoa do secretário Marcelo, por sempre atender as minhas solicitações com o máximo de celeridade possível.

RESUMO

O Brasil é um país de clima predominantemente quente, portanto, métodos de obtenção de ventilação natural devem ser considerados como meio de se obter conforto térmico de ambientes. Este trabalho, tem como proposta investigar a ventilação natural e conforto térmico de arranjos de edificações, fazendo uso da Mecânica dos Fluidos Computacional. Para isso será utilizado o *software* OpenFOAM. Foram analisados quatro *solver's*, sendo dois nativos do próprio OpenFOAM, e dois adaptados para resolver as equações de energia sem a consideração de efeitos de convecção natural. Para validação dos códigos foram analisados problemas tridimensionais utilizando-se o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão. Posteriormente, foi realizada a análise de arranjos de edificações, em modelos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Inicialmente analisou-se um arranjo bidimensional de três geometrias variando o distanciamento entre elas como também a inclinação do solo, finalmente foi avaliado um modelo 3D de um projeto típico de residência do programa *Minha casa, Minha Vida*, inserida em um arranjo de edificações, simulando assim, um conjunto habitacional. No caso dos arranjos 2D, de forma geral, observou-se que as casas a sota-vento tiveram menores vazões e maiores temperaturas, em alguns casos 88% menos vazão de ar em relação a primeira, e temperaturas médias internas consideravelmente maiores, tendo o caso de maior diferença +9,4 K em relação a casa a barlavento. Porém, observou-se que aumentar o distanciamento e inclinação do solo diminuiu consideravelmente essas diferenças, tendo o caso mais afastado e mais inclinado, uma diferença máxima de 18% na vazão, e uma diferença de temperatura máxima de 4,8 K. Na análise do modelo padrão *Minha casa, Minha vida*, foi possível observar que alguns cômodos obtiveram desconforto térmico para o frio, causado pelas velocidades de vento, principalmente na casa a barlavento. As casas a sota-vento tiveram menos cômodos com desconforto para o frio, ficando a maioria dos ambientes dentro das faixas de conforto térmico.

Palavras-chave: Conforto térmico. Mecânica de Fluidos Computacional. Ventilação Natural. OpenFOAM. Temperatura.

ABSTRACT

Brazil is a country with a predominantly hot climate, therefore, methods of obtaining natural ventilation should be considered as a means of achieving thermal comfort in environments. This work aims to investigate the natural ventilation and thermal comfort of building arrangements, using Computational Fluid Mechanics. For this, the OpenFOAM software will be used. Four solvers were analyzed, two native to OpenFOAM itself, and two adapted to solve the energy equations without considering natural convection effects. To validate the codes, three-dimensional problems were analyzed using the standard $k-\epsilon$ turbulence model. Subsequently, the analysis of building arrangements was performed in two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) models. Initially, a two-dimensional arrangement of three geometries was analyzed, varying the distance between them as well as the slope of the ground. Finally, a 3D model of a typical residential project from the Minha Casa, Minha Vida program was evaluated, inserted in a building arrangement, thus simulating a housing complex. In the case of 2D arrangements, in general, it was observed that the leeward houses had lower airflows and higher temperatures, in some cases 88% less airflow compared to the first, and considerably higher average internal temperatures, with the case with the largest difference being +9.4 K in relation to the windward house. However, it was observed that increasing the distance and inclination from the ground considerably reduced these differences, with the furthest and most inclined case having a maximum difference of 18% in the flow, and a maximum temperature difference of 4.8 K. In the analysis of the standard model Minha casa, Minha vida, it was possible to observe that some rooms had thermal discomfort due to the cold, caused by the wind speeds, mainly in the windward house. The leeward houses had fewer rooms with discomfort due to the cold, with most of the environments remaining within the thermal comfort ranges.

Keywords: Thermal comfort. Computational Fluid Mechanics. Natural ventilation. OpenFOAM. Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mecanismos de ventilação natural.	24
Figura 2 -	Principais fenômenos de escoamento sobre corpos rombudos.	25
Figura 3 -	Regiões de aceleração de escoamento em modelo de edificação.	26
Figura 4 -	Cânion urbano.	27
Figura 5 -	Perfil de velocidade e de temperatura para a convecção natural.	30
Figura 6 -	Perfil de velocidade e de temperatura.	31
Figura 7 -	Flutuações das propriedades físicas.	37
Figura 8 -	Perfil de camada limite e funções de parede.	41
Figura 9 -	Camadas do perfil de camada limite turbulenta.	42
Figura 10 -	Volumes Finitos.	44
Figura 11 -	Conservação de uma variável dentro de um volume de controle.	45
Figura 12 -	Estrutura de diretórios.	45
Figura 13 -	Gráfico do método <i>Elevated Air Speed Comfort Zone</i>	50
Figura 14 -	Tabela de valores para a variável <i>A</i>	51
Figura 15 -	Domínio e condições de contorno para o problema da Cavidade 1 e Cavidade 2, respectivamente.	54
Figura 16 -	Geometria para o problema de Karava 3D.	56
Figura 17 -	Domínio e geometria para o problema proposta de Karava 3D com geometria aquecida.	56
Figura 18 -	Domínio do caso de Karava 2D, com geometrias aquecidas. .	57
Figura 19 -	Domínio do caso de Karava 2D, com geometrias aquecidas e com inclinação.	57
Figura 20 -	Geometria para a habitação de interesse social.	62
Figura 21 -	Domínio do caso com apenas uma residência.	62
Figura 22 -	Posicionamento das residências no conjunto habitacional.	62
Figura 23 -	Dimensões principais e espaçamento entre as residências. ...	63

Figura 24 - Domínio computacional do conjunto habitacional.	63
Figura 25 - Malhas para os casos Cavidade 1 e Cavidade 2.	66
Figura 26 - Linhas de corrente no plano $z = 0.50$, Iwatsu et. al (1995) e solver <i>simpleThermo</i>	74
Figura 27 - Linhas de corrente no plano $x = 0.50$, Iwatsu et. al (1995) e solver <i>simpleThermo</i>	74
Figura 28 - Isotermas obtidas por Seyyedi et al. (2012) e presente trabalho.	75
Figura 29 - Linhas de corrente para $z = 0.50$, Ouertatani et al. (2009) e utilizando o solver <i>simpleThermo</i>	76
Figura 30 - Isotermas obtidas por Ouertatani et al. (2009) e utilizando o solver <i>simpleThermo</i>	77
Figura 31 - Malhas obtidas com o <i>snappyhexMesh</i>	78
Figura 32 - Perfil de camada limite e funções de parede.	79
Figura 33 - Regiões de refinamento.	79
Figura 34 - Localização dos cortes.	80
Figura 35 - Resultados experimentais obtidos por Tominaga e Blocken (2015).	84
Figura 36 - Perfil de velocidade (magnitude) no plano de simetria $x - z$. ..	84
Figura 37 - Perfil de Temperatura e isotermas no plano de simetria $x - z$. ..	85
Figura 38 - Perfil de velocidade (magnitude) no plano $y - x$, ($z = 0.5H$). ...	85
Figura 39 - Domínio e condições de contorno para o problema da Cavidade 1 e Cavidade 2, respectivamente.	86
Figura 40 - Distribuição de coeficiente de pressão na superfície da geometria.	87
Figura 41 - Meia-largura do jato de entrada.	88
Figura 42 - Meia-largura do jato de entrada na posição $x/D = 0,625$	88
Figura 43 - Ângulo de inclinação do jato de entrada.	89
Figura 44 - Linhas de corrente.	89
Figura 45 - Malhas utilizadas no estudo de convergência.	90
Figura 46 - Distribuição de velocidade (magnitude), caso Karava 2D.	91
Figura 47 - Distribuição de temperatura e isotermas, caso Karava 2D.	92

Figura 48 - Distribuição de temperatura e isothermas.	92
Figura 49 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: A1, A2, A3 e A4.	94
Figura 50 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: B1, B2.	98
Figura 51 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: B3, B4.	99
Figura 52 - Perfil de velocidade (magnitude) e vetores par ao caso B3. ...	100
Figura 53 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: C1, C2.	102
Figura 54 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: C3, C4.	103
Figura 55 - Isothermas entre as Geometrias G2 e G3, para os casos A3 e C3.	106
Figura 56 - Malha computacional utilizada.	110
Figura 57 - Cômodos C1, C2, C3, C4, e janelas J1 e J2.	111
Figura 58 - Distribuições de velocidade (magnitude), linhas de corrente e temperaturas.	111
Figura 59 - Interação entre vórtices e temperatura.	112
Figura 60 - Linhas de corrente plano $z = 0.5H$	113
Figura 61 - Linhas de corrente plano vertical que divide ao meio a janela J1.	114
Figura 62 - Linhas transversais no meio dos cômodos.	114
Figura 63 - Zonas de Conforto térmico para os cômodos da casa isolada.	116
Figura 64 - Perfil de velocidade (magnitude) e temperatura para a posição 1.	117
Figura 65 - Perfil de velocidade (magnitude) e Temperatura para a posição 2.	118
Figura 66 - Perfil de velocidade (magnitude) e Temperatura para a posição 3.	119
Figura 67 - Velocidades (magnitude, x, y), temperatura e pressão para as três posições.	120

Figura 68 - Perfil de velocidade e jato de alta velocidade, $z = 0.5H$.	122
Figura 69 - Zonas de conforto térmico para o caso da casa na posição 1.	124
Figura 70 - Zonas de conforto térmico para a casa na posição 2.	124
Figura 71 - Zonas de conforto térmico para a casa na posição 3.	124
Figura 72 - Planta baixa e corte da casa do conjunto habitacional.	142
Figura 73 - Coeficiente de pressão para os casos A1, A2, A3 e A4.	143
Figura 74 - Coeficiente de pressão para os casos B1, B2, B3 e B4.	144
Figura 75 - Coeficiente de pressão para os casos C1, C2, C3 e C4.	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Relação entre números de Richardson.	33
Quadro 2 -	Constantes do modelo $k - \varepsilon$	40
Quadro 3 -	Esquemas de discretização.	47
Quadro 4 -	Condições de contorno aplicadas nos problemas das Cavidades 1 e 2.	54
Quadro 5 -	Inclinações e distanciamentos para os casos de Karava 2D.	58
Quadro 6 -	Condições de contorno aplicadas para os casos de Karava 2D.	58
Quadro 7 -	Condições de contorno para as variáveis da turbulência no caso de Karava 2D.	59
Quadro 8 -	Condições de contorno aplicadas para o caso de Karava 3D.	60
Quadro 9 -	Condições de contorno para as variáveis da turbulência no caso de Karava 3D.	60
Quadro 10 -	Condições de contorno para o caso do conjunto habitacional.	64
Quadro 11 -	Condições de contorno para a variáveis da turbulência no caso do conjunto habitacional.	64
Quadro 12 -	Nusselt médio para a Cavity 1 com $Ri = 0,001$ e $Re =$ 400.	67
Quadro 13 -	Nusselt médio na superfície superior no caso da Cavity 2.	75
Quadro 14 -	Vazão adimensional na abertura de entrada.	81
Quadro 15 -	Vazão adimensional na abertura de entrada.	82
Quadro 16 -	Vazão adimensional na abertura de entrada.	93
Quadro 17 -	Diferença de temperaturas entre as geometrias.	95
Quadro 18 -	Vazões adimensionais de cada geometria para cada caso. .	96
Quadro 19 -	Vazões adimensionais.	100
Quadro 20 -	Vazões adimensionais.	104
Quadro 21 -	Resumo das vazões e temperaturas médias internas.	109

Quadro 22 -	Velocidade média, temperatura média interna e temperatura operativa.	115
Quadro 23 -	Resumo das temperaturas médias internas.	121
Quadro 24 -	Resumo das vazões adimensionais.	121
Quadro 25 -	Velocidade média, temperatura média interna e temperatura operativa.	123

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4	METODOLOGIA	24
4.1	Princípios Básicos da Ventilação Natural	24
4.2	Condições de Vento no meio Urbano	25
4.3	Convecção Natural e Forçada	29
4.4	Modelagem Matemática e a aproximação de Boussinesq	33
4.4.1	Modelo de Turbulência RANS	36
4.4.1.2	Hipótese de Boussinesq e o Modelo $k - \epsilon$	39
4.4.2	Funções de parede	40
4.5	O OpenFOAM	43
4.5.1	Estrutura de uma simulação	45
4.5.2	Esquemas de discretização numérica	47
4.5.3	Algoritmos de acoplamento	48
4.5.4	CrITÉrios para caracterização de conforto térmico	50
5	CASOS ESTUDADOS	52
5.1	Casos de Validação	53
5.2	Casos em ambientes urbanos	55
5.2.1	Casos Karava 2D e Karava 3D	55
5.2.2	Caso do Conjunto Habitacional	60
6	RESULTADOS	66
6.1	Cavidade aquecida tridimensional - Cavidade 1	66

6.2	Cavidade aquecida Tridimensional - Cavidade 2	75
6.3	Caso de Karava 3D	77
6.4	Caso de Karava 2D	90
6.4.1	Caso “A”	93
6.4.2	Caso “B”	97
6.4.3	Caso “C”	101
6.5	Conjunto Habitacional	110
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
	REFERÊNCIAS	128
	ANEXO I – CÓDIGO FONTE	141
	ANEXO II – PLANTA BAIXA	142
	ANEXO III – COEF. DE PRESSÃO CASO “A”	143
	ANEXO IV – COEF. DE PRESSÃO CASO “B”	144
	ANEXO V – COEF. DE PRESSÃO CASO “C”	145

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de clima tropical em que a maior parte do seu território possui um clima quente, dessa forma, a necessidade de utilização de ar-condicionado e outros meios mecânicos de ventilação ou condicionamento de ar é uma realidade, elevando assim, o consumo de energia residencial. Segundo a nota técnica EPE 030/2018 (EPE, 2018), os meios artificiais de condicionamento de ar são responsáveis por cerca de 14% do consumo energético das residências no Brasil, e de acordo com o estudo do plano decenal de expansão de energia (EPE, 2020) a demanda de consumo de energia elétrica em residências deve crescer a uma média de 3,8% ao ano, fazendo que o consumo médio por casa passe dos atuais 162 kWh/mês para 197 kWh/mês em 2030.

Dessa forma, a ventilação natural apresenta-se como um meio de se obter conforto térmico sem aumento direto no consumo de energia, possibilitando, inclusive, um decréscimo no consumo médio energético residencial, por evitar ou diminuir a utilização de ar-condicionado ou ventiladores por exemplo.

Além disso, com o desenvolvimento urbano, observou-se que as pessoas tendem a ficar a maior parte do seu tempo em ambientes fechados, o que reforça a preocupação de se obter edificações que tenham nos seus projetos, estudos relacionados à ventilação e conforto térmico, inclusive em ambientes de trabalho (FRONTCZAK *et al.*, 2011).

A pandemia causada pelo COVID-19 trouxe uma preocupação ainda maior com as questões relacionadas à ventilação natural. Ambientes fechados tornam-se locais de rápida transmissão do COVID-19 (AVIV *et al.*, 2021). Nos últimos anos estudos vêm sendo realizados a fim de entender como mecanismos de ventilação podem contribuir para uma diminuição do contágio (SCHIBUOLA e TAMBANI, 2021; BERRY *et al.*, 2021).

Sistemas de climatização puramente mecânicos, também conhecidos como HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), podem aumentar as taxas de infecção pelo coronavírus (ZHENG *et al.*, 2021) devido a problemas de projeto ou operação inadequados. A inclusão de sistemas naturais de ventilação ao HVAC já

existente, além de terem o potencial de diminuir a probabilidade de contágio podem reduzir o consumo energético com climatização em até 45% (AVIV *et al.*, 2021).

No estudo realizado por Park *et al.* (2021), foi mostrado como a ventilação natural pode ser uma forte aliada para a diminuição de infecções via ar em ambientes fechados. No trabalho, foi analisado um conjunto de salas em uma escola na Coreia do Sul, onde variou-se as taxas das aberturas das janelas, e o sistema entre ventilação cruzada e unilateral. Observou-se que a ventilação cruzada é mais eficiente que a unilateral na taxa de renovação de ar, mas que ambas, com apenas uma taxa de 15% da abertura das janelas, trazem o risco de infecção abaixo de 1% se associado ao uso de máscara.

Portanto, a ventilação natural como meio de obtenção de conforto térmico, traz vantagens tanto ao tornar o ambiente mais saudável, quanto ao diminuir o consumo energético, visto que evita a utilização de meios artificiais.

A ventilação natural e como ela impacta nas variações de temperatura em edificações, pode ser estudada através da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD do inglês *Computational Fluid Dynamics*). A mesma é baseada em simulações numéricas computacionais que são capazes de fornecer os campos de velocidade, pressão e temperatura, entre outras variáveis. Assim, a utilização de tais ferramentas computacionais na fase de projeto, é o ideal para a obtenção de qualidade do ar interior, e conforto térmico.

Também, deve-se ressaltar que a rapidez na criação dos modelos computacionais e a possibilidade de realizar estudos de diversos modelos e geometrias fazem das simulações computacionais instrumento ainda mais interessante. A rápida visualização dos resultados permite que novas alterações sejam realizadas em curto prazo de tempo. Tudo isso torna a simulação numérica uma opção mais econômica e com tempo de execução menor se comparada com as simulações e estudos realizados em túneis de vento (RAMPONI e BLOCKEN, 2012).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo modelar e simular através da Dinâmica de Fluidos Computacional a ventilação natural em arranjos de modelos de edificações a fim de analisar o comportamento térmico dos ambientes.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar e comparar os tempos de processamento entre diferentes *solvers*;
- Analisar como a variação das geometrias e disposições geométricas influenciam a topologia do escoamento no arranjo de edificações;
- Analisar e comparar o conforto térmico nos ambientes simulados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos numéricos relacionados ao vento são uma das grandes áreas de estudo da Mecânica dos Fluidos. Com o objetivo de distinguir essa aplicação dentre tantas outras, nos anos 80 identificou-se esse ramo como Engenharia de Vento Computacional (EVC).

Simiu e Scanlan (1996), afirmam que a engenharia de vento pode ser dividida em três subáreas de aplicação: avaliação das condições ambientais devidas à circulação de vento, determinação das forças induzidas pelo vento sobre as estruturas e resposta estrutural sob a ação do vento. Os problemas de condições ambientais provocadas pela circulação de vento estão relacionados a questões climáticas e geométricas do meio urbano, tais como: camada limite atmosférica, temperaturas ambientes e fortes gradientes de pressão e velocidade causadas pela geometria das edificações.

Um dos pioneiros e principais propagadores de tal segmento foi Shuzo Murakami, sendo responsável pela edição de uma das primeiras publicações sobre o tema no início da década de 90, o "Journal of Wind Engineering and Industrial" que apresentou 14 trabalhos mostrando o desenvolvimento do tema até o momento. Os estudos apontavam a importância dos modelos de turbulência para simulações de corpos rombudos, aplicando e observando os modelos desenvolvidos até então.

Murakami e Mochida (1988) realizaram um estudo sobre o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão (LAUNDER e SPALDING, 1974), simulando geometrias simples e comparando com os resultados experimentais. Ainda com as limitações computacionais da época, foi possível obter resultados satisfatórios quando comparados aos experimentais.

Os primeiros trabalhos já mostraram a complexidade e a grande quantidade de equações que eram necessárias para se resolver problemas de EVC, que possuíam altos números de Reynolds e grandes domínios. Tais características fazem que a Engenharia do Vento Computacional tenha um elevado custo computacional. Dificuldade essa que tornavam inviáveis a solução de determinados tipos de problemas e limitavam a discretização a problemas com malhas não muito refinadas e números de Reynolds moderados. Porém, com o passar do tempo e com os avanços

realizados no desenvolvimento de computadores, foi possível analisar problemas com malhas mais refinadas e número de Reynolds mais altos.

Lim e Ooka (2014) utilizaram CFD e Algoritmos Genéticos para otimizar o posicionamento de um conjunto de edifícios visando aumentar a ventilação natural. A variável que serviu como critério para a otimização foi a energia cinética. Como resultado foi gerado uma nova distribuição de posicionamento dos edifícios analisados.

Micallef *et al.* (2016) simularam a interferência de prédios vizinhos a uma geometria com duas aberturas, onde também foram variadas as alturas desses prédios. Foi possível observar como o posicionamento das edificações vizinhas interfere na ventilação cruzada, se comparado apenas com a geometria isolada.

No trabalho de Morais e Labaki (2017), observa-se como o avanço computacional trouxe possibilidades ainda maiores nos estudos de ventilação natural e conforto térmico. Nessa ocasião os autores simularam no ANSYS FLUENT um edifício habitacional de múltiplos pavimentos obtendo as velocidades médias em cada cômodo.

Estudo semelhante, que também mostra o potencial atual dos computadores, é o de Córdova *et al.* (2020), onde são simulados os efeitos de ventilação e efeitos térmicos em um laboratório de química de uma universidade, utilizando o software OpenFOAM.

Hooff, Blocken e Tominaga (2017), utilizando o ANSYS FLUENT, simularam uma geometria isolada, com duas aberturas. Foram analisados alguns modelos de turbulência, como RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e LES (*Large Eddy Simulation*). Os resultados obtidos mostraram uma boa aproximação com os resultados experimentais. Também foi possível observar que o modelo LES teve êxito em captar os principais fenômenos físicos do escoamento, como formação dos vórtices e regiões de gradientes de pressão. Ai e Mak (2014) também observaram a superioridade da metodologia LES em relação aos modelos RANS. Apesar da superioridade do LES, é importante destacar a diferença entre os tempos de processamento encontrados, tendo o LES em alguns casos consumido o dobro do tempo de processamento se comparado aos modelos RANS.

Kosutova *et al.* (2019), analisaram experimental e numericamente com o ANSYS FLUENT, um modelo tridimensional de uma geometria com duas aberturas, onde nessas aberturas existiam venezianas. As posições das janelas eram alteradas a fim de observar as variações no estudo de ventilação cruzada. Os resultados obtiveram uma boa concordância com o estudo experimental.

Wang *et al.* (2018) fizeram um levantamento dos estudos relacionados a CFD voltados a ventilação de edificações, e observaram que grande maioria são realizados com softwares comerciais. Apesar disso, softwares livres e de código aberto como OpenFOAM, também vêm sendo utilizados para esse fim.

Sobre ventilação cruzada, Kasim *et al.* (2016) realizaram um estudo no OpenFOAM variando o posicionamento das janelas a fim de observar qual disposição traria uma ventilação mais eficiente, o modelo de turbulência utilizado foi o RNG $k-\varepsilon$. Notou-se que de fato o posicionamento das aberturas causou grandes variações no escoamento interno à geometria, podendo-se achar uma distribuição de aberturas ideal.

Badas *et al.* (2017), simularam no OpenFOAM o escoamento em cânions urbanos, alterando tanto a inclinação do telhado quanto os distanciamentos entre os edifícios. A inclinação dos telhados de duas águas foi variada entre 0° e 40°, com intervalos de 10°. Dessa forma foi possível observar como a forma e distância entre as edificações pode influenciar a distribuição de velocidades no meio urbano.

King *et al.* (2017) analisaram no OpenFOAM e ANSYS FLUENT um arranjo de várias geometrias simulando um conjunto de edifícios, incluindo 8 direções de vento. Os resultados foram comparados e observou-se uma boa correlação entre os dois softwares. Foi observado também, que determinados ângulos de incidência prejudicam a ventilação natural, mostrando a importância de se considerar variações angulares na incidência do vento. Notou-se ainda, que os edifícios localizados na posição central tendem a se beneficiar mais pela ventilação cruzada, enquanto as edificações localizadas na periferia pela ventilação unilateral.

Hong *et al.* (2017), simularam no OpenFOAM, um galpão agrícola com 13 malhas diferentes e 4 tipos de modelo de turbulência, validando os resultados com

ensaios em túnel de vento. Os modelos $k-\varepsilon$ padrão e RNG $k-\varepsilon$ tiveram resultados satisfatórios.

Shizardi *et al.* (2018) simularam um arranjo de edificações, sendo a edificação do centro com duas aberturas. Foram feitas diversas densidades de arranjo de edificações e observou-se que para grandes densidades o modelo RANS $k-\varepsilon$ não tem bons resultados.

Nascimento (2019) estudou modelos geométricos, bi e tridimensionais, utilizando o OpenFOAM. Tais modelos representavam modelos simples de edificações com duas aberturas, os modelos de turbulência variaram entre LES e RANS ($k-\varepsilon$ e $k-\omega$ SST). Um dos exemplos simulados foi um conjunto de três edificações uniformemente distanciadas e cada uma delas com duas aberturas. Variou-se tanto o distanciamento entre elas como também a inclinação do terreno. Observou-se que um maior espaçamento entre as edificações e uma maior angulação do terreno originaram uma maior vazão nas edificações localizadas a sotavento.

Sakiyama *et al.* (2021), simularam com OpenFOAM a ventilação natural em um modelo tridimensional de residência com dois pavimentos, foi utilizado o *simpleFoam*, e o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão. No trabalho, foi variado o ângulo de ataque do vento em relação à residência, sendo possível analisar as vazões de ar e topologia do escoamento (formação de vórtices, e gradientes de velocidade) para cada caso.

Nascimento, Cavalcante e Bono (2021), estudaram a aerodinâmica de edificações. Foi simulado através do OpenFOAM um conjunto de dois prédios paralelos, e uma edificação baixa com duas aberturas utilizando-se o solver *simpleFoam*, e o modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$ e $k-\varepsilon$ padrão, respectivamente. Apesar da utilização de modelos RANS e a consideração de regime estacionário, foi observada uma boa concordância com os resultados experimentais utilizados como referência.

Limane *et al.* (2018) simularam com o OpenFOAM o escoamento interno de uma piscina coberta localizada em Quebec no Canadá, considerando os efeitos de ventilação e temperatura. Na simulação foram incluídos ventiladores e exaustores existentes. Foram realizadas medições de velocidade *in loco* e comparados com os resultados da simulação. Foram considerados diversos modelos RANS, e observou-

se que, apesar de algumas diferenças entre os resultados, nenhum deles pode ser descartado para a análise de escoamentos dessa natureza.

Xiong e Chen (2021), analisaram os efeitos de temperatura e escoamento em cânions urbanos utilizando o OpenFOAM. Simularam cânions urbanos com suas superfícies aquecidas, e a influência em modelos simplificados de apartamentos. Observou-se que o arranjo geométrico dos cânions gera consequências nos efeitos térmicos e podem interferir significativamente nas temperaturas internas e taxas de trocas de ar dos apartamentos que se localizam na região.

Utilizando os programas CFX e EnergyPlus, Scherer e Grigoletti (2021), estudaram 16 estratégias de ventilação natural e conforto térmico em salas de aula na cidade de Santa Maria, Rio Grande do sul. As simulações objetivavam observar a eficiência energética, conforto térmico e qualidade do ar. Nos estudos realizados, observou-se que, para a região, a ventilação natural em alguns casos causava desconforto para o frio, sendo necessário controle de abertura das janelas para essa situação.

Ainda no contexto de estudos de ventilação em ambientes de longa permanência, Pagel e Gouveia *et al.* (2022), considerando escoamento e temperatura, analisaram com o software DesignBuilder a ventilação natural em uma sala de aula nos estados do Espírito Santo e Pará. Foi observado que a utilização de um peitoril ventilado melhora significativamente a velocidade do vento e o desempenho térmico do ambiente. Observou-se também que a utilização de protetores solares (brise-soleil) diminui consideravelmente o desconforto por calor e gera uma diminuição de 50% no consumo de energia relacionada à climatização artificial.

Em comparação com a simulação de modelo isolados a literatura sobre a simulação da ventilação natural (por diferencial de pressão e adicionando temperatura) em conjuntos de edifícios pode ser considerada escassa. A maioria dos trabalhos tem se dedicado a estudar a ventilação natural e o conforto térmico apenas considerando as variáveis de pressão e velocidade (LEE E MAK, 2021; ZU E LAM, 2018; ZHONG *et al.*, 2020; ZHENG *et al.*, 2021). Do mesmo modo, grande parte dos trabalhos utilizam programas comerciais, principalmente Ansys Fluent e o Ansys CFX (SAKIYAMA *et al.*, 2020).

Porém, alguns trabalhos podem ser citados, como o de Toparlar *et al.* (2018), que simularam o microclima urbano, na Antuérpia, Bélgica, utilizando-se do *software* Ansys Fluent, e o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão. Neste trabalho consideram-se três situações na simulação, uma região perto de um grande parque arborizado, uma região afastada do parque arborizado, e uma zona rural afastada do centro da cidade. Observou-se que as temperaturas médias do ar na cidade podem ser até 3,3°C maior se comparada com a da zona rural. A temperatura do trecho próximo ao parque é 0,9°C em média menor em relação ao trecho longe do parque. Comparado os trechos da zona urbana com o da zona rural, a demanda por resfriamento pode ser maior em até 90% para os trechos urbanos.

Piroozmand *et al.* (2020) utilizando um acoplamento entre o OpenFOAM, e o COSMO (modelo atmosférico regional), simularam um trecho urbano da cidade de Zurich, Suíça, utilizando-se o modelo $k-\varepsilon$ padrão. Foi possível prever a temperatura média com pequenos erros em relação as medições de observação. Para velocidade e direção do vento, os erros foram maiores, principalmente no dia com forte onda de calor, devido aos efeitos de flutuação e convecção natural. Da mesma forma, não foram considerados os escoamentos internos aos edifícios.

Outros trabalhos também investigam ilhas de calor em ambientes urbanos, utilizando-se o ENVI-meet como ferramenta de CFD, e assim como a maioria, preocupam-se principalmente com escoamento externos, não simulando as áreas internas das edificações (GRIFONI *et al.* 2022; WERNECK, 2018; MORSCH, 2020).

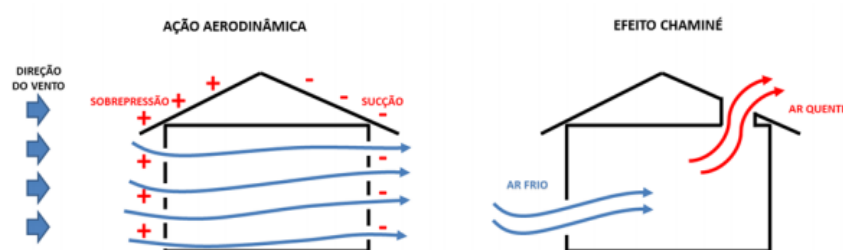
Dessa forma, a contribuição principal deste trabalho é analisar o conforto térmico e ventilação natural em um modelo de conjunto habitacional, incluindo-se a variável de temperatura e analisando-se os escoamentos internos à residência, fazendo uso de *softwares* gratuitos e de fácil acesso a estudantes, professores e pesquisadores.

4 METODOLOGIA

4.1 Princípios Básicos da Ventilação Natural

Para que um fluido se mova é necessário que haja uma força motriz que gere essa movimentação. Essa força motriz pode ser uma variação de pressão ou de temperatura por exemplo. No caso específico de problemas envolvendo ventilação natural, podemos entender esses dois mecanismos em um sistema básico de ventilação conforme apresenta-se na Figura 1.

Figura 1 - Mecanismos de ventilação natural.



Fonte: Nascimento (2019).

A ação aerodinâmica baseia-se fundamentalmente nas diferenças de pressão geradas a barlavento (antes) e sota-vento (depois) em uma geometria. Na maioria das vezes, essa geometria não é aerodinâmica, como uma residência unifamiliar típica por exemplo, termina por gerar gradientes de pressões, sendo a região a barlavento uma região de sobrepressão, e a sota-vento uma região de sucção, tal diferença de pressão tende a ser equilibrada pelo fluido, fazendo com que ele flua para as regiões de menor pressão, tão rápido quanto maior for essa diferença de pressão, gerando assim um sistema natural de ventilação.

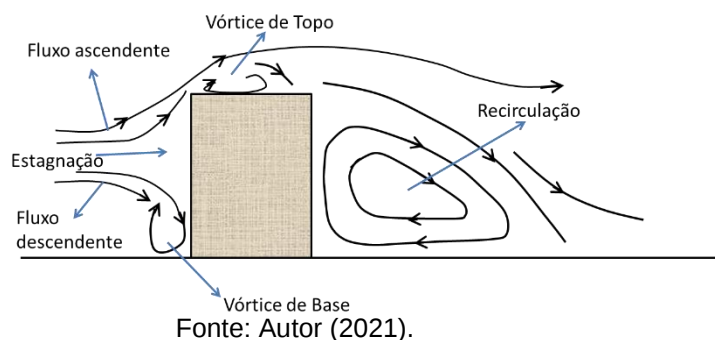
Por sua vez, o efeito chaminé, baseia-se no princípio da convecção natural, onde variações de densidade geram movimentações de uma parcela de fluido, gerando assim renovação de ar e trocas térmicas. É importante salientar que em um caso real e geral de ventilação natural e conforto térmico, as duas ações agem simultaneamente.

4.2 Condições de Vento no meio Urbano

Em ambientes rurais ou pouco habitados, o vento, em geral, se move com velocidades maiores e o com parcelas de turbulência reduzida. Isso ocorre devido à menor quantidade de obstáculos que faz com que o fluido sofra menos interferências, e com isso evitando fortes gradientes de velocidade e pressão, que potencialmente geram efeitos de turbulência mais acentuados.

Diferentemente dessa situação, os meios urbanos estão a cada dia com uma maior taxa de ocupação, e os espaços vêm se reduzindo, tornando os efeitos de turbulência mais perceptíveis. Na Figura 2, são mostrados os principais fenômenos que ocorrem em escoamentos sobre corpos rombudos.

Figura 2 - Principais fenômenos de escoamento sobre corpos rombudos.



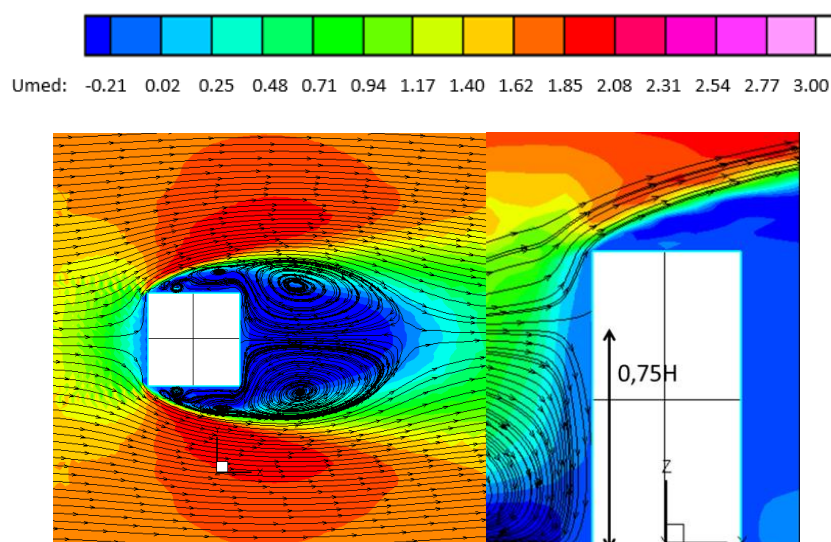
Ao incidir na parte frontal da geometria o escoamento se divide em dois, escoamento ascendente e descendente, e entre as duas direções existe um ponto onde a velocidade é nula, chamado de ponto de estagnação. O escoamento descendente dará origem a um vórtice de base, ou vórtice ferradura. A parte ascendente se separa do teto, e dará origem a um pequeno vórtice, chamado vórtice de topo, que dependendo da largura da geometria, pode ocasionar o recolamento da camada limite no topo da estrutura.

A jusante do escoamento forma-se uma região de recirculação, causada pelas diferenças de pressão entre as regiões a montante e a jusante da geometria. O fluido ao perceber essa diferença de pressão tenta equilibrá-la, recirculando para essa região, formando assim um escoamento em formato espiral, chamado de vórtice. Tais fenômenos citados acima podem ser observados em diversas simulações numéricas

já realizadas, como Tutar e Oguz (2002), Braun *et al.* (2007), Cheung *et al.* (2011), Shao *et al.* (2012), Toja *et al.* (2013), Tominaga (2015), entre outras.

Observa-se que as configurações geométricas das edificações podem gerar fortes aumentos de velocidade, por vezes superar as correntes de ar não perturbadas, em algumas regiões próximas à construção. Como exemplo, observa-se na Figura 3, um significativo aumento da velocidade nas laterais da edificação e na região superior. Zonas de alta velocidades desse tipo podem ser aproveitadas, a depender da geometria e do projeto da edificação, como auxiliares para obtenção de ventilação natural.

Figura 3 - Regiões de aceleração de escoamento em modelo de edificação.



Fonte: Autor (2015).

Uma das características do urbanismo moderno nos grandes centros é a formação dos cânions urbanos, esse fenômeno é causado pelo adensamento das edificações e sua verticalização. Um cânion urbano típico, pode ser caracterizado como sendo duas fileiras de edifícios separados por uma rua, como observado na Figura 4.

Figura 4 - Cânion urbano



Fonte: www.gazetadopovo.com.br

Segundo Aguiar *et al.* (2017) disposições geométricas como essa, causam interferência no microclima local, gerando alteração no fluxo de ventos, temperatura e umidade. Oke e Cleugh (1987) afirmam também que os materiais utilizados na construção junto com a formação de cânions urbanos têm o potencial de gerar um acúmulo de temperatura e uma baixa renovação de ar.

Um dos critérios para se estudar o comportamento térmico em cânions urbanos é a relação entre altura do edifício ($H = \text{height}$) e largura da rua ($W = \text{width}$). Estudos com esses parâmetros podem ser encontrados em Johnson e Watson (1987), Rocha *et al.* (2011) e Middel *et al.* (2018).

Kim *et al.* (2001), realizaram estudos numéricos baseados na Dinâmica de Fluidos Computacional, de escoamentos sobre cânions urbanos. Foram realizadas análises com diferentes relações de H/W e com diferentes temperaturas da rua, observando como tais variações causavam modificações nas distribuições de temperatura e velocidade.

Estudos semelhantes foram realizados de forma experimental por Uehara (2000) e Sini *et al.* (1995) relacionado a dispersão de poluentes, e numericamente por Bottillo *et al.* (2014).

Com todas essas características mostradas, fica nítido que os escoamentos atmosféricos em meios urbanos são altamente turbulentos. Turbulência é uma característica do escoamento, e não do fluido, podendo ser considerada como um

escoamento com flutuações irregulares e aleatórias de suas variáveis, como velocidade, pressão, temperatura, concentração de algum poluente, etc.

Segundo Hinze (1975), a turbulência é uma condição irregular do escoamento, havendo uma variação randômica no tempo e espaço das propriedades do fluido, podendo ser diferenciados de seus valores médios.

Algumas características podem ser descritas a respeito do escoamento turbulento:

- **É difusivo:** O fato de ser rotacional e tridimensional provoca um aumento na difusividade do fluido, ocasionando um aumento na taxa de mistura. Trocas de massa, temperatura e concentrações que ocorreriam basicamente por difusão molecular em fluidos em repouso, agora são aceleradas pela difusividade turbulenta.

- **É dissipativo:** É necessário que exista uma fonte contínua de energia para que um escoamento turbulento aconteça. Caso essa fonte deixe de existir, a energia se dissipa rapidamente e os fenômenos de turbulência cessam.

- **É tridimensional:** A turbulência é de natureza tridimensional.

- **É transiente:** É função do tempo, ou seja, apresenta variações com o decorrer do tempo.

- **Possui múltiplas escalas:** A turbulência tem como característica a multiplicidade de escalas, os vórtices apresentam grandes escalas (os maiores) e pequenas escalas (os menores). A energia cinética sempre percorre o caminho das maiores escalas para as menores escalas.

- **É anisotrópico:** Principalmente nas grandes escalas, as variáveis do escoamento não são necessariamente idênticas em todas as direções.

O regime do escoamento determina-se através do número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho u H}{\mu} \quad (1)$$

onde, ρ é a massa específica do fluido, u é a velocidade característica do escoamento, H é a altura característica, e μ é a viscosidade dinâmica. Pode-se entender essa equação como a relação entre as forças inerciais do escoamento e as forças viscosas do fluido.

É importante entender que a viscosidade tem uma característica natural de tentar absorver as perturbações de um escoamento inicialmente laminar, e diminuir os níveis de turbulência desse escoamento. É por isso que, por exemplo, fluidos com maiores viscosidades, como água ou petróleo, necessitam de mais energia para entrarem num regime turbulento, enquanto que fluidos menos viscosos como ar, necessitam de muito menos energia, de forma que pequenas perturbações causam o início de um regime turbulento.

Como dito, a viscosidade tem a capacidade de absorver energia e amortecer os efeitos turbulentos de um escoamento, assim quanto maior a viscosidade mais difícil é tornar um escoamento turbulento, e quanto menor a viscosidade mais fácil de ocorrer a turbulência. Com esse conceito, fica mais fácil de entender a equação de Reynolds como sendo uma disputa entre a energia do escoamento, contra o quanto a viscosidade pode resistir ao absorver essa energia.

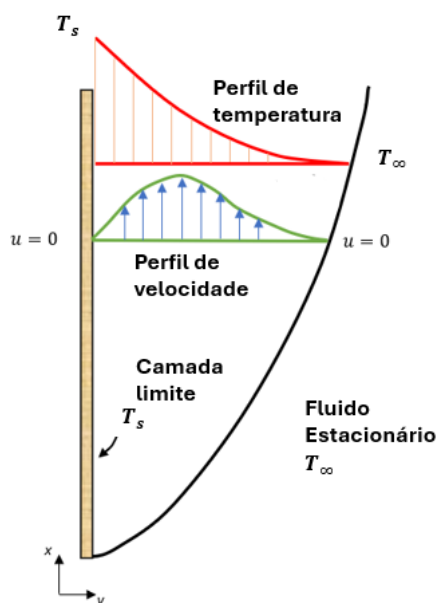
4.3 Convecção Natural e Forçada

O movimento do fluido no fenômeno de convecção natural ocorre devido às diferenças de densidade entre as camadas de fluido com maior temperatura e menor temperatura. Considerando um fluido estacionário em contato com uma superfície com temperatura maior, as camadas mais próximas à superfície se aquecem, tal aquecimento gera uma variação na densidade do fluido, diminuindo-a. Pelo fato das camadas vizinhas de fluido ainda terem uma temperatura menor, é gerado uma força de empuxo, empurrando as camadas de fluido mais quentes para as partes mais superiores, e conseqüentemente, as camadas mais frias descem e ocupam a camada que anteriormente era ocupada pelo fluido mais quente.

O fluido mais frio que desceu passa agora a se aquecer pelo contato mais próximo com a superfície quente, e o fluido quente que subiu tende a se resfriar por

estar mais distante da superfície, fazendo com esse processo se torne cíclico enquanto não ocorrer o equilíbrio térmico entre a superfície e o fluido. Na Figura 5, mostra-se um desenho de como se desenvolve o perfil de velocidade e o perfil de temperatura em um caso de convecção natural em uma placa ou superfície vertical aquecida imersa em um fluido estacionário.

Figura 5 - Perfil de velocidade e de temperatura para a convecção natural.



Fonte: Autor (2022).

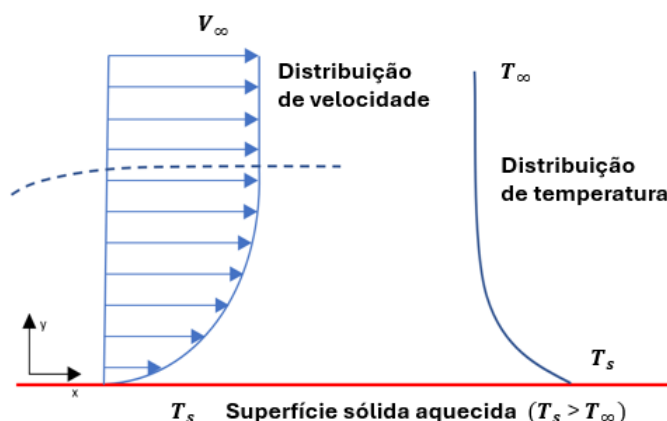
As camadas do fluido em contato com a superfície quente diminuem sua densidade, e sobem, gerando assim um fluxo bem definido e com uma direção preferencial, formando um perfil de camada limite, ou simplesmente, perfil de velocidade, como observado na Figura 5. Sabendo que a velocidade de um fluido em contato com uma superfície sólida ($y = 0$) é sempre zero, gera-se nessa região uma tensão de cisalhamento que faz com a velocidade do fluido diminua nas regiões próximas ao corpo sólido, e aumente à medida que as camadas de fluido vão se afastando da superfície. Esse aumento de velocidade ocorre até um ponto máximo, a partir desse ponto as velocidades tendem a diminuir devido o afastamento da placa e consequentemente menores temperaturas, fazendo com que os efeitos de empuxo diminuam até um ponto em que a velocidade seja zero.

A convecção forçada ocorre quando existe um movimento de fluido gerado por uma fonte externa. Segundo Incropera (2008), o modo de transferência por convecção

abrange dois mecanismos. Além da transferência de energia devido ao movimento aleatório das moléculas (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido, isso significa que em algum dado instante, poderá se mover coletivamente para uma determinada região, como um fluido escoando em uma dada direção, podendo ser esse movimento chamado de advecção.

Na Figura 6, é exemplificado um modelo no caso de convecção forçada. A interação entre um fluido e a superfície, como já foi visto, gera um perfil de velocidade, onde a velocidade do fluido é zero em $y = 0$, ou seja, exatamente no contato entre o fluido e a superfície. Essa velocidade aumenta à medida que as camadas de fluido se afastam da superfície, até chegar a uma velocidade constante V_∞ em uma altura onde a superfície não perturba mais o escoamento, esse perfil é chamado de perfil de camada limite ou simplesmente perfil de velocidade.

Figura 6 - Perfil de velocidade e de temperatura



Fonte: Autor (2022).

Assim como para a velocidade, a temperatura também sofre uma variação à medida que se distancia da superfície aquecida, gerando também um perfil, chamado de perfil de camada limite térmica ou de perfil temperatura. Diferentemente do perfil de velocidade, para um caso em que a temperatura da superfície é maior que a do fluido, o perfil tem um sentido inverso se comparado ao perfil de velocidade. Tendo um valor maior nas proximidades da superfície, e menor à medida que se distancia da mesma, chegando também a um valor constante a determinada distância da superfície.

Como já citado antes, a transferência de calor se dá por dois meios: movimento aleatório das moléculas (difusão) e movimento global e macroscópico do fluido. Para regiões mais próximas à superfície, a maior parte da transferência de calor ocorre por difusão, pelo fato de a velocidade do fluido nessa região ser baixa. Para as regiões mais afastadas da superfície, o calor é conduzido para dentro do perfil de velocidade e arrastado na direção do escoamento, sendo posteriormente transferido para camadas mais afastadas do fluido.

Toda convecção forçada é, de forma geral, uma mistura de trocas de calor causadas pela convecção natural e trocas de calor causadas pela convecção forçada. Para fins de definição esse tipo de troca mista será chamado de convecção mista. Onde as parcelas do empuxo e as parcelas das forças advectivas do movimento do fluido influenciam as trocas térmicas, e também, a topologia do escoamento. O número de Richardson é um dos parâmetros numéricos utilizados para determinar a importância da convecção natural em relação a convecção forçada em um problema de convecção mista.

$$Ri = \frac{g\beta(t_h - t_c)H}{V^2} \quad (2)$$

onde, g é a força da gravidade, β o coeficiente de expansão térmica do fluido, $(t_h - t_c)$ diferença de temperatura entre a superfície quente e o fluido, H a altura característica e V a velocidade do fluido. Para fenômenos de convecção é possível entender a Eq. (2) como sendo a relação entre as forças de flutuação causadas pelo empuxo da convecção natural e as forças viscosas da movimentação do fluido (GARBRECHT, 2017), ou seja, uma relação entre as parcelas de convecção natural e forçada.

Essa relação também é descrita por Sparrow *et al.* (1959), onde descreve um intervalo de valores para o número de Richardson, em que podemos considerar ou desconsiderar os efeitos de convecção natural ou forçada, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Relação entre números de Richardson

$0 < Ri < 0,3$	Convecção Forçada
$0,3 < Ri < 16$	Convecção Mista
$16 < Ri$	Convecção Natural

Fonte: Sparrow *et al.* (1959)

4.4 Modelagem Matemática e a aproximação de Boussinesq

As equações que serão consideradas para solucionar os problemas de engenharia do vento são as equações de conservação de massa e momento. A solução dessas equações representa as propriedades do escoamento distribuídas no espaço (domínio computacional) e no tempo. As equações, para um fluido isotérmico e incompressível, podem ser escritas da seguinte forma segundo Versteeg e Malalasekera (2007):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_z \quad (6)$$

Onde:

U = vetor velocidade;

u, v, w = componentes de U em x, y e z , respectivamente;

t = tempo;

p = pressão;

ρ = densidade;

μ = viscosidade dinâmica;

$S_{x,y,z}$ = termos fonte.

Incluindo a equação de energia (Eq. 11) e partindo da hipótese da incompressibilidade, onde qualquer taxa de variação da densidade (ρ) é nula, podem-se rescrever as equações da seguinte forma:

$$\nabla \cdot (U) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\nu \nabla u) + S_x \quad (8)$$

$$\frac{\partial(v)}{\partial t} + \nabla \cdot (vU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\nu \nabla v) + S_y \quad (9)$$

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} + \nabla \cdot (wU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\nu \nabla w) + S_z \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (UT) = \alpha (\nabla^2 T) \quad (11)$$

Como a taxa de variação da densidade é nula e a densidade de um fluido não pode ser zero, resta a Eq. (3) ser resumida na Eq. (7), as demais equações são obtidas colocando o ρ em evidência, dividindo todas as parcelas das equações por ρ e convertendo a viscosidade dinâmica (μ) em viscosidade cinemática (ν). Onde T é a temperatura, α é a difusividade térmica e ν é a viscosidade cinemática.

Considerando-se um caso mais geral, onde inclui-se a compressibilidade, as equações de conservação de massa, e quantidade de movimento (para uma variável apenas) ficariam na forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot \left[\underbrace{(\mu(\nabla u) + (\nabla u)^T)}_{= \nabla \cdot (\mu \nabla u), \text{ se } \mu = cte} - \underbrace{\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot U)}_{= 0, \text{ se incompressível}} \right] + \rho g \quad (13)$$

As duas últimas parcelas da Eq. (13) surgem pelo fato da consideração de um fluido compressível, onde $\nabla \cdot (U) \neq 0$, não podendo a parcela $-\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot U)I$ ser excluída da equação. O termo ρg é justamente a força de flutuação (empuxo) causada pela variação de densidade. Foi considerado que a variação de densidade de um fluido pode ser descrita na forma:

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \quad (14)$$

E substituindo a Eq. (14) na Eq. (13), tem-se:

$$\frac{\partial(\rho_0 + \Delta\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho_0 + \Delta\rho)U) = 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial((\rho_0 + \Delta\rho)u)}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho_0 + \Delta\rho)uU) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot \left[(\mu(\nabla u) + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot U) \right] + \underbrace{(\rho_0 + \Delta\rho)g}_{\text{Termo de flutuação}} \end{aligned} \quad (16)$$

Da mesma forma é possível obter as equações para as demais componentes das equações de quantidade de movimento. Observa-se o quão mais complexas são as equações se comparadas com as da hipótese de incompressibilidade (Eq. (7) a (10)). As Eq. (15) e (16), apesar de serem mais gerais que as descritas no início deste tópico, possuem um maior grau de não-linearidade, sendo necessário mais memória e capacidade de processamento para a sua solução (ALMEIDA, 2021).

A aproximação de Boussinesq é utilizada justamente para considerar as forças de flutuação, ao mesmo tempo em que simplifica o sistema de equações voltando o mesmo para a hipótese de incompressibilidade. A proposta dessa aproximação é desconsiderar a variação de densidade nos termos transientes e advectivos da equação, e considerá-la apenas no termo gravitacional (termo de flutuação).

Boussinesq propõe que o coeficiente de expansão térmica pode ser escrito em uma aproximação linear, descrita por:

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \approx -\frac{1}{\rho_0} \frac{\rho - \rho_0}{T - T_0} \quad (17)$$

Isolando o $\frac{\rho}{\rho_0}$, tem-se a aproximação da densidade em função da temperatura:

$$\frac{\rho}{\rho_0} \approx [1 - \beta(T - T_0)] \quad (18)$$

Considerando a densidade constante para os termos do lado esquerdo das Eq. (15) e (16), e consequentemente, considerando $\nabla \cdot (U) = 0$, como também a viscosidade dinâmica constante, e aplicando a aproximação no termo de flutuação, obtém-se as equações semelhantes às incompressíveis, com a adição apenas do termo de flutuação.

$$\nabla \cdot (U) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\nu \nabla u) + [1 - \beta(T - T_0)]g \quad (20)$$

De forma análoga, as equações podem ser obtidas para as demais componentes.

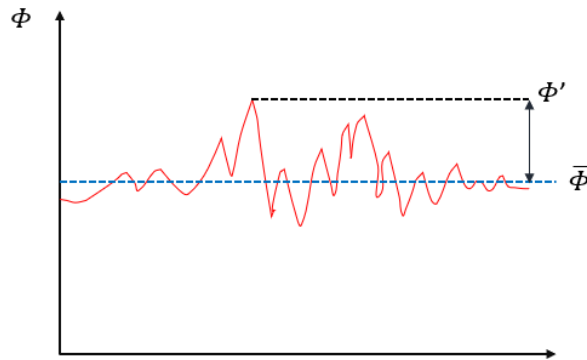
4.4.1 Modelo de Turbulência RANS

As múltiplas escalas, aleatoriedade, tridimensionalidade e o fato de ser extremamente anisotrópico confere a turbulência muita complexidade, por isso, se faz necessário a utilização de modelos de turbulência que facilitem a solução das equações governantes nesse regime.

O modelo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) é uma das formas de se modelar a turbulência. Baseia-se em resolver o comportamento médio das variáveis do escoamento no regime turbulento. Nesse modelo, considera-se que o valor das

variáveis flutua em torno dos seus valores médios, conforme apresenta-se na Figura 7.

Figura 7 - Flutuações das propriedades físicas.



Fonte: Autor (2023).

Considerando Φ como uma variável qualquer do escoamento, como velocidade ou pressão por exemplo, ela seria descrita em termos de seu valor médio somado as suas flutuações instantâneas:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (21)$$

Considerando que a variável genérica Φ pode ser, por exemplo a velocidade, teremos:

$$u = \bar{u} + u' \quad (22)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (23)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (24)$$

$$U = \bar{U} + U' \quad (25)$$

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), ao substituir as equações médias, (22) a (25), nas equações instantâneas gerais do escoamento, (7) a (10), tem-se cada parcela da equação da seguinte forma, para uma componente:

$$\nabla \cdot (U) = \nabla \cdot (\bar{U}) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (27)$$

$$\overline{\nabla \cdot (uU)} = \nabla \cdot (\bar{u}\bar{U}) + \nabla \cdot (\overline{u'U'}) \quad (28)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \quad (29)$$

$$\overline{\nabla \cdot (v \nabla u)} = \nabla \cdot (v \nabla \bar{u}) \quad (30)$$

Agrupando as parcelas:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}\bar{U}) + \nabla \cdot (\overline{u'U'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nabla \cdot (v \nabla \bar{u}) \quad (31)$$

Nota-se que a Eq. (31) é semelhante às equações gerais descritas anteriormente, porém com uma parcela a mais ($\nabla \cdot (\overline{u'U'})$). Essa parcela extra, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), é a que envolve os fenômenos turbulentos, associados à formação dos vórtices e transferência de momentos advectivos. O mesmo propõe que a Eq. (31) também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}\bar{U}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nabla \cdot (v \nabla \bar{u}) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (-\rho \overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{u'w'})}{\partial x} \right] \quad (32)$$

A última parcela da equação (32) é conhecida como tensor de tensões de Reynolds. De forma análoga ao descrito acima, é possível obter as equações para as demais componentes e para a equação de energia. As equações na forma da Eq. (32) são as equações médias de Reynolds de Navier-Stokes.

4.4.1.2 Hipótese de Boussinesq e o Modelo $k - \varepsilon$

Dos modelos de turbulência utilizados, o $k - \varepsilon$ é um dos mais utilizados e validados. Tal modelo se baseia na suposição de que existe uma analogia entre a ação de tensões viscosas e as tensões de Reynolds no fluxo médio (Versteeg e Malalasekera, 2007). A lei da viscosidade de Newton propõe que as tensões viscosas são proporcionais às taxas de deformação do fluido, de forma que, para um fluido incompressível:

$$\tau_{ij} = \mu S_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (33)$$

Boussinesq, em 1887, propôs que as tensões de Reynolds poderiam ser proporcionais às taxas médias de deformação:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k \delta_{ij}) \quad (34)$$

Onde k = é a energia cinética, μ_t = é a viscosidade turbulenta e δ_{ij} = é o delta de Kronecker.

É importante notar que a viscosidade turbulenta é uma característica do escoamento e não da matéria (como a viscosidade molecular), dependendo fortemente dos níveis de turbulência, e podendo variar significativamente dentro de um mesmo escoamento, seja em diferentes tempos ou localizações do domínio. Além disso, para o modelo $k - \varepsilon$ considera-se que a viscosidade turbulenta é a mesma em todas as direções e componentes do tensor de Reynolds, o que a princípio não é verdadeiro, visto que a turbulência é altamente anisotrópica, porém, essa consideração é uma simplificação, e apesar disso, tal simplificação ainda é utilizada por vários modelos (POPE, 2000; SOUZA *et al.*, 2011). O modelo $k - \varepsilon$ propõe calcular a viscosidade turbulenta a partir da equação:

$$\mu_t = C_\mu \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (35)$$

onde, ε é a taxa de dissipação da energia cinética e C_μ é uma constante do modelo. O modelo possui duas equações de transporte, a primeira é a equação da energia cinética turbulenta, e a segunda é a equação de dissipação de energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \bar{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (36)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (37)$$

Como pode ser observado, as equações possuem cinco constantes: C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$. As constantes para a maioria dos escoamentos são definidas como:

Quadro 2 - Constantes do modelo $k - \varepsilon$

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
0,09	1,0	1,3	1,44	1,92

Fonte: Launder e Spalding (1974)

4.4.2 Funções de parede

Por mais que a velocidade de um escoamento seja alta, nas proximidades da parede as características de escoamento tendem a se comportar de forma laminar devido à baixa velocidade causada pelas condições de não escorregamento próximas à superfície.

Nos modelos RANS, captar os efeitos predominantemente viscosos nas proximidades da parede requer uma certa atenção nos elementos próximos a essa região. Um critério utilizado para determinar o quão boa uma malha é para ser capaz de capturar esses fenômenos é o y^+ (Eq. 38).

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u^*}{\mu} \quad (38)$$

Onde:

ρ – densidade do fluido;

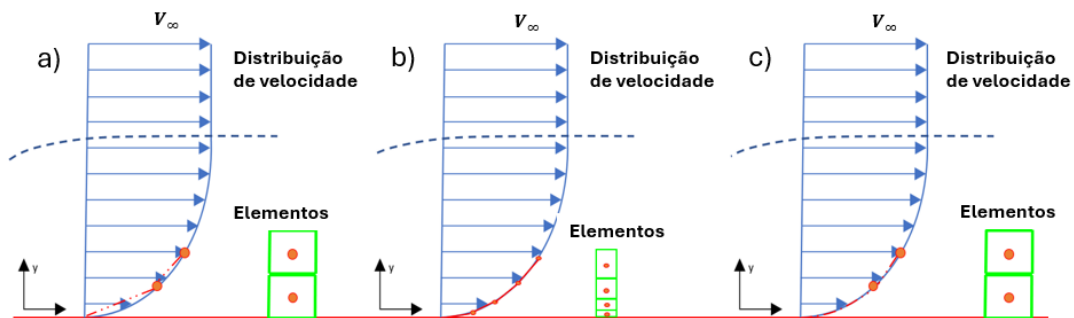
Δy – distância do primeiro ponto da malha até a parede;

u^* – velocidade de fricção na parede;

μ – viscosidade dinâmica.

De forma resumida, o y^+ é um número adimensional relacionado ao tamanho do primeiro elemento em contato com a parede, indicando a qualidade da malha nessa região. Na Figura 8, é representado um desenho de um perfil de velocidade mostrando de forma simplificada o conceito de função de parede.

Figura 8 - Perfil de camada limite e funções de parede



Fonte: Autor (2022).

Pode-se observar na Figura 8 (a), que ter um elemento muito grande na proximidade da parede gera um alto erro na aproximação entre o perfil de velocidade e a interpolação linear adotada entre o centroide do elemento e a superfície da parede, comprometendo assim a captura eficiente da subcamada viscosa.

Aumentar a quantidade de elementos na região seria uma solução, como pode ser visto em Figura 8 (b), dessa forma, a interpolação linear ficaria próxima ao perfil de velocidade por conta da alta discretização, para que isso ocorra, é necessário um $y^+ \sim 1$. Porém, dois problemas surgem nessa abordagem. O primeiro, é que ter um $y^+ \sim 1$ requer um alto nível de refinamento de malha, podendo tornar inviável os

tempos de processamento. Segundo, que os modelos RANS (com exceção do $k-\omega$ SST) não trazem resultados satisfatórios com o modelo de integração direta para $y^+ \sim 1$ (BREDBERG, PENG E DAVIDSON, 2000). A solução então é obter uma aproximação não linear mesmo possuindo um elemento maior na superfície, por meio das funções ou leis de parede, conforme Figura 8 (c) e (Eq. 39):

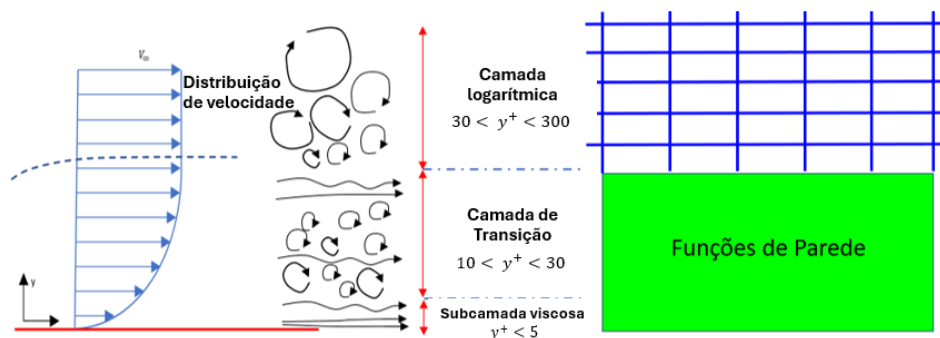
$$u^+ = \frac{\ln(y^+)}{K} + c \quad (39)$$

onde K é a constante de Von Kármán sendo igual 0,41 e c é uma constante de integração e igual a 5.

Em função das características a camada limite turbulenta pode ser dividida em função do y^+ (ver Figura 9), podendo ser classificada da seguinte forma, conforme Tennekes e Lumley (1972):

1. Subcamada viscosa: $0 < y^+ < 5$;
2. Camada de transição: $5 < y^+ < 30$;
3. Camada Logarítmica: $30 < y^+ < 300$.

Figura 9 - Camadas do perfil de camada limite turbulenta



Fonte: Adaptado de Guerrero (2015).

4.5 .O OpenFOAM

O OpenFOAM é um programa de licença pública (GPL), desenvolvido em C++ e que possui diversos *solvers* para diversos tipos de problemas físicos, como escoamentos compressíveis e incompressíveis, monofásicos e multifásicos, isotérmicos e não isotérmicos, além de bibliotecas para problemas envolvendo eletromagnetismo, combustão, análise de tensão e esforços para a mecânica dos sólidos etc.

Uma das características do OpenFOAM, além de ser livre de licenças pagas, é a possibilidade de ter total acesso aos códigos fontes dos solucionadores, sendo possível verificar o funcionamento dos mesmos a nível de programação, como também modificar ou implementar novos códigos para resolver problemas que porventura não venham implementados no próprio OpenFOAM. Apesar de bastante completo, ainda recebe diversas contribuições de diversos pesquisadores, tendo sua biblioteca constantemente atualizada com melhorias relacionadas as mais diversas áreas da engenharia.

Porém, uma das principais desvantagens do OpenFOAM é a inexistência de uma interface gráfica amigável ao usuário, sendo boa parte das etapas da simulação realizados por linhas de comando no terminal do usuário ou em arquivos de texto a serem lidos pelo programa. Tornando assim, a fase inicial e os primeiros contatos com a utilização do programa um pouco mais dificultosos. Tal desvantagem não é encontrada em *softwares* comerciais, como o ANSYS CFX, ANSYS Fluent ou PHOENICS por exemplo, que além de uma interface que facilita a operação do programa, disponibilizam um suporte dedicado ao usuário, no entanto, eles possuem menos flexibilidade na customização, implementação e verificação dos códigos fontes.

Porém, o fato do OpenFOAM ser *open-source*, traz possibilidades inclusive que facilitam a operação do usuário. Kim *et al.* (2020), desenvolveram uma interface mais amigável (*user-friendly*) para não especialistas em CFD utilizando o OpenFOAM, juntamente com as ferramentas de geração de malha *snappyHexMesh*, e visualização *ParaView*. A proposta desse trabalho é tornar o CFD mais acessível para engenheiros que não são necessariamente especialistas na área, de forma que a interface desenvolvida torna mais fácil e intuitivo a geração da malha, aplicação das condições de contorno e visualização dos resultados.

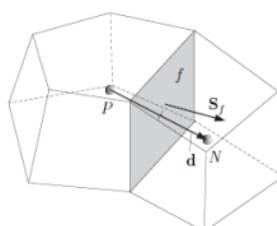
OpenFOAM já possui em sua biblioteca nativa os principais modelos de turbulência (LES, DES e RANS) implementados. Atualmente os dois modelos principais para a modelagem de turbulência que vêm sendo utilizados são o LES (Smagorinsky, 1963) e o RANS. No contexto de ventilação cruzada observa-se que o modelo RANS tem sido utilizado com mais frequência, o mesmo possui um menor tempo de processamento se comparado com o modelo LES. Deve-se destacar que o segundo geralmente apresenta resultados melhores quando analisadas as principais variáveis, apesar do LES ter um tempo de processamento muito maior em relação aos modelos RANS.

Devido ao custo computacional, alguns casos tornam-se inviáveis a utilização do modelo LES (HOOF, BLOCKEN E TOMINAGA, 2017; AI e MAK, 2014). Dessa forma, será utilizado nesse trabalho o modelo RANS $k-\varepsilon$ padrão, que é amplamente utilizado para estudos de ventilação cruzada e em meios urbanos (BLOCKEN, 2018; SAKIYAMA *et al.*, 2020) possuindo tempos de processamento reduzidos, possibilitando assim, a execução de domínios mais complexos e com maiores quantidades de volumes.

O OpenFOAM é baseado na abordagem do método dos volumes finitos, onde o domínio é discretizado em volumes finitos de controle e as equações diferenciais são discretizadas e resolvidas na forma de um sistema de equações algébricas, em que número de equações está relacionado a quantidade de variáveis do escoamento, e o número de elementos (ou volumes) em que foi dividido o domínio.

Na Figura 10, apresenta-se um modelo genérico de dois volumes finitos, onde P e N são os centroides de cada volume, f é face entre os dois volumes, S_f é o vetor normal à superfície f , e d é distância entre os dois centroides P e N .

Figura 10 - Volumes Finitos.



Fonte: USER GUIDE OPENFOAM, 2015.

Criado os volumes finitos do domínio, as equações são integradas no centroide de cada elemento, e interpoladas para a face da célula. Assim, observa-se que, dessa forma, o método transforma as equações gerais do escoamento em um fluxo de superfície avaliando os gradientes nos centroides dos volumes (MOUKALLED, MANGANI e DARWISH, 2015).

Versteeg e Malalasekera (2007) propõe que, para uma variável geral e qualquer do escoamento Φ a taxa de fluxo dentro de um volume finito pode ser expressa como ilustrado na Figura 11:

Figura 11 - Conservação de uma variável dentro de um volume de controle.

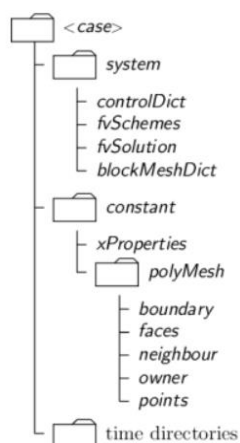
$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{Taxa de} & & \text{Taxa líquida de} & & \text{Taxa líquida de} & & \text{Taxa líquida de} \\
 \text{variação de } \Phi & & \text{variação de } \Phi & & \text{variação de } \Phi & & \text{variação de } \Phi \\
 \text{no volume de} & & \text{devido à} & & \text{devido à} & & \text{devido o termos de} \\
 \text{controle em} & = & \text{advecção no} & + & \text{difusão no} & + & \text{fonte no volume de} \\
 \text{relação ao} & & \text{volume de} & & \text{volume de} & & \text{controle.} \\
 \text{tempo.} & & \text{controle.} & & \text{controle.} & &
 \end{array}$$

Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007).

4.5.1 Estrutura de uma simulação

Os casos simulados seguem um padrão de diretórios, que deve conter o mínimo de arquivos e estruturação para se iniciar uma simulação. Esses diretórios possuem arquivos de formato .txt, onde contém as informações básicas e iniciais do problema, como propriedades do fluido, condições de contorno, *solver* a ser utilizado, malha etc. Na Figura 12, mostra-se uma estrutura básica de diretórios para uma simulação.

Figura 12 - Estrutura de diretórios.



Fonte: Guia do Usuário, OpenFOAM.

A estrutura básica, também chamada comumente de pasta raiz, contém os diretórios, *system*, *constant*, e os diretórios de tempo:

- *constant*: nessa pasta constam as informações da malha, geometria e domínio computacional, como também as propriedades físicas do escoamento, como viscosidade, gravidade, número de Prandtl etc.
- *system*: contém os arquivos com parâmetros de controle da simulação, como a discretização numérica, critérios de convergência, tempos de início e término da simulação etc. Basicamente, possui quatro arquivos: o *controlDict*, que possui o controle da simulação, tempo de início e final, intervalo de tempo de gravação dos resultados e passo de tempo; *blockMeshDict*, que seria a malha da geometria e domínio; *fvSchemes*, onde se organiza os procedimentos de discretização do problema; e o *fvSolutions* que seleciona os métodos para resolver o sistema de equações lineares e as tolerâncias.
- Diretórios de tempo: inicialmente na pasta “0” contendo as condições de contorno, como velocidade, pressão, temperatura, condições de velocidade zero nas paredes etc. Ao decorrer da simulação outras pastas vão sendo criadas pelo próprio OpenFOAM, onde cada pasta com seu respectivo número (agora diferente e maior que “0”),

corresponde as mesmas variáveis da pasta “0”, porém resolvidas e calculadas pelo programa, o intervalo de tempo em que essas pastas são gravadas é definido no arquivo *controlDict*, na pasta *system*.

4.5.2 Esquemas de discretização numérica

No OpenFOAM, os modelos de discretização são definidos no arquivo *fvSchemes*. No Quadro 3, apresentam-se as categorias existentes no OpenFOAM.

Quadro 3 - Esquemas de discretização.

Palavra-Chave	Definição ou operador matemático
<i>interpolationSchemes</i>	Interpolação ponto-a-ponto de valores
<i>snGradSchemes</i>	Componente do gradiente normal a face da célula
<i>gradSchemes</i>	Gradiente ∇
<i>divSchemes</i>	Divergente $\nabla \cdot$
<i>laplacianSchemes</i>	Laplaciano ∇^2
<i>timeScheme</i>	1ª e 2ª derivadas temporais $\frac{\partial}{\partial t}$ e $\frac{\partial^2}{\partial^2 t}$

Fonte: Adaptado do Guia do Usuário, OpenFOAM.

- i. *interpolationSchemes*: contém o esquema de interpolação entre o centroide do volume e a o centro de suas faces, para todos os casos utilizou-se a interpolação do tipo *linear*.
- ii. *snGradSchemes*: Surface normal gradient schemes, está relacionado à não ortogonalidade dos volumes da malha. O OpenFOAM considera a malha ortogonal se o vetor normal da superfície entre dois volumes estiver na mesma direção do vetor que conecta os dois centroides destes dois volumes vizinhos, caso isso não ocorra é considerada não ortogonal. Em malhas estruturadas, geralmente ocorre o caso de malha ortogonal, já no caso de malhas não estruturadas ocorre o caso da não ortogonalidade. O *snGradSchemes* avalia o gradiente normal a superfície do volume das faces que se conectam, a opção *uncorrected*

não considera nenhuma correção de não ortogonalidade, a opção *corrected* considera a correção da não ortogonalidade. Para o caso das cavidades aquecidas adotou-se a opção *uncorrected* pelo fato de malha ser totalmente estruturada, para os demais casos foi considerada a opção *corrected*.

- iii. *gradSchemes*: Está relacionada à discretização e resolução dos termos gradientes (∇). Para os casos estudados nesse trabalho foi utilizada a integração Gaussiana Linear de segunda ordem (*Gauss Linear*).
- iv. *divSchemes*: Está relacionada à discretização e resolução dos termos divergentes ($\nabla \cdot$). Para todos os casos foi considerada a integração Gaussiana junto com o esquema de interpolação *linearUpwind* (*Gauss linearUpwind*).
- v. *laplacianSchemes*: Está relacionada à discretização e resolução dos termos laplacianos (∇^2). Utiliza-se a integração Gaussiana com o esquema de interpolação linear acrescido do método de correção utilizado no *snGradSchemes*. Dessa forma, para o caso das cavidades aquecidas utilizou-se o *Gauss Linear uncorrected*, e para os demais casos, *Gauss Linear corrected*.
- vi. *timeScheme*: Está relacionada às discretizações temporais, para os casos transientes utilizou-se o método *CrankNicolson*, e para os casos estacionários o *steadyState*.

4.5.3 Algoritmos de acoplamento

Os dois sistemas de acoplamento utilizados neste trabalho foram o SIMPLE - *Semi-Implicit Method Pressure-Linked Equations* - (PATANKAR e SPALDING., 1972) e o PISO - *Pressure Implicit with Splitting of Operators* – (ISSA, 1986). O SIMPLE é utilizado para escoamentos turbulentos, estacionários e incompressíveis, por sua vez; o algoritmo PISO emprega-se para escoamentos turbulentos, transientes e incompressíveis.

O algoritmo SIMPLE (*simpleFoam*) relaciona a correção da velocidade com a correção da pressão a partir da equação da conservação de quantidade de movimento. O método determina o campo de velocidade a partir de um campo de

pressão estimado inicialmente. É utilizado um campo de pressão inicial para resolver as equações de quantidade de movimento e a partir da equação de conservação de massa é obtida a equação de correção da pressão, obtendo-se um campo de pressões corrigidos, de onde são calculados os campos de velocidade. A tendência é que com o avanço das iterações o resultado tenda a convergir.

O algoritmo PISO (*pisoFoam*), também determina os campos de velocidade a partir dos campos de pressão estimado inicialmente. Ele se baseia no mesmo princípio do SIMPLE, porém com dois níveis de correção da pressão, o que tende a gerar uma melhor estimativa dos campos de velocidade e pressão se comparado ao SIMPLE.

As configurações relacionadas aos dois algoritmos devem ser definidas no arquivo *fvSolutions*. Nele, é definido a tolerância de parada das iterações, solucionador de cada algoritmo, coeficientes de relaxação etc. A tolerância para todos os casos estudados nesse trabalho foi de 10^{-4} para todas as variáveis, o solucionador utilizado para resolver os sistemas lineares para os casos resolvidos com o SIMPLE foi o GAMG (*Generalised geometric-algebraic multi-grid*) para a variável pressão, e para as outras variáveis (velocidade, temperatura, k , ϵ) foi utilizado o *smoothSolver*. Para o caso resolvido com o PISO foi utilizado o PCG (*Preconditioned Conjugate Gradient*) para a variável pressão. Para as outras variáveis (velocidade, temperatura, k , ϵ) foi utilizado o solver PBiCG (*Preconditioned bi-conjugate gradient*).

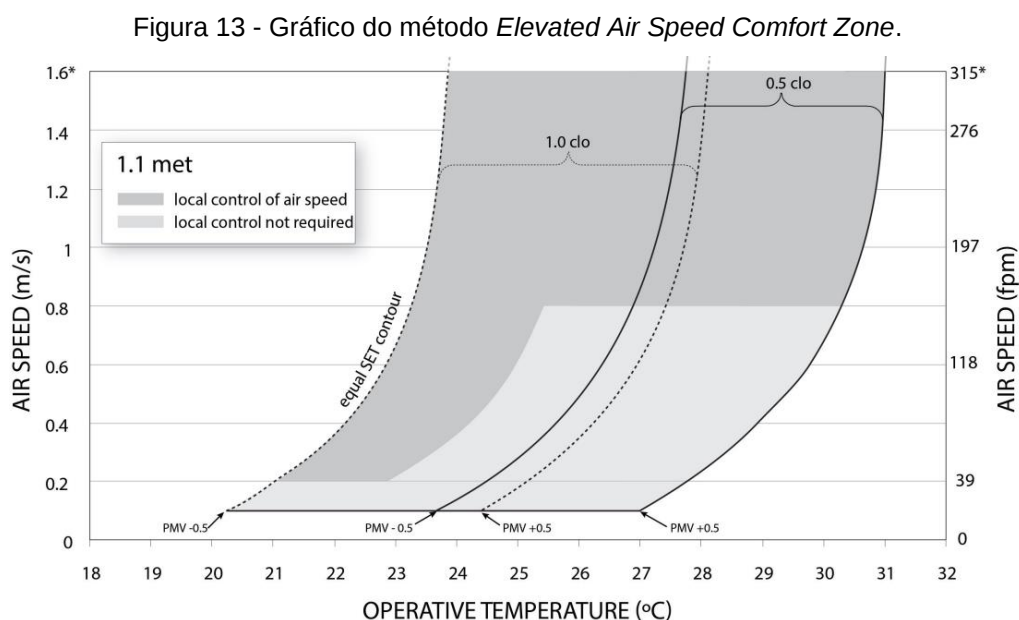
O coeficiente de relaxação é um valor que varia entre zero e um, esse coeficiente é utilizado para evitar grandes diferenças de valores entre iterações, evitando problemas de convergência. Geralmente utiliza-se os valores de 0,3 para a pressão e 0.7 para as demais variáveis. Esses valores funcionaram bem para todas as simulações, exceto para o caso do Conjunto Habitacional, onde os resultados não convergiam, e após alguns passos de iteração divergiam causando instabilidade e a parada da simulação. Para resolver, foi utilizado os coeficientes de relaxação 0,3 para a pressão e 0.5 para as demais variáveis.

Quanto menor o valor do coeficiente de relaxação menor a chance de se ter problemas com convergência e possíveis instabilidades, porém um valor muito baixo pode acarretar a necessidade de mais iterações para alcançar a tolerância definida,

dessa forma, é importante avaliar quais valores desses coeficientes utilizar para cada caso.

4.5.4 Critérios para caracterização de conforto térmico

Para definir os critérios de conforto térmico, foi utilizado método *Elevated Air Speed Comfort Zone* proposto pela ASHRAE (2017), que é baseado em um gráfico onde se localizam as faixas de conforto térmico para várias situações, conforme Figura 13. Esse método é recomendado para situações em que se possui velocidades médias internas de ar superiores a 0.2m/s.



O método considera as variáveis de temperatura operativa, velocidade de vento, vestimentas dos ocupantes (*clo*) e tipo de atividade exercida (*met*), sendo adotado no presente trabalho um valor de 1.1, que representa o metabolismo de um ocupante sentado ou deitado, exercendo atividades de pouco esforço físico, como lendo, digitando ou escrevendo. A parte cinza escura representa ambientes que possuem controle da velocidade do ar, sendo o controle para cada 6 ocupantes ou no máximo a cada 84 m². O controle da velocidade do ar deve ser em intervalos de no máximo a cada 0.25m/s. A parte em cinza claro representa ambientes em que os ocupantes não possuem controle de velocidade ar. (LAMBERTS *et al.*, 2013)

A Figura 13 representa o gráfico de zonas de conforto para uma umidade relativa do ar de 61%, porém, no site <https://comfort.cbe.berkeley.edu/> é possível gerar gráficos para diversos valores de umidade relativa.

Para o caso do presente trabalho, considerou-se o *clo* como sendo 0.5, o que representa conjuntos de roupas leves, como camiseta, shorts ou saias, sandálias e roupas íntimas masculinas e femininas. Para caracterizar o metabolismo e vestimenta considera-se um edifício residencial, não possuindo cargas de trabalho que demandem esforço físico, nem vestimentas que causem grande isolamento térmico. Considerou-se, também, que o ambiente não possui controle da velocidade do ar, sendo o gráfico dessa forma resumido a apenas a parte cinza claro entre as faixas de *clo* 0.5 (ver Figura 13). Para mais informações a respeito dos índices *clo* e *met*, consultar ASHRAE Standard 55 (2017).

A temperatura operativa é obtida por meio da Eq. (40):

$$T_o = A T_a + (1 - A) T_r \quad (40)$$

onde, T_o é a temperatura operativa, A é um valor obtido em função da velocidade média do vento (V_a) (Figura 14), T_a temperatura média do ar, e T_r é a temperatura radiante média. A temperatura radiante média foi calculada conforme descrito em ASHRAE Handbook— Fundamentals (2021), no Capítulo de Conforto Térmico. A velocidade média do vento e temperatura média do ar foram obtidas por meio dos resultados das simulações.

Figura 14 - Tabela de valores para a variável A .

V_a	<0.2 m/s (<40 fpm)	0.2 to 0.6 m/s (40 to 120 fpm)	0.6 to 1.0 m/s (120 to 200 fpm)
A	0.5	0.6	0.7

Fonte: ASHRAE (2017).

5 CASOS ESTUDADOS

O trabalho foi desenvolvido no LECOM (Laboratório de Engenharia Computacional), localizado na UFPE – CAA, onde diversos trabalhos relacionados com escoamentos em meio urbano vêm sendo realizados nos últimos anos. Por exemplo, Nascimento (2019) e Almeida (2023) que utilizaram o OpenFOAM para estudar a aerodinâmica de edificações para fins de ventilação natural, e Cavalcante (2019) para e estudar aero geração de energia.

CFD é uma grande ferramenta para resolver escoamentos em meios urbanos, porém, apresenta algumas dificuldades, uma delas são os tempos de processamento. O tamanho e complexidade do domínio, como também a quantidade de volumes em relação à capacidade computacional acessível aos projetistas, podem tornar as simulações inviáveis.

Visando analisar os tempos de processamento e com o intuito de reduzir os custos computacionais nas análises dos arranjos de edificações, foram considerados quatro solucionadores capazes de resolver o escoamento em meios urbanos. Dois desses solucionadores já existem na biblioteca de *solvers* do OpenFOAM e os outros dois foram adaptados para resolver a equação de energia junto com as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, conforme listado abaixo:

1. *buoyantBoussinesqPimpleFoam*: Solucionador nativo do OpenFOAM para um problema transiente, incompressível, turbulento, escoamentos não isotérmicos, com efeitos de convecção natural.
2. *buoyantBousinesqSimpleFoam*: Solucionador nativo do OpenFOAM para um problema estacionário, incompressível, turbulento, escoamentos não isotérmicos, com efeitos de convecção natural.
3. *pisoThermo*: adaptação do *pisoFoam* para um problema transiente, incompressível, turbulento, não isotérmico, sem efeitos de convecção natural.
4. *simpleThermo*: adaptação do *simpleFoam* para um problema estacionário, incompressível, turbulento, não isotérmico, sem efeitos de convecção natural.

Os solucionadores *pisoThermo* e *simpleThermo* foram implementados a partir dos *solvers pisoFoam* e *simpleFoam* (já existentes na biblioteca do OpenFOAM), adicionando-se a equação de energia em conjunto com as equações de conservação de massa e quantidade de movimento (Eq. (7) à Eq. (11) já descritas na Seção 4.4), excluindo-se as derivadas temporais para o *solver* estacionário (*simpleThermo*). O código de ambos encontra-se no Anexo I.

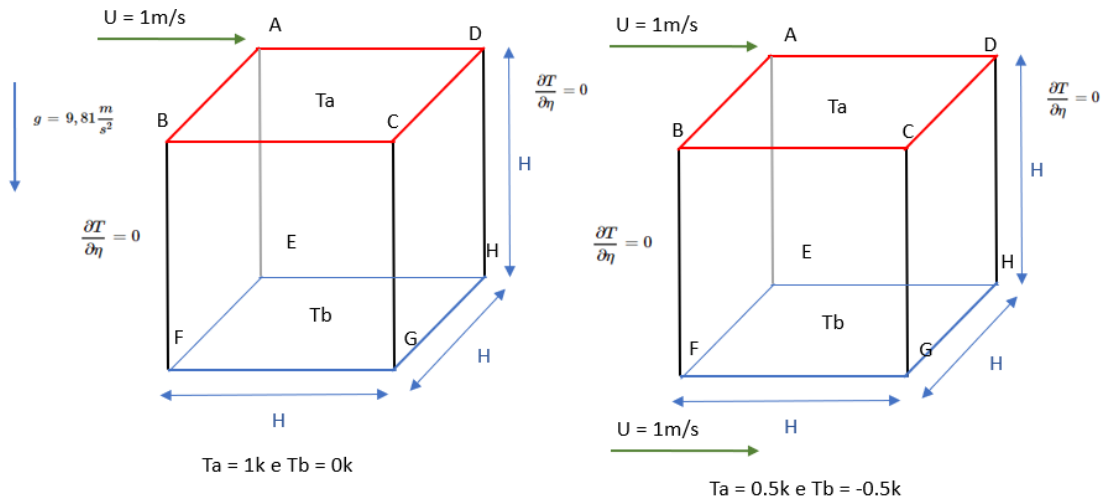
Os solucionadores *buoyantBoussinesqPimpleFoam* e *buoyantBoussinesqSimpleFoam*, solucionam as mesmas equações dos solucionadores citados anteriormente, porém, considerando termo da aproximação de Boussinesq ($[1 - \beta(T - T_0)]g$) no lugar da força de campo da equação de quantidade de movimento. A aproximação de Boussinesq, também conhecida como termo de flutuação, é a que simula os efeitos de convecção natural. Lembrando que o termo de flutuação age na componente definida pelo usuário ao determinar a direção da aceleração gravitacional.

Com os quatro *solvers* citados, foi realizado um estudo de validação e comparação, considerando os resultados e os tempos de processamentos, observando-se assim, o custo-benefício dos solucionadores.

5.1 Casos de Validação

Inicialmente serão estudados dois modelos tridimensionais, o primeiro é o caso da cavidade aquecida 3D (Cavidade 1) estudado por Iwatsu (1995) e um segundo modelo de cavidade 3D (Cavidade 2) estudado por Ouertatani (2009). Esses dois modelos tridimensionais têm como finalidade validar os códigos considerados no trabalho (*buoyantBoussinesqPimpleFoam*, *buoyantBoussinesqSimpleFoam*, *pisoThermo* e *simpleThermo*), como também avaliar qual deles tem o melhor custo-benefício entre tempo de processamento e resultados. Um desenho esquemático do modelo 3D analisado mostra-se na Figura 15.

Figura 15 - Domínio e condições de contorno para o problema da Cavity 1 e Cavity 2, respectivamente.



Fonte: Autor (2023).

Nesses dois modelos, existe uma diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior, sendo a superfície superior aquecida. Na Cavity 1, prescreve-se na superfície superior uma velocidade unitária e as demais paredes são consideradas sólidas, na Cavity 2, prescreve-se a velocidade unitária nas superfícies superior e inferior, e as demais paredes são sólidas. Em ambos os casos as paredes laterais são adiabáticas. No Quadro 4, apresentam-se as condições de contorno empregadas no OpenFOAM.

Quadro 4 - Condições de contorno aplicadas nos problemas das Cavidades 1 e 2.

Faces	Veloc. x	Veloc. y	Veloc. z	Pressão	Temp.
ABCD	$u = 1 \frac{m}{s}$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 1K$
ABFE	$u = 0$	$u = 0$	$u = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\nabla(T) = 0$
BCFD	$u = 0$	$u = 0$	$u = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\nabla(T) = 0$
CDHG	$u = 0$	$u = 0$	$u = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\nabla(T) = 0$
DAEH	$u = 0$	$u = 0$	$u = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\nabla(T) = 0$
EFGH	$u = 0$ (Cavidade 1) $u = 1 \frac{m}{s}$ (Cavidade 2)	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 0K$

Fonte: Autor (2023).

As características do fluido para ambos os casos foram: Número de Prandtl $P_r = 0,71$; número de Prandtl turbulento $P_{rt} = 0,85$; viscosidade cinemática $\nu = 0,0025 \frac{m^2}{s}$ e coeficiente de expansão térmica $\beta = 0,000102$.

5.2 Casos em ambientes urbanos

Para análise dos efeitos térmicos em ambientes urbanos foram realizadas simulações numéricas de geometrias baseadas nos exemplos de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). Inicialmente, foi realizada uma simulação tridimensional de um modelo simplificado de edificação com duas aberturas (caso Karava 3D), conforme mostra-se nas Figuras 16 e 17. Com esse caso também será possível realizar a validação do solucionador utilizado nas simulações.

Posteriormente, foram realizadas 12 simulações considerando um exemplo bidimensional do modelo 3D de Karava (caso Karava 2D), baseados nos casos propostos por Nascimento (2019), conforme Figuras 18 e 19. No entanto, neste trabalho será adicionado a variável de temperatura no escoamento, observando-se, portanto, os efeitos térmicos.

Por fim, será simulado um modelo 3D de uma casa proposta originalmente por Eli e Lamberts *et. al* (2021), onde será considerado um arranjo de 9 edificações (Caso Conjunto Habitacional). Em todos os casos citados será considerada a variável temperatura no escoamento, observando-se, portanto, os efeitos térmicos.

Vale salientar que os valores das temperaturas das superfícies empregadas, tanto para os casos de Karava 3D, Karava 2D e Conjunto habitacional, tiveram como referência o trabalho de Souza e Otto *et al.* (2019) e Neto (2015), onde mensuram temperaturas em superfícies de concreto e pavimento em relação à temperatura do ar ambiente.

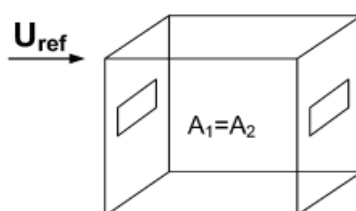
5.2.1 Casos Karava 2D e Karava 3D

Nesses casos serão realizadas simulações numéricas de geometrias baseadas nos exemplos de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). Será realizada uma simulação tridimensional de um modelo simplificado de edificação com duas aberturas

conforme Figuras 16 e 17, e 12 modelos de uma simplificação bidimensional do modelo 3D de Karava, baseados nos casos propostos por Nascimento (2019), conforme Figura 18 e Figura 19.

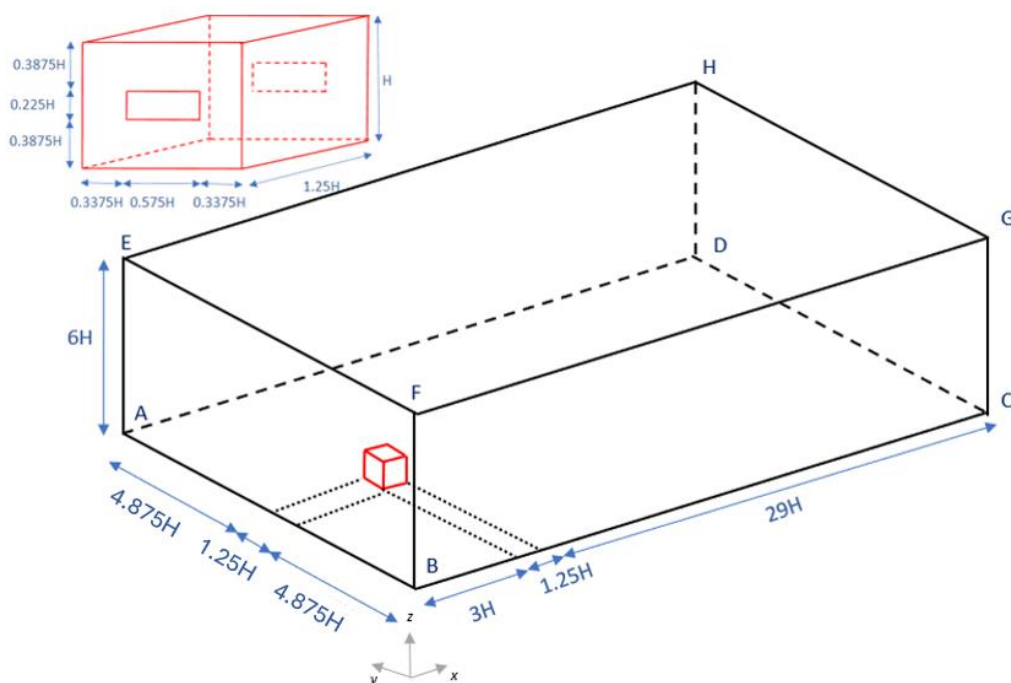
Nestes exemplos, foram aquecidas as superfícies das paredes dos cubos (externamente e internamente). A temperatura ambiente foi considerada como 30°C (303,15K), as temperaturas das superfícies dos cubos 60°C (333,15K) e o solo foi mantido à temperatura ambiente, a espessura das paredes e tetos é 0,002H.

Figura 16 - Geometria para o problema de Karava 3D.



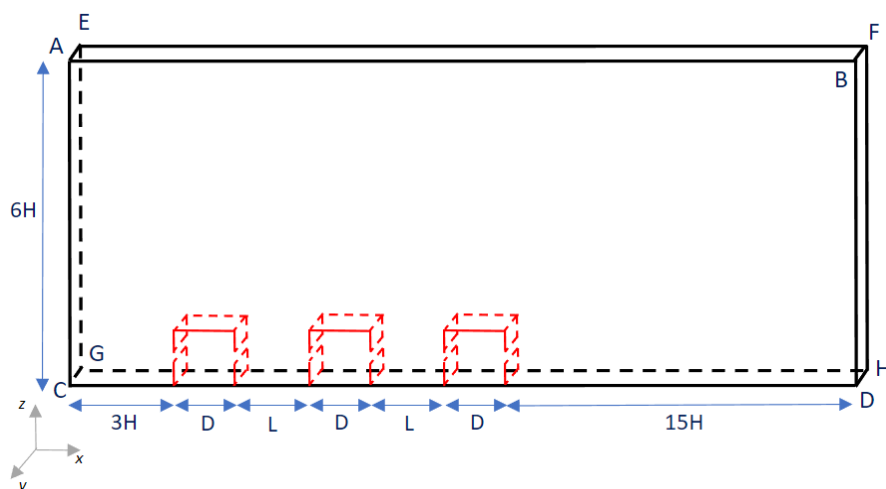
Fonte: Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011).

Figura 17 - Domínio e geometria para o problema proposta de Karava 3D com geometria aquecida.



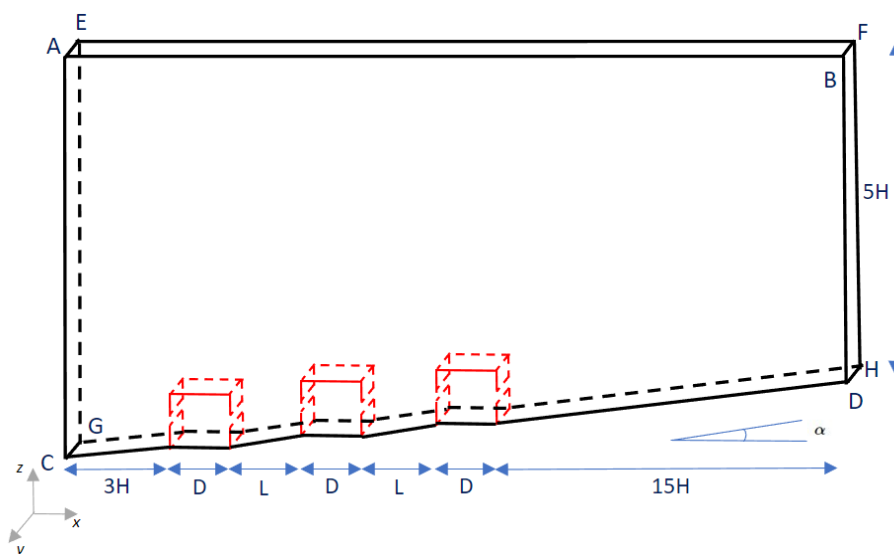
Fonte: Autor (2023).

Figura 18 - Domínio do caso de Karava 2D, com geometrias aquecidas.



Fonte: Autor (2023).

Figura 19 - Domínio do caso de Karava 2D, com geometrias aquecidas e com inclinação.



Fonte: Autor (2023).

O exemplo proposto por Nascimento (2019) (Figuras 18 e 19), consistem em 3 geometrias bidimensionais semelhantes às estudadas por Karava *et al.* (2011), entretanto, apresentando uma distribuição em série. No estudo alterou-se, além da distância entre as edificações a inclinação do terreno. A distância horizontal entre as geometrias é definida em função do comprimento D. Testaram-se quatro distâncias

(L) e três diferentes inclinações de terreno (α). No Quadro 5, detalham-se as diferentes configurações simuladas e suas respectivas identificações.

Quadro 5 - Inclinações e distanciamentos para os casos de Karava 2D.

Ângulo	L			
α	1D	2D	3D	4D
0°	A1	A2	A3	A4
5°	B1	B2	B3	B4
10°	C1	C2	C3	C4

Fonte: Autor (2023).

Nos Quadros 6 e 7, mostram-se as condições de contorno aplicadas, para o caso do exemplo de Karava 2D.

Quadro 6 - Condições de contorno aplicadas para os casos de Karava 2D.

Faces	Veloc. x	Veloc. y	Veloc. z	Pressão	Temp.
ABDC	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>
EFHG	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>
ACGE	$u = u(z)$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\nabla(T) = 0$
BDHF	$\nabla(u) = 0$	$\nabla(v) = 0$	$\nabla(w) = 0$	$p = 0$	$\nabla(T) = 0$
AEFB	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
CGHD	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 303.15k$
Edificações	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 333.15k$

Fonte: Autor (2023).

Para os casos de Karava 3D e Karava 2D, prescreve-se o perfil de velocidade na entrada do domínio ($u = u(z)$) segundo a lei logarítmica proposta por Richards e Hoxey (1993):

$$u(z) = \frac{u_{ABL}}{k} \ln \left(\frac{z_0 + z}{z_0} \right) \quad (41)$$

onde, $u(z)$ é velocidade do vento em função da altura, z é a altura em relação ao solo, u_{ABL} é a velocidade de fricção, z_0 é a altura rugosa e k é a constante de von Kármán, comumente adota-se 0.42.

As condições de contorno para a modelagem da turbulência, utilizando-se o modelo RANS $k - \varepsilon$ padrão (LAUNDER E SPALDING, 1974), são mostradas no Quadro 7.

Quadro 7 - Condições de contorno para as variáveis da turbulência no caso de Karava 2D.

Faces	k	ε	μ
ABDC	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>
EFHG	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>
ACGE	$k = k(z)$	$\varepsilon = \varepsilon(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
BDHF	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
AEFB	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
CGHD	função de parede	função de parede	função de parede
Edificações	função de parede	função de parede	função de parede

Fonte: Autor (2023).

A energia cinética e a taxa de dissipação aplicadas na entrada do domínio (face ACGE), são definidas conforme as equações:

$$k(z) = 0,33[u(H)]^2 \exp^{-0,32\left(\frac{z}{H}\right)} \quad (42)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{(u_{ABL})^3}{k(z + z_0)} \quad (43)$$

onde, H é a altura de referência.

Nos Quadros 8 e 9, apresentam-se as condições de contorno aplicadas para o caso Karava 3D. Os perfis de velocidade, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação são as mesmas utilizadas para o caso de Karava 2D.

Quadro 8 - Condições de contorno aplicadas para o caso de Karava 3D.

Faces	Veloc. x	Veloc. y	Veloc. z	Pressão	Temp.
AEFB	$u = u(z)$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\nabla(T) = 0$
CDHG	$\nabla(u) = 0$	$\nabla(v) = 0$	$\nabla(w) = 0$	$p = 0$	$\nabla(T) = 0$
AEHD	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
BFGC	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
EHGF	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
ADCB	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 303.15K$
Edificações	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 333.15K$

Fonte: Autor (2023).

Quadro 9 - Condições de contorno para as variáveis da turbulência no caso de Karava 3D.

Faces	k	ε	μ
AEFB	$k = k(z)$	$\varepsilon = \varepsilon(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
CDHG	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
AEHD	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
BFGC	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
EHGF	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
ADCB	função de parede	função de parede	função de parede
Geometria	função de parede	função de parede	função de parede

Fonte: Autor (2023).

Considera-se para as características do fluido os seguintes valores: número de Prandtl $Pr = 0,71$, número de Prandtl turbulento $Pr_t = 0,85$ e viscosidade cinemática $\nu = 0,000015 \frac{m^2}{s}$.

5.2.2 Caso do Conjunto Habitacional

Nesse caso, foi simulado um modelo 3D representativo de habitações de interesse social, ver Figura 20, levantado por Triana, Lamberts e Sassi (2015), para a faixa de renda de até dois salários mínimos. A residência possui 4 cômodos: dois quartos, sala e cozinha conjugados e banheiro. Esse modelo de habitação também foi estudado por Eli *et. al* (2021). No Anexo II, mostra-se a planta baixa da residência com informações sobre suas dimensões.

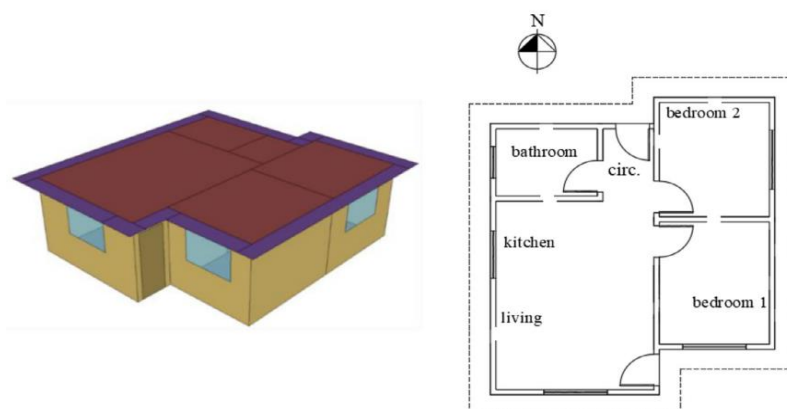
Para a definição das variáveis de temperatura ambiente e umidade relativa do ar, considerou-se que o conjunto habitacional se localiza na cidade de Caruaru, estado de Pernambuco. Para a obtenção das informações bioclimáticas da cidade utilizou-se a plataforma do *projeteee* (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes), que agrupa informações climáticas de mais de 400 cidades do Brasil. A plataforma pode ser acessada *online* e de forma gratuita através do site: <http://www.mme.gov.br/projeteee/>.

A partir da plataforma, considerou-se o mês com a maior temperatura média, sendo esse mês o de janeiro, tendo uma temperatura ambiente média de 25°C, e uma umidade relativa de 66,75%, sendo esses os valores das variáveis utilizadas nas simulações e ajuste do gráfico de zonas de conforto, respectivamente.

Primeiramente foi simulado o caso de uma residência isolada. Com o intuito de simular um meio urbano o mais próximo de um caso real, foram aquecidas tanto a superfície externa da casa quanto o solo, simulando uma superfície pavimentada. A temperatura ambiente foi considerada em 25°C (298,15K), para as superfícies externas da residência e solo prescreve-se 45°C (318,15K), a superfície interna das paredes foi mantida a temperatura ambiente, conforme Figura 21.

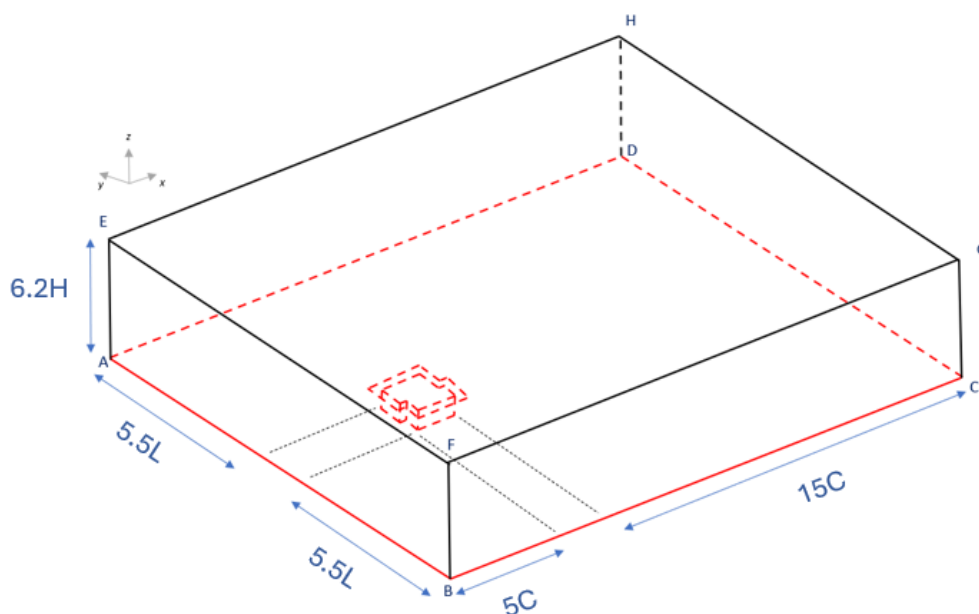
Para a simulação foram consideradas as janelas como sendo de correr (abertura máxima de 50%) e todas abertas, porta frontal fechada e porta dos fundos aberta. A porta do banheiro foi considerada fechada e a sua janela aberta (sendo considerada tipo basculante com 100% de abertura máxima).

Figura 20 - Geometria para a habitação de interesse social.



Fonte: Eli e Lamberts *et al.* (2021).

Figura 21 - Domínio do caso com apenas uma residência.



Fonte: Autor (2023).

Posteriormente, foi simulado um conjunto habitacional com 9 edificações, sendo uma delas a casa em análise. As outras oito edificações são modelos simplificados, sem aberturas e sem o beiral da laje, ver Figuras 22 e 23. A casa foi localizada na faixa central do conjunto, e posicionada em três localizações diferentes, na 1ª posição (barlavento), 2ª posição (central) e 3ª posição (sotavento), sendo dessa forma um total de três simulações.

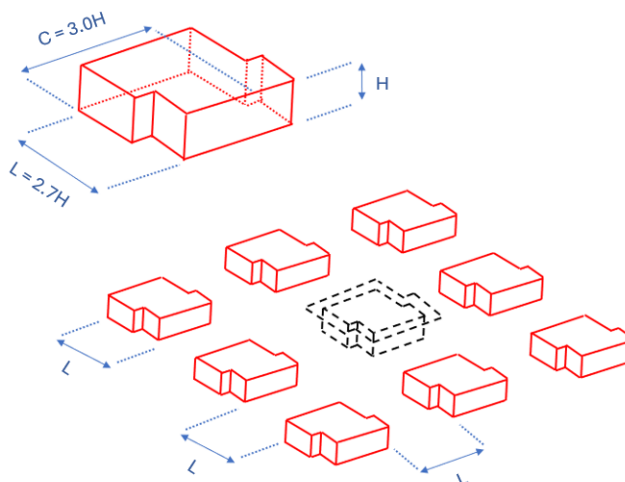
Figura 22 - Posicionamento das residências no conjunto habitacional.



Fonte: Autor (2023).

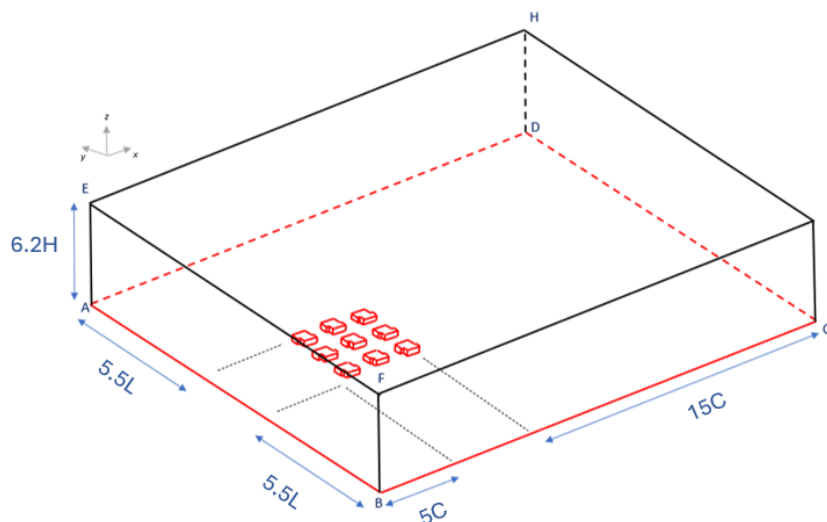
Para a variável temperatura, prescrevem-se as mesmas condições impostas para a residência isolada, ou seja: para a temperatura ambiente define-se 25°C ($298,15\text{K}$), para as superfícies externas das residências e o solo prescreve-se 45°C ($318,15\text{K}$), e as superfícies internas a temperatura ambiente. Nas Figuras 23 e 24, mostra-se o espaçamento entre as residências e o domínio computacional utilizado.

Figura 23 - Dimensões principais e espaçamento entre as residências.



Fonte: Autor (2023).

Figura 24 - Domínio computacional do conjunto habitacional.



Fonte: Autor (2023).

No Quadro 10, mostram-se as condições de contorno impostas para os casos do conjunto habitacional.

Quadro 10 - Condições de contorno para o caso do conjunto habitacional.

Faces	Veloc. x	Veloc. y	Veloc. z	Pressão	Temperatura
AEFB	$u = u(z)$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\nabla(T) = 0$
CDHG	$\nabla(u) = 0$	$\nabla(v) = 0$	$\nabla(w) = 0$	$p = 0$	$\nabla(T) = 0$
AEHD	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
BFGC	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
EHGF	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria	Cond. de simetria
ADCB	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 298.15K$
Edificação	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$	$T = 318.15K$

Fonte: Autor (2023).

As condições de contorno para a modelagem da turbulência utilizando o modelo RANS $k-\varepsilon$ padrão, são mostradas no Quadro 11.

Quadro 11 - Condições de contorno para as variáveis da turbulência no caso do conjunto habitacional

Faces	k	ε	μ
AEFB	$k = k(z)$	$\varepsilon = \varepsilon(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
CDHG	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
AEHD	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
BFGC	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
EHGF	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
ADCB	função de parede	função de parede	função de parede
Edificação	função de parede	função de parede	função de parede

Fonte: Autor (2023).

Os perfis de velocidade, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação são os mesmos utilizados para o caso de Karava 2D. Considera-se para as características

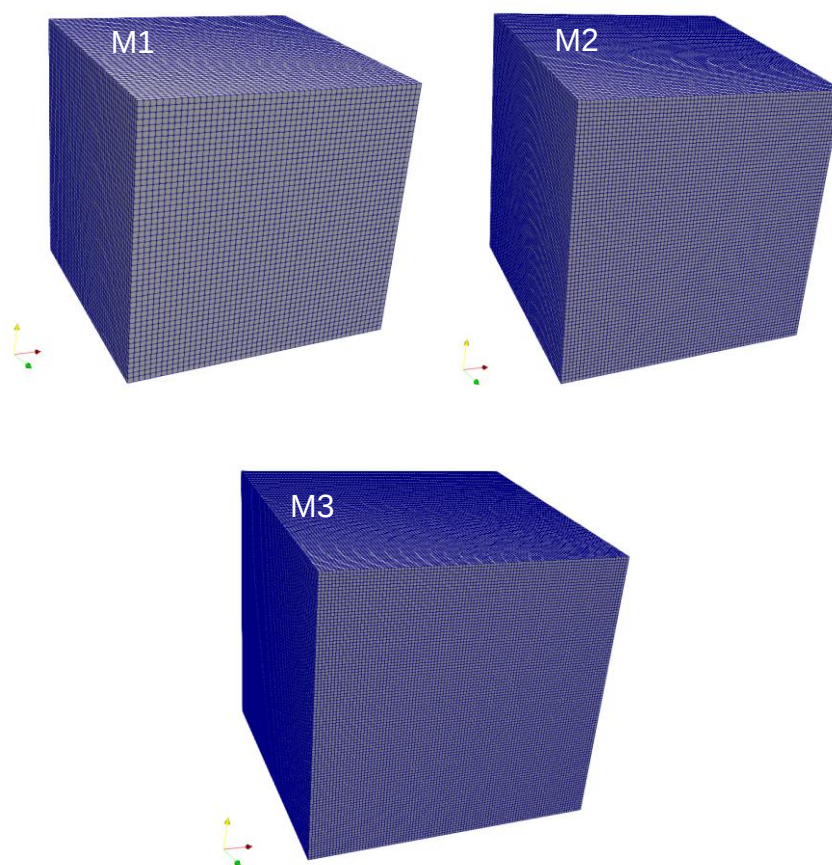
do fluido os seguintes valores: número de Prandtl $P_r = 0,71$, número de Prandtl turbulento $P_{rt} = 0,85$ e viscosidade dinâmica $\mu = 0,000015 \frac{m^2}{s}$.

6 RESULTADOS

6.1 Caverna aquecida tridimensional - Caverna 1

Neste caso são analisados 4 solvers: *buoyantBoussinesqPimpleFoam*, *buoyantBoussinesqSimpleFoam*, *pisoThermo* e *simpleThermo*. Para o estudo, consideram-se 3 malhas diferentes com distribuição uniforme de volumes, sendo a discretização M1 = 50x50x50; M2 = 75x75x75 e M3 = 100x100x100. Na Figura 25, apresentam-se as três discretizações empregadas.

Figura 25 - Malhas para os casos Caverna 1 e Caverna 2.



Fonte: Autor (2023).

No Quadro 12, mostram-se os valores de Nusselt médio (Eq. 44) na superfície superior obtidos com os 4 solucionadores nas 3 malhas e sua comparação com os resultados apresentados por outros autores.

$$\overline{N_u} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{\partial T}{\partial Y} dx dz \quad (44)$$

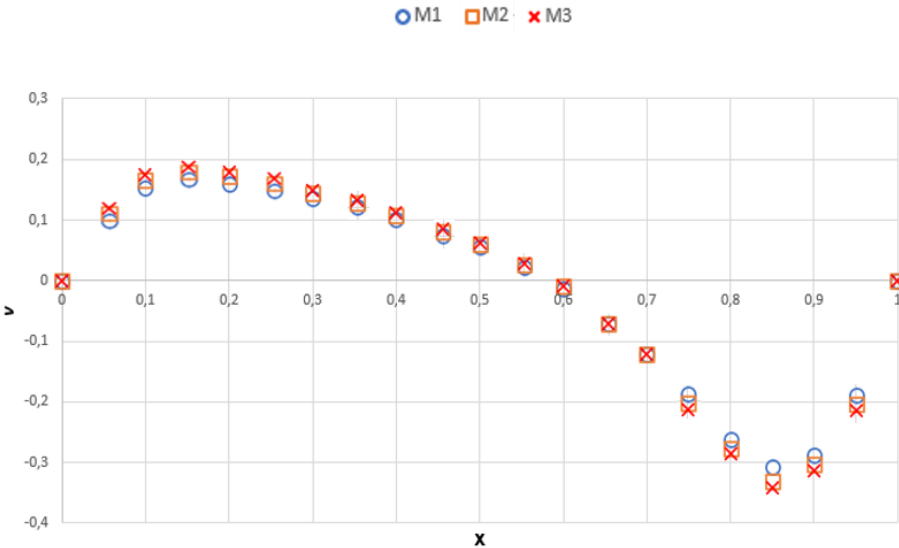
Quadro 12 - Nusselt médio para a Cavidade 1 com Ri = 0,001 e Re = 400.

Autor		Tempo	$\overline{N_u}$
Salim (2019)		-----	3.97
Iwatsu <i>et al.</i> (1995)		-----	3.99
Ouertatani <i>et al.</i> (2009)		-----	3.96
Seyyedi <i>et al.</i> (2012)		-----	4.01
<i>bouyantBoussinseqPimpleFoam</i>	M1	76 min	3.90
	M2	389 min	3.94
	M3	1210 min	3.96
<i>bouyantBoussinseqSimpleFoam</i>	M1	44 min	3.88
	M2	210 min	3.92
	M3	678 min	3.93
<i>pisoThermo</i>	M1	39 min	3.89
	M2	198 min	3.91
	M3	650 min	3.92
<i>simpleThermo</i>	M1	22 min	3.79
	M2	116 min	3.83
	M3	314 min	3.86

Fonte: Autor (2023).

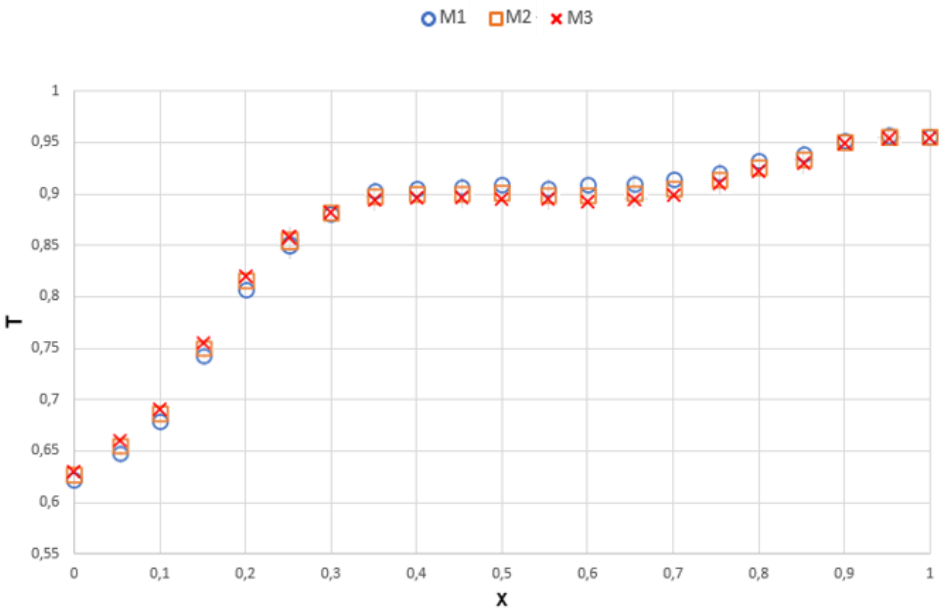
Nos Gráficos de 1 a 8, mostram-se os perfis de velocidade componente y (v) e temperatura (T), para o conjunto de malhas e solucionadores analisados, na interseção entre os planos $z = 0.50$, $y = 0.50$. Para todos os *solvers* observa-se uma tendência de convergência para a malha M3.

Gráfico 1 - Perfil de velocidade (v) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *buoyantBoussinesqPimpleFoam*.



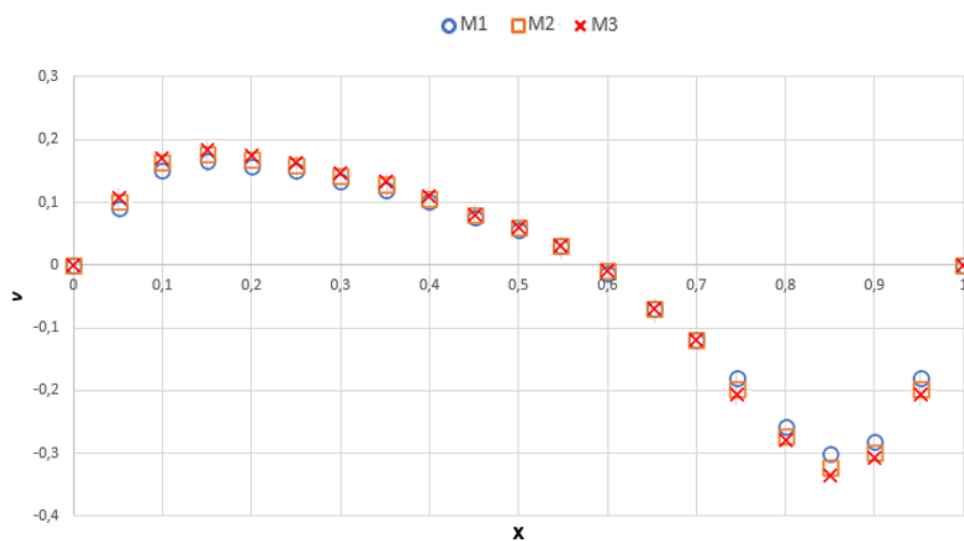
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 2 - Perfil de temperatura (T) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *buoyantBoussinesqPimpleFoam*.



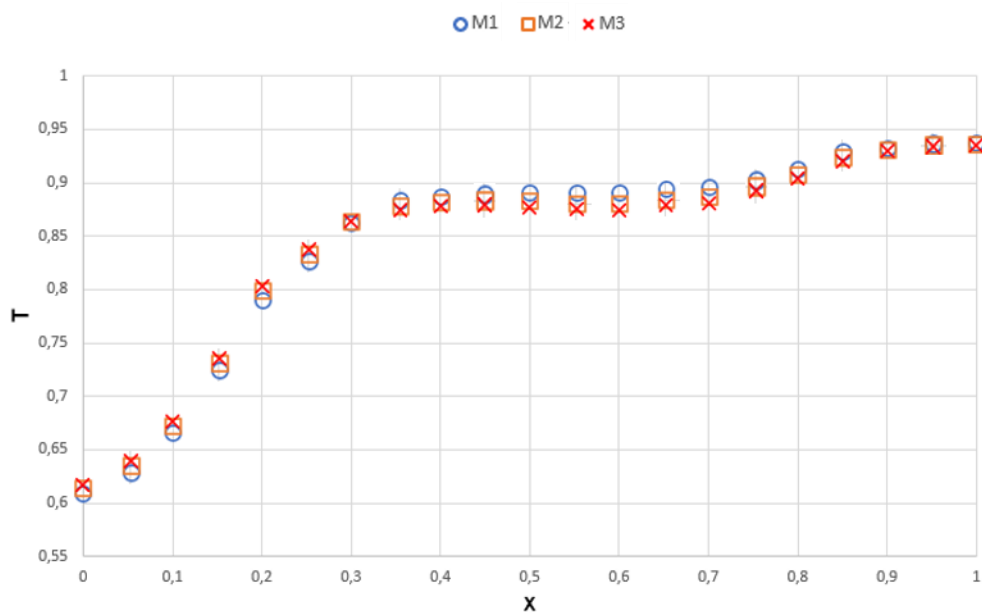
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 3 - Perfil de velocidade (v) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *buoyantBoussinesqSimpleFoam*.



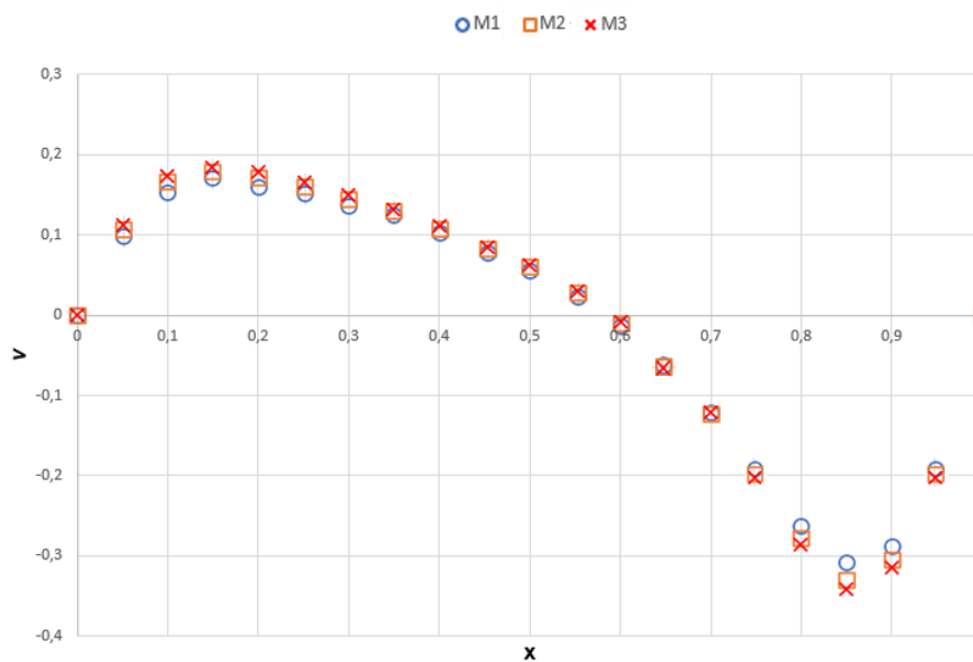
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 4 - Perfil de temperatura (T) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *buoyantBoussinesqSimpleFoam*.



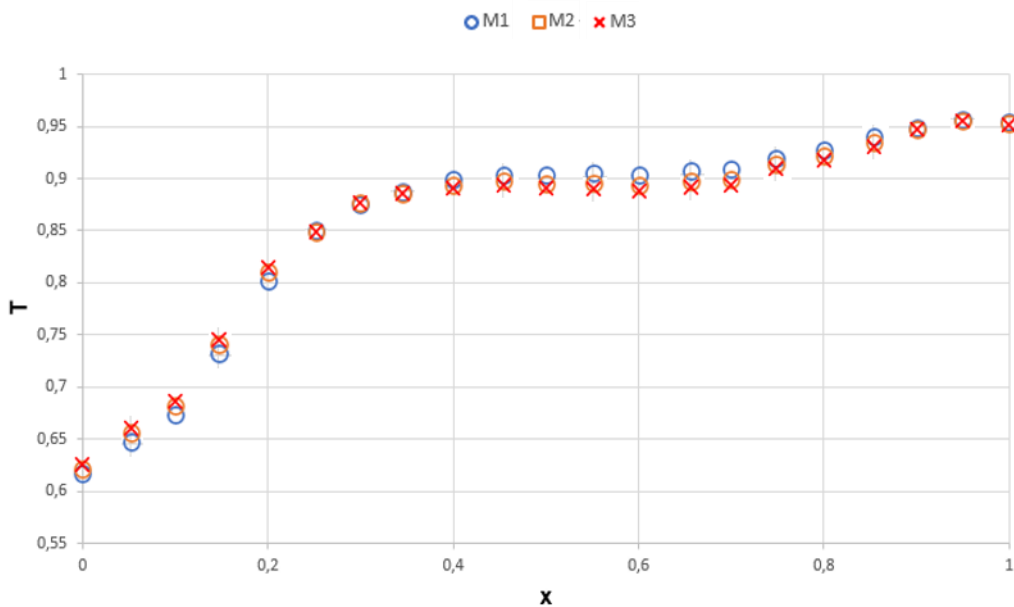
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 5 - Perfil de Velocidade (v) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *pisoThermo*.



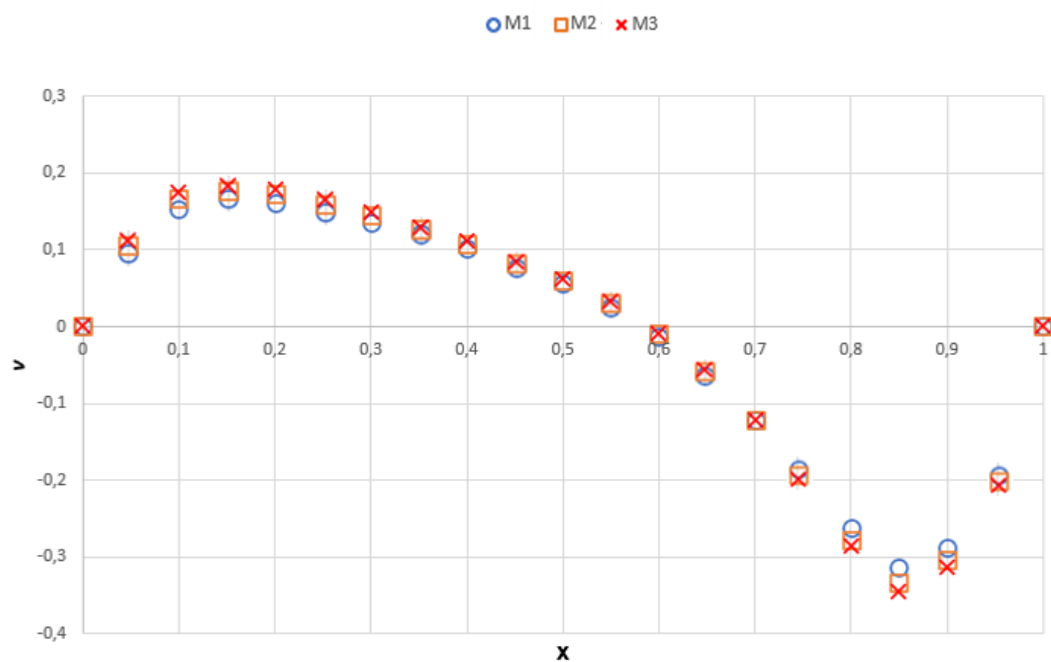
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 6 - Perfil de Temperatura (T) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *pisoThermo*.



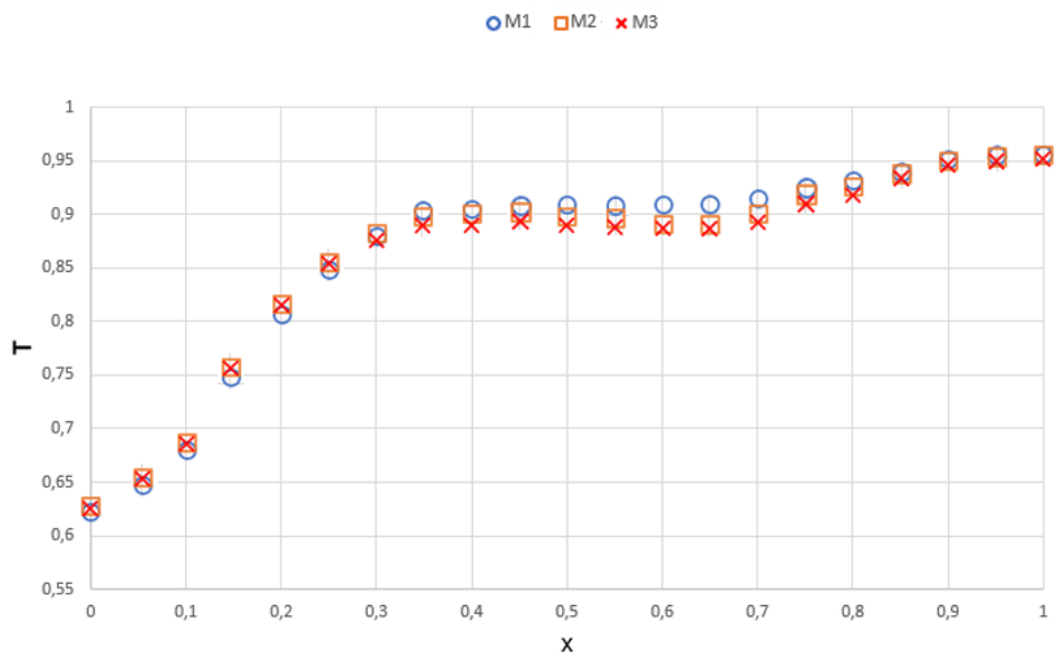
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 7 - Perfil de Velocidade (v) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *simpleThermo*.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 8 - Perfil de Temperatura (T) para $z = 0.50$ e $y = 0.50$ – *simpleThermo*.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se, no Quadro 12, que existem consideráveis diferenças entre os tempos de processamento dos solucionadores. O solver *buoyantBoussinesqPimpleFoam*, apresenta o maior tempo de processamento seguido do *buoyantBoussinesqSimpleFoam*, o *pisoThermo* e posteriormente do *simpleThermo*. Este último, exibe o menor tempo de processamento, cerca de 25% em relação ao *buoyantBoussinesqPimpleFoam*, e 50% em relação ao *buoyantBoussinesqSimpleFoam* e o *pisoFoam*.

Com relação ao número de Nusselt médio, percebe-se que os resultados são semelhantes, apresentando os solucionadores *buoyantBoussinesqPimpleFoam* e *buoyantBoussinesqSimpleFoam* resultados mais próximos das referências utilizadas.

Embora os valores observados no Quadro 12 e Gráficos de 1 a 8 apresentem uma boa concordância, emprega-se o método GCI (*grid convergence index*) (ROACHE, 1994) para aferir a sensibilidade e convergência da malha. O GCI é um método que visa estimar o erro de uma discretização de domínio espacial, estimando uma porcentagem de erro da solução numérica.

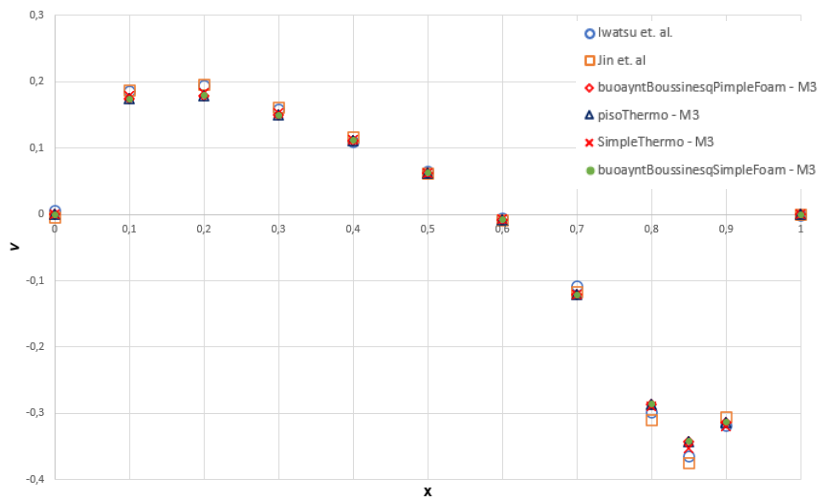
Para o caso solucionado com o *buoyantBoussinesqPimpleFoam*, o GCI entre as malhas M1 e M2 foi de 5,61% e entre as malhas M2 e M3 foi de 4,28% valores dentro dos recomendáveis pela literatura (WANG et al., 2021; ROJANO, et al., 2019; ZHANG et al., 2020). Para o solver *buoyantBoussinesqSimpleFoam*, o GCI entre as malhas M1 e M2 foi de 5,67% e entre as malhas M2 e M3 foi de 4,13%, também dentro dos valores recomendados pela literatura. A variável de análise para o cálculo foi o número de Nusselt apresentado no Quadro 12.

Para o *pisoThermo*, o GCI entre as malhas M1 e M2 foi de 3,37% e entre as malhas M2 e M3 foi de 3,04%, por sua vez, para o *simpleThermo*, entre as malhas M1 e M2 foi de 4,98%, entre as malhas M2 e M3 4,68%, para ambos os solucionadores também dentro do recomendado pela literatura especializada.

Em função do estudo de malha realizado, pode-se perceber resultados semelhantes para as malhas, com uma tendencia de convergência para as malhas mais refinadas. Portanto, nas próximas análises adota-se a malha M3. No Gráfico 9 é mostrado o perfil de velocidade componente y (v) na interseção entre os planos $y =$

0.50 e $z = 0.50$, comparado com os resultados de Iwatsu *et al.* (1995) e Jin *et al.* (2015).

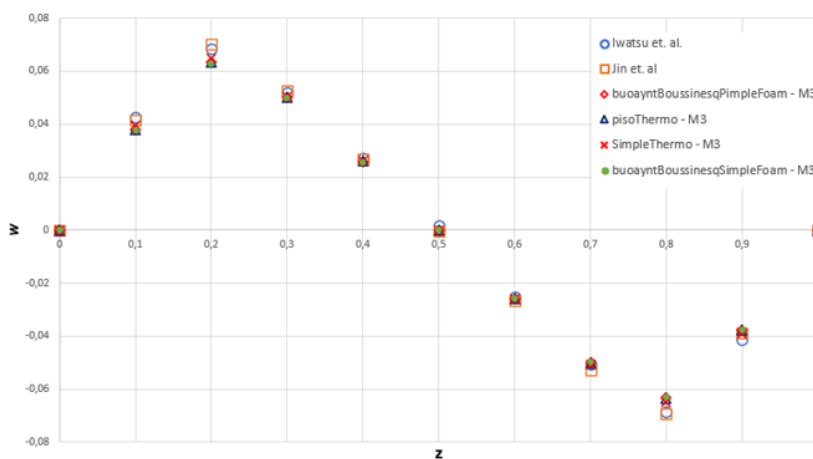
Gráfico 9 - Perfil de Velocidade (v); planos $z = 0.50$, $y = 0.50$.



Fonte: Autor (2023).

No Gráfico 10, mostra-se o perfil de velocidade componente z (w) na interseção entre os planos $x = 0.50$ e $z = 0.50$, comparado com os resultados de Iwatsu *et al.* (1995) e Jin *et al.* (2015).

Gráfico 10 - Perfil de Velocidade (w); plano $x = 0.50$, $y = 0.50$.

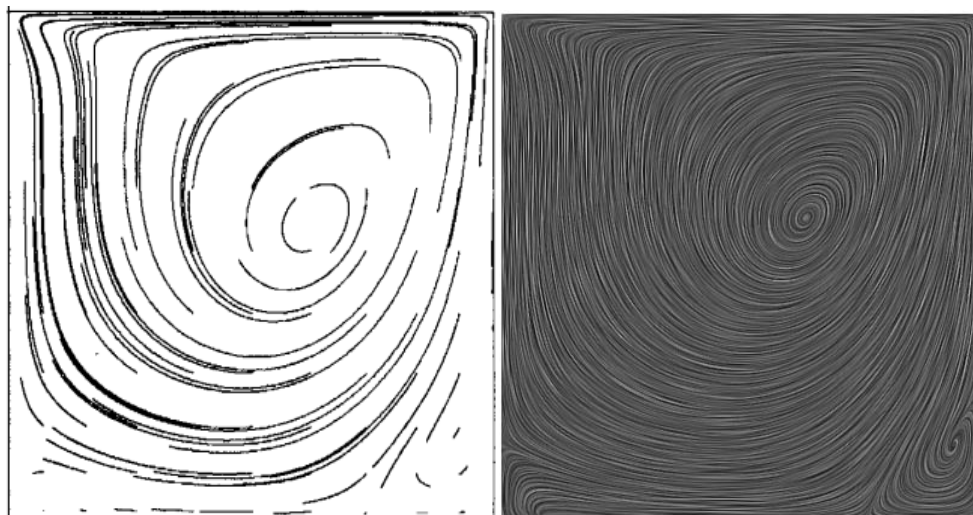


Fonte: Autor (2023).

Observa-se, nos Gráficos 9 e 10, que os resultados obtidos com os 4 *solvers* tem boa concordância com os resultados apresentados por outros autores. Além disso, os resultados entre os quatro solucionadores são semelhantes, tornando o *simpleThermo* um solver com potencial para resolver problemas envolvendo variações térmicas com

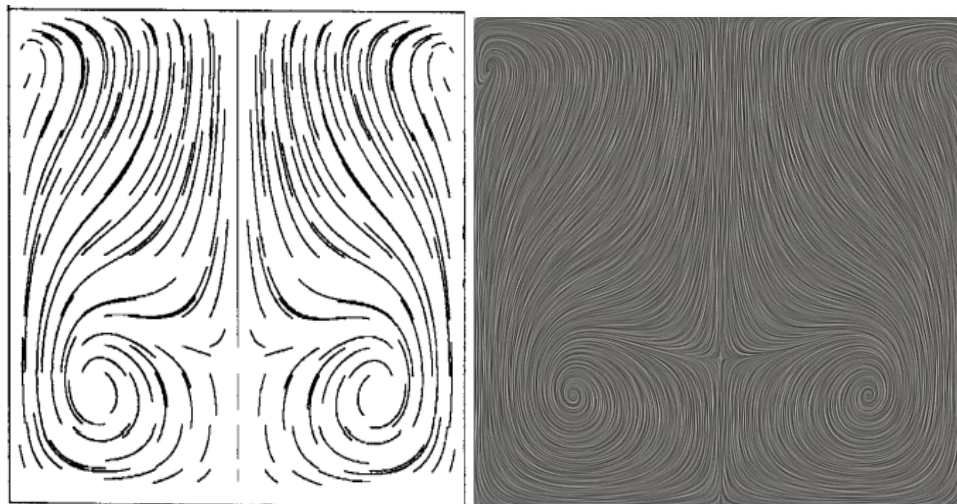
menores tempos de processamento. Nas Figuras 26 e 27, apresentam-se as linhas de corrente da magnitude de velocidade para o plano $z = 0.50$ e $x = 0.50$ obtidas com o *simpleThermo*, junto com os resultados obtidos por Iwatsu *et al.* (1995).

Figura 26 - Linhas de corrente no plano $z = 0.50$, Iwatsu *et. al* (1995) e solver *simpleThermo*.



Fonte: Adaptado de Iwatsu *et al.* (1995).

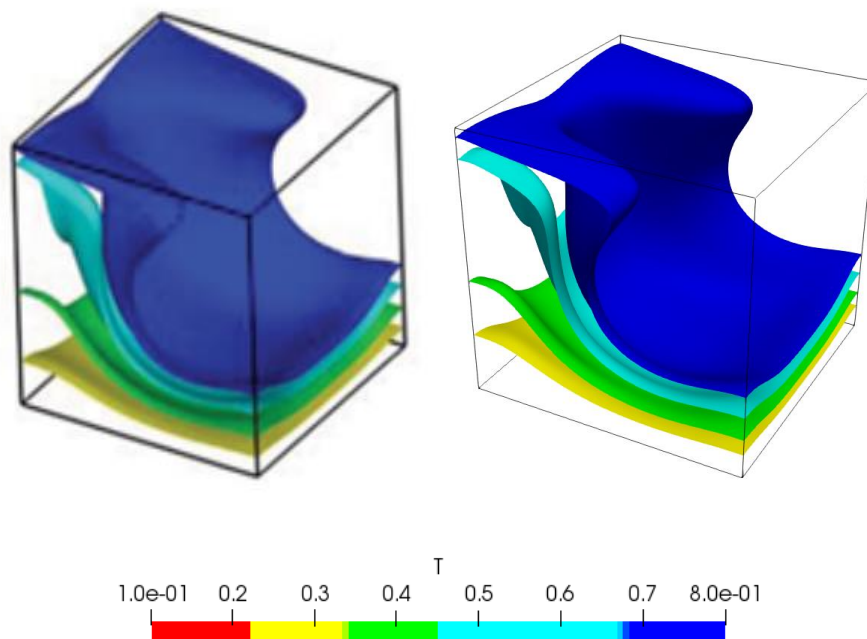
Figura 27 - Linhas de corrente no plano $x = 0.50$, Iwatsu *et. al* (1995) e solver *simpleThermo*.



Fonte: Adaptado de Iwatsu *et al.* (1995).

Na Figura 28, mostram-se as isotermas do solucionador *simpleThermo* com a malha M3 em comparação com o trabalho apresentado por Seyyedi *et al.* (2012).

Figura 28 - Isotermas obtidas por Seyyedi et al. (2012) e presente trabalho.



Fonte: Adaptado de Seyyedi et al. (2013).

Observa-se nas Figuras 26, 27 e 28, que apesar da descon sideração dos efeitos de convecção natural do solucionador *simpleThermo*, a topologia do escoamento pouco difere das referências utilizadas.

6.2 Cavity aquecida Tridimensional - Cavity 2

Nesse tópico, analisam-se os resultados obtidos para o segundo exemplo da cavity considerando apenas a malha denominada M3. No Quadro 13, mostram-se os valores de Nusselt médio para as simulações realizadas e sua comparação com as obtidas por Ouertatani *et al.* (2009).

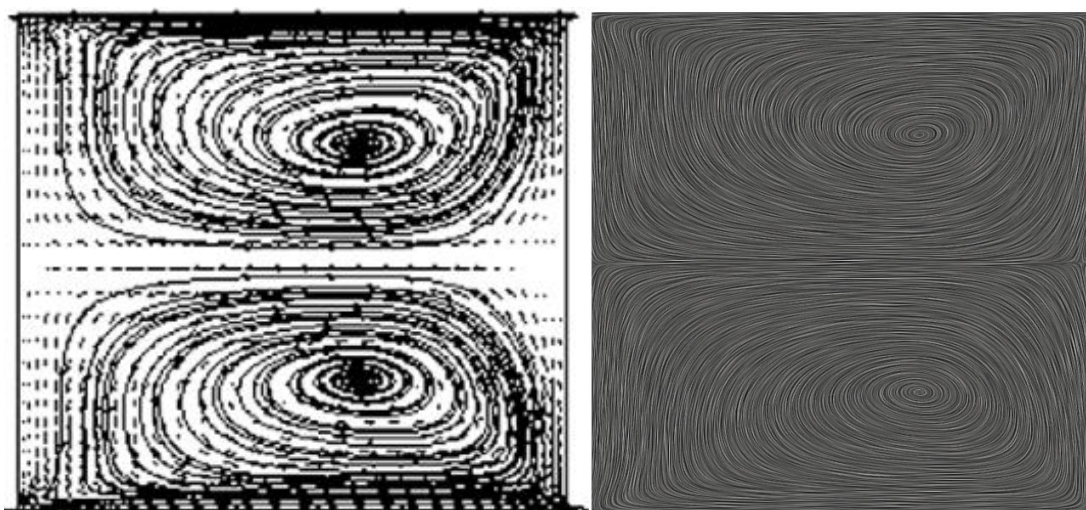
Quadro 13 - Nusselt médio na superfície superior no caso da Cavity 2.

Autor	Tempo de Processamento	$\overline{Nu}$
Ouertatani (2009) - $Ri = 0.001$	-	4.16
bouyantBoussinseqPimpleFoam - M3	1121 min	4.11
bouyantBoussinseqSimpleFoam - M3	670 min	4.08
pisoThermo - M3	622 min	4.07
simpleThermo - M3	308 min	4.03

Fonte: Autor (2023).

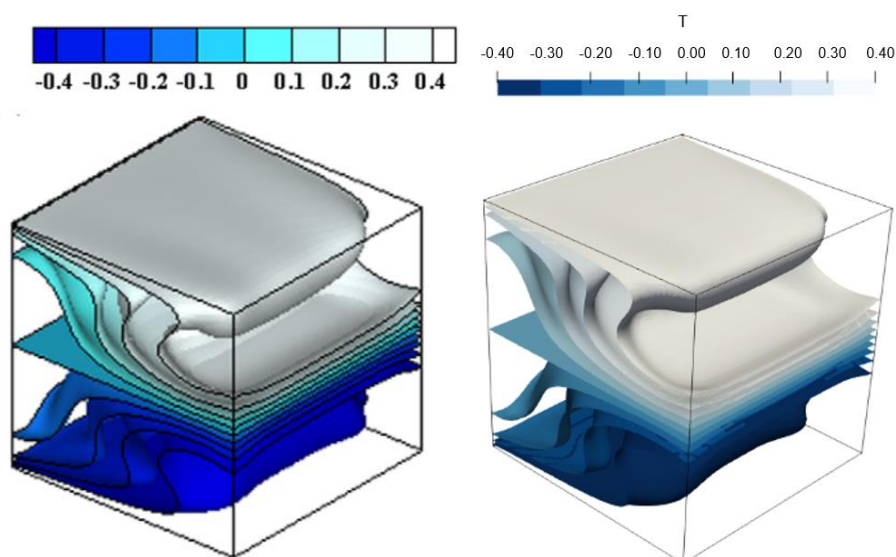
Nas Figuras 29 e 30, mostram-se as linhas de corrente da magnitude de velocidade para um plano $z = 0.50$ e as isothermas para o solucionador *simpleThermo*, junto com os resultados obtidos por Ouertatani *et al.* (2009).

Figura 29 - Linhas de corrente para $z = 0.50$, Ouertatani *et al.* (2009) e utilizando o solver *simpleThermo*.



Fonte: Adaptado de Ouertatani *et al.* (2009).

Figura 30 - Isothermas obtidas por Ouertatani *et al.* (2009) e utilizando o solver *simpleThermo*.



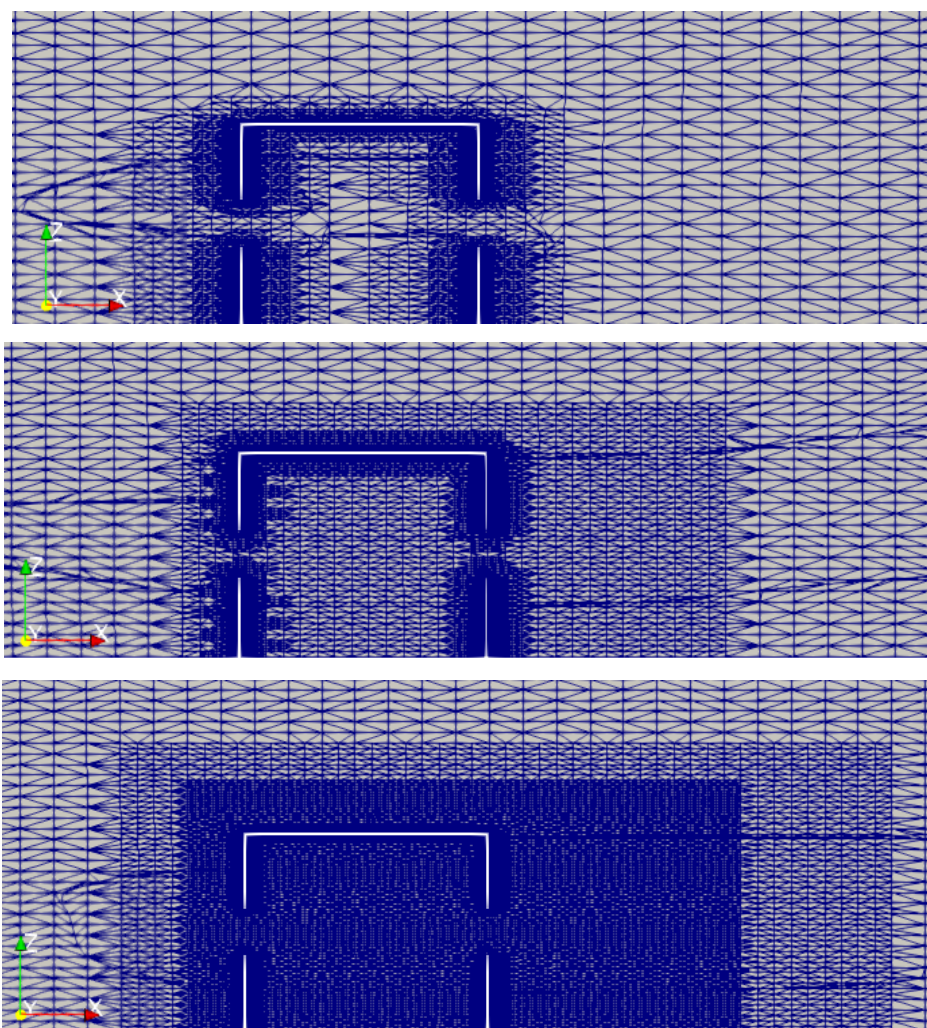
Fonte: Adaptado de Ouertatani *et al.* (2009).

Assim como no caso anterior, observa-se que a apesar da não consideração dos efeitos de convecção natural no *simpleThermo*, os resultados concordam com o da referência utilizada. Conforme os resultados mostrados para os dois modelos de cavidade, percebe-se que o solucionador *simpleThermo* apresenta resultados satisfatórios quando comparado a outros autores. Também, observam-se vantagens quando comparado ao tempo de processamento com os solucionadores nativos do OpenFOAM (*buoyantBoussinesqPimpleFoam* e *buoyantBoussinesqSimpleFoam*). Trazendo assim, uma maior possibilidade de resolver exemplos tridimensionais com domínios maiores e mais complexos. Dessa forma, todos os exemplos apresentados a seguir foram resolvidos utilizando o solver *simpleThermo*.

6.3 Caso de Karava 3D

Para realizar o estudo de convergência de malha foram utilizadas 3 discretizações, sendo: M1 = 390.316 volumes; M2 = 649.098 volumes e M3 = 1.179.789 volumes, respectivamente. Todas as malhas desse caso foram geradas com a ferramenta *snappyhexMesh*. Na Figura 31, mostra-se a malha em um corte no plano $y = 0$, que passa pelo centro da geometria. O valor do y^+ na superfície da geometria para as malhas foi respectivamente 202.80, 163.70 e 134.25.

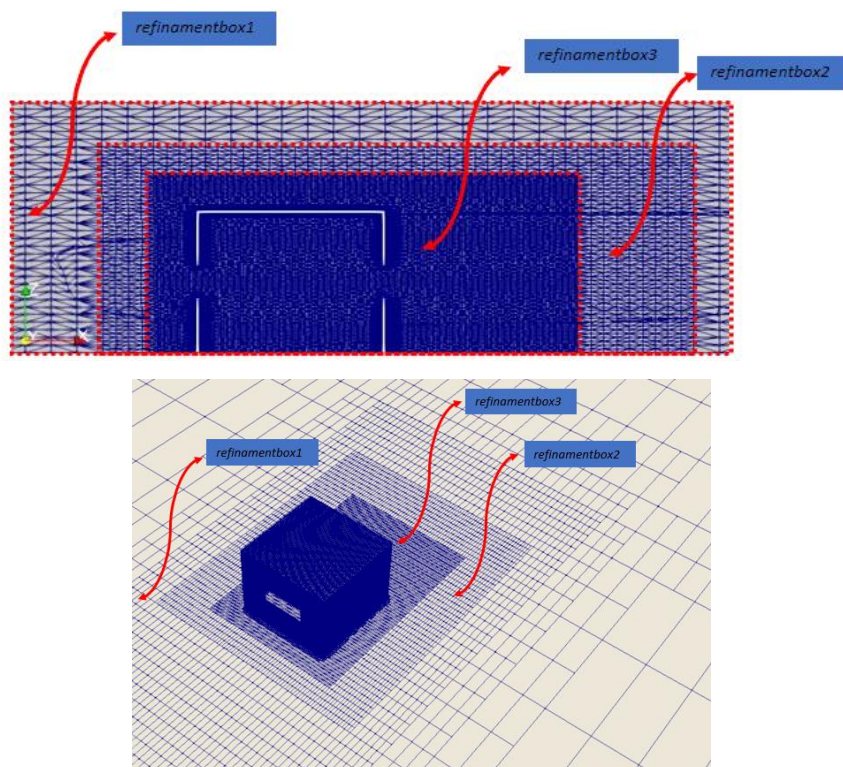
Figura 31 - Malhas obtidas com o snappyhexMesh.



Fonte: Autor (2023).

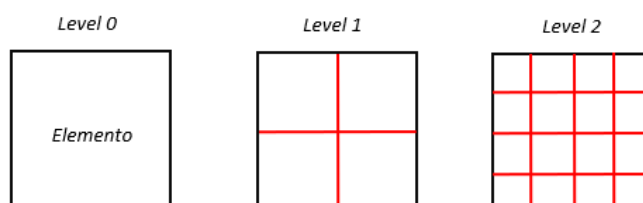
A ferramenta *snappyhexMesh* faz parte do pacote OpenFOAM, uma das suas principais características é a utilização de regiões de refinamento (*refinementBox*) e níveis de refinamento (*levels*), onde o usuário define a região do espaço da sua “box” de refinamento, e qual nível de refinamento essa região terá, conforme apresenta-se nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 - Regiões de refinamento.



Fonte: Autor (2023).

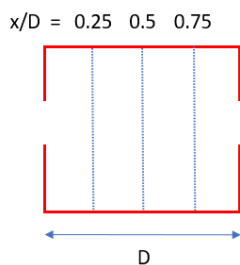
Figura 33 - Níveis de refinamento.



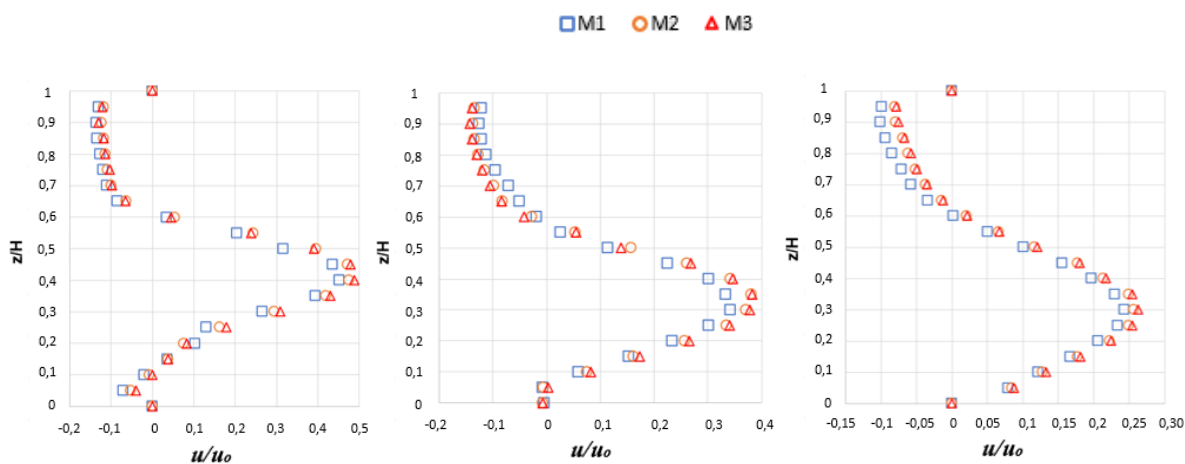
Fonte: Autor (2023).

Nos Gráficos 11 e 12, apresentam-se os perfis de velocidade (componente u) e temperatura para as malhas M1, M2, M3 no plano de simetria $x - z$ para três valores constantes de x/D no interior da geometria (Figura 34).

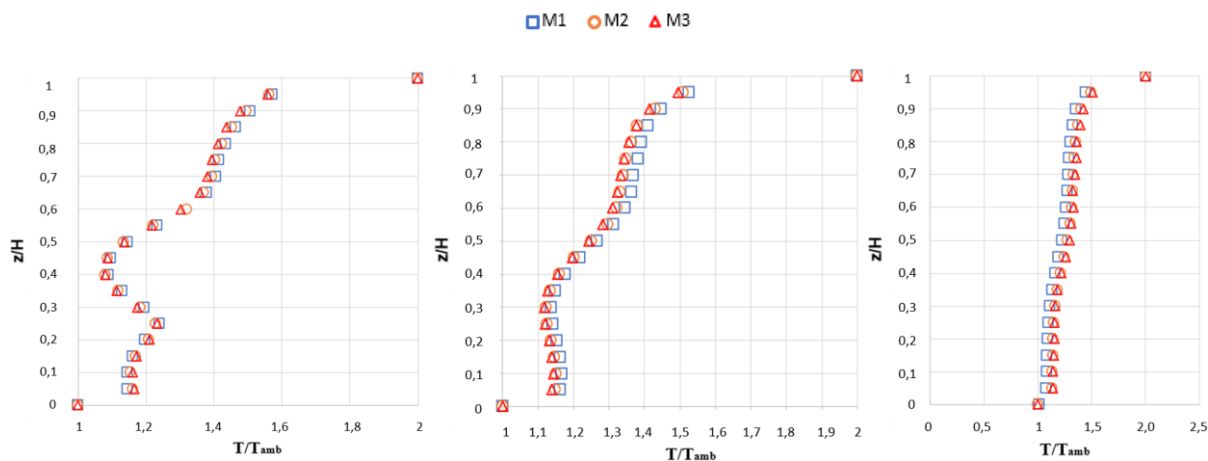
Figura 34 - Localização dos cortes.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 11 - Perfil de velocidade (u) - $x/D = 0.25$; $x/D = 0.50$; $x/D = 0.75$.

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 12 - Perfil de temperatura - $x/D = 0.25$; $x/D = 0.50$; $x/D = 0.75$.

Fonte: Autor (2023).

No Gráfico 11, observa-se o efeito da alta velocidade no jato de entrada (ver Figuras de 36 a 39) na abertura frontal da geometria e como ele é mais intenso no

corte $x/D = 0.25$, e posteriormente, vai diminuindo à medida que o perfil se aproxima da segunda abertura. No Gráfico 12, nota-se a forte interação que o campo de velocidade tem com a distribuição de temperatura. Observa-se que justamente na região próxima ao jato de entrada, tem-se uma faixa de mínima temperatura. A variação de temperatura é mais intensa no primeiro perfil de temperatura ($x/D = 0.25$) e diminui paulatinamente até o último perfil corte. Ou seja, a região de alta velocidade causada pelo jato de entrada (que tem uma menor temperatura), causa um decaimento local de temperatura.

No Quadro 14, mostra-se o valor da vazão de entrada na abertura da geometria para as três malhas.

Quadro 14 - Vazão adimensional na abertura de entrada.

Malhas	Vazão adimensional ($Q/(u_H A_{(abertura)})$)
M1	0,459
M2	0,471
M3	0,475

Fonte: Autor (2023).

Além da comparação dos perfis das variáveis velocidade e temperatura, do cálculo das vazões, utilizou-se o método GCI (*Grid Convergence Index*) (ROACHE, 1994) para aferir a sensibilidade e convergência da malha. Utilizando-se a vazão adimensional na abertura de entrada como variável de análise, o valor do GCI entre as malhas M1 e M2 foi de 1,41% e para as malhas M2 e M3 foi de 0,35%, valores dentro dos recomendáveis pela literatura (WANG et al., 2021; ROJANO, et al., 2019). Observa-se assim, que os resultados tendem a convergir para a malha M3, e essa será a malha utilizada para análise do caso.

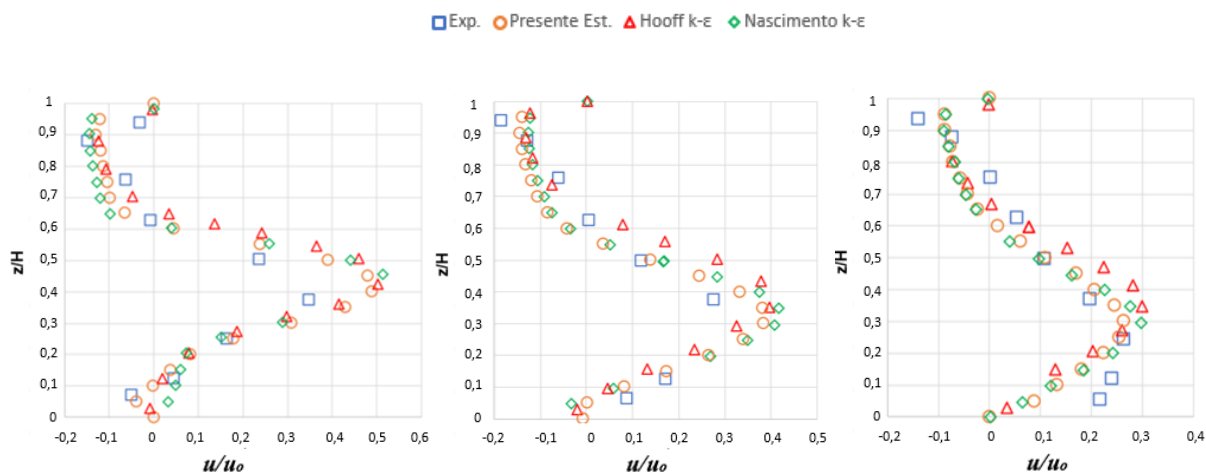
No Quadro 15, apresenta-se os valores de vazão adimensional obtida na malha M3, junto com os resultados experimentais obtidos por Tominaga e Blocken (2015) e numéricos de Hooff, Blocken e Tominaga (2017) e Nascimento (2019).

Quadro 15 - Vazão adimensional na abertura de entrada.

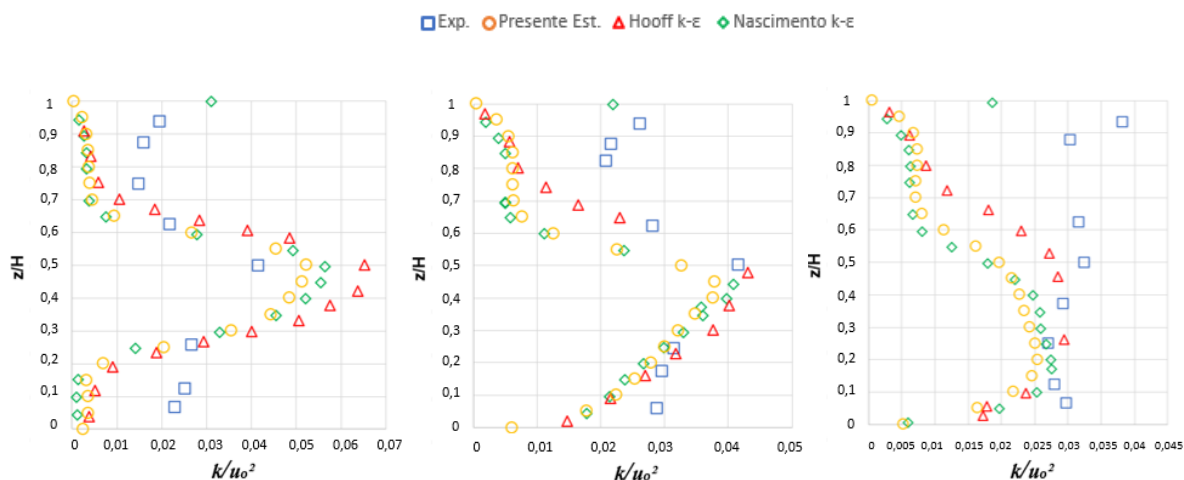
Estudo	Vazão adimensional	Erro (%)
Exp.	0,500	-
Hooff $k - \varepsilon$	0,483	3,5
Nascimento $k - \varepsilon$	0,485	3,0
Presente estudo	0,475	5,1

Fonte: Autor (2023).

Nos Gráficos 13 e 14, apresentam-se os perfis da componente u da velocidade e a energia cinética turbulenta para os valores x/D constante, localizados no interior do modelo da edificação.

Gráfico 13 - Perfil de velocidade (u) - $x/D = 0.25$; $x/D = 0.50$; $x/D = 0.75$.

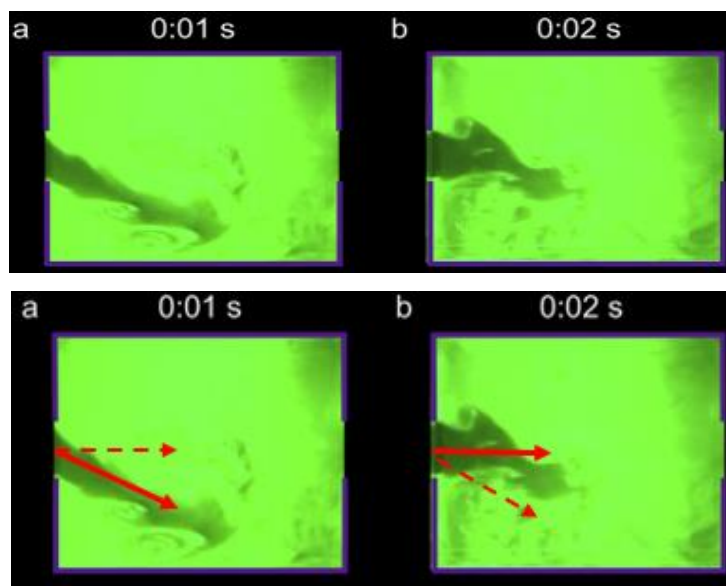
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 14 - Perfil de energia cinética turbulenta - $x/D = 0.25$; $x/D = 0.50$; $x/D = 0.75$.

Fonte: Autor (2023).

Pode-se notar, pela diferença em relação ao resultado experimental, a dificuldade em captar os campos de energia cinética turbulenta (Gráfico 14). Tal desvio deve-se ao modelo utilizado para resolver o escoamento. O modelo RANS estacionário não consegue captar a movimentação “*jet flapping*” transiente do jato de entrada (movimentação vertical do jato) observado nos resultados experimentais obtidos por Tominaga e Blocken (2015), conforme Figura 35. A incapacidade de captar essa movimentação resulta, consequentemente, no comprometimento dos resultados dos campos energia cinética turbulenta, conforme também observado por Hooff, Blocken e Tominaga (2017).

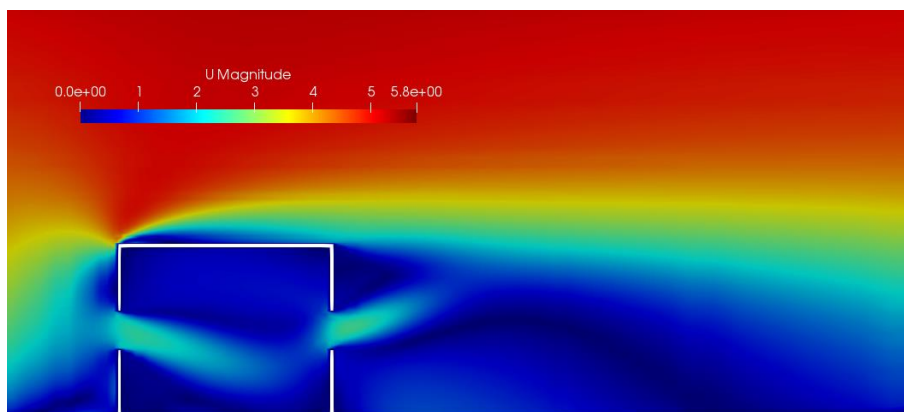
Figura 35 - Resultados experimentais obtidos por Tominaga e Blocken (2015).



Fonte: Tominaga e Blocken (2015).

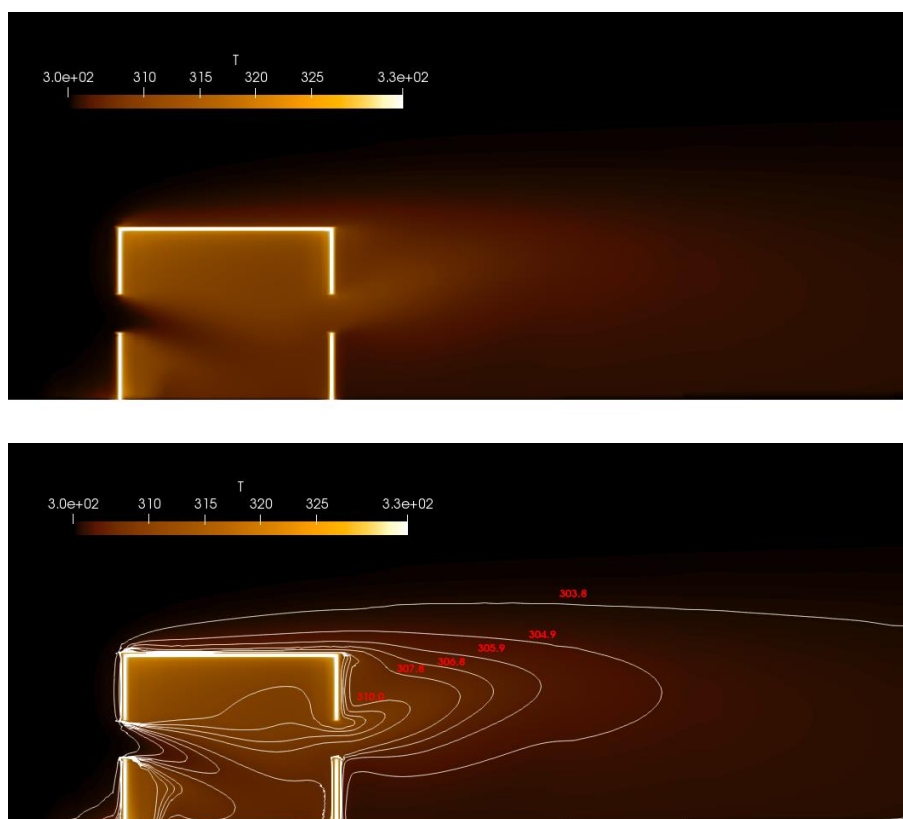
Nas Figuras 36 até 39, apresentam-se as distribuições da magnitude da velocidade e de temperatura no plano de simetria $x - z$ e no plano $y - x$ para $z = 0.5H$.

Figura 36 - Perfil de velocidade (magnitude) no plano de simetria $x - z$.



Fonte: Autor (2023).

Figura 37 - Perfil de Temperatura e isotermas no plano de simetria $x - z$.



Fonte: Autor (2023).

Figura 38 - Perfil de velocidade (magnitude) no plano $y - x$, ($z = 0.5H$).

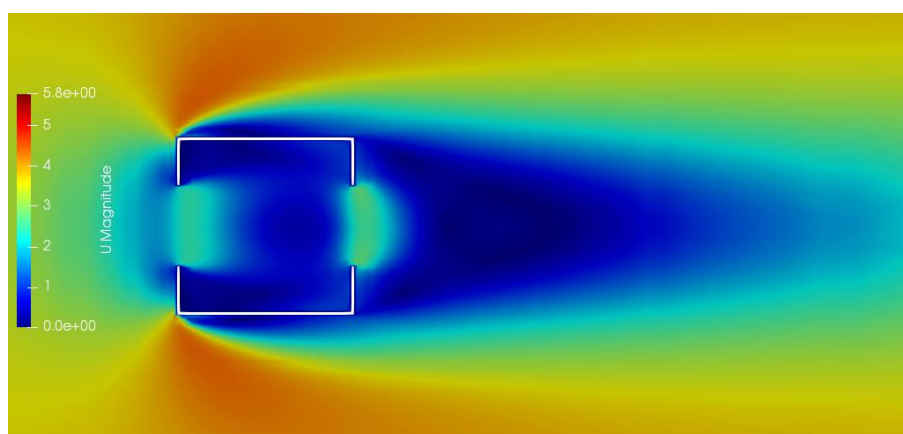
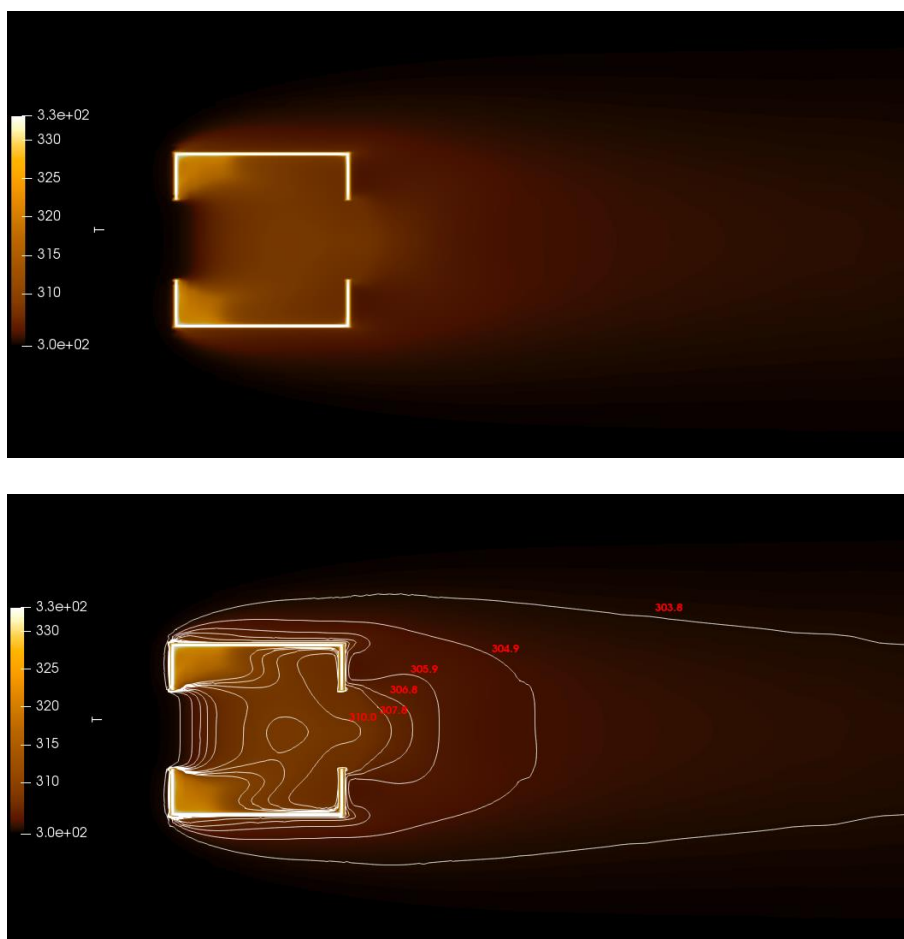


Figura 39 - Perfil de temperatura e isotermas no plano y – x, ($z = 0.5H$).



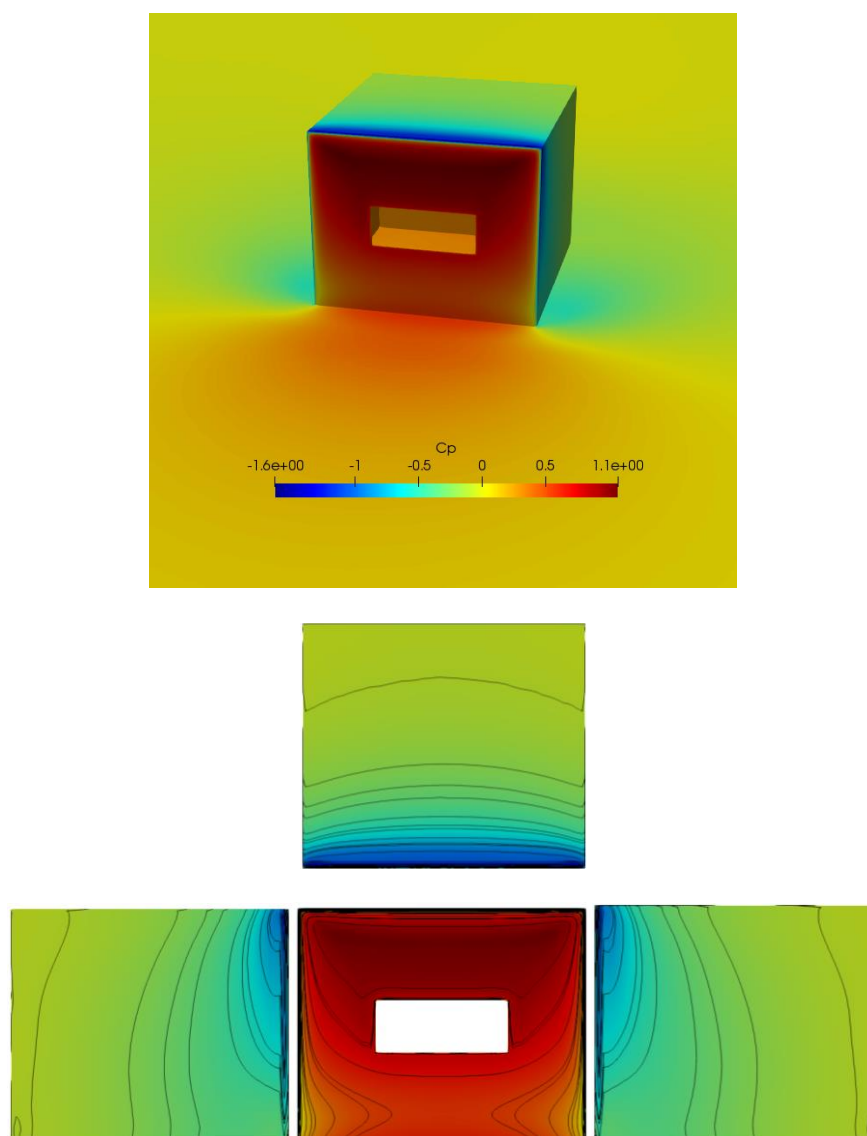
Fonte: Autor (2023).

É possível observar o efeito descrito no Gráfico 12, onde ocorre um decaimento local da temperatura na faixa de alta velocidade, esse decaimento é mais nítido nas proximidades da abertura de entrada, e menos nítido a medida que as temperaturas tendem a se equilibrar nas regiões mais distantes a essa abertura.

Na Figura 40, mostra-se a distribuição de coeficiente pressão ($C_p = \frac{p}{0.5(\rho U_{ref}^2)}$) na superfície do modelo de edificação. Observa-se que as pressões positivas ocorrem na fachada frontal da geometria, enquanto as fachadas laterais e de fundo experimentam pressões negativas, bem como na superfície superior. Ou seja, pressões positivas a barlavento e negativas a sota-vento.

São justamente essas diferenças de pressão que geram a aceleração do escoamento no interior da geometria, maiores diferenças de pressão induzem aumentos de velocidade no interior da edificação.

Figura 40 - Distribuição de coeficiente de pressão na superfície da geometria.

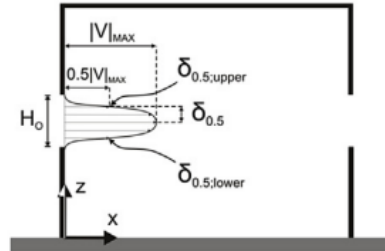


Fonte: Autor (2023).

Para este exemplo, foi realizada a medição da meia-largura do jato de entrada ($\delta_{0.5}$) (ver Figura 41). Para determinar este parâmetro, calculou-se a meia-largura superior e inferior ($\delta_{0.5;superior}$, $\delta_{0.5;inferior}$) medindo-se a distância vertical entre a magnitude da velocidade máxima local do jato ($|U|_{MAX}$) e o local onde a magnitude da velocidade é igual à metade dessa velocidade máxima, isto é, $0.50|U|_{MAX}$. Na Figura

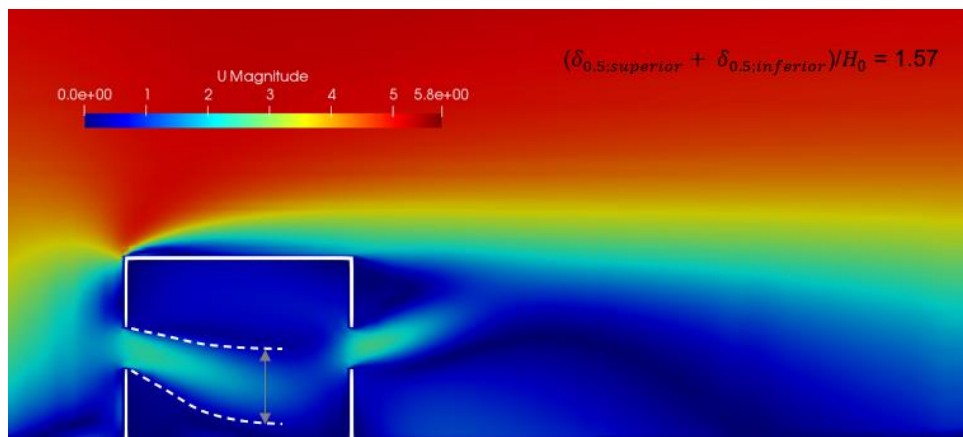
42, mostra-se o resultado para a posição $x/D = 0,625$ onde H_0 é a altura da abertura de entrada. Obteve-se o valor de 1,57, sendo muito próximo ao valor medido por Hooff, Blocken e Tominaga (2017) que foi 1,60.

Figura 41 - Meia-largura do jato de entrada.



Fonte: Hooff, Blocken e Tominaga (2017).

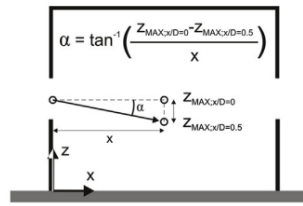
Figura 42 - Meia-largura do jato de entrada na posição $x/D = 0,625$.



Fonte: Autor (2023).

Também foi medido o ângulo de inclinação do jato de entrada. O ângulo é definido com base na localização vertical da magnitude da velocidade máxima na posição da abertura a barlavento ($x/D = 0$) e no meio da geometria ($x/D = 0,5$), conforme apresenta-se na Figura 43 e Eq. (45). No presente trabalho, encontrou-se o valor de $16,5^\circ$, sendo que o valor obtido por Hooff, Blocken e Tominaga (2017) para o modelo $k - \varepsilon$ foi de $13,6^\circ$.

Figura 43 - Angulo de inclinação do jato de entrada.

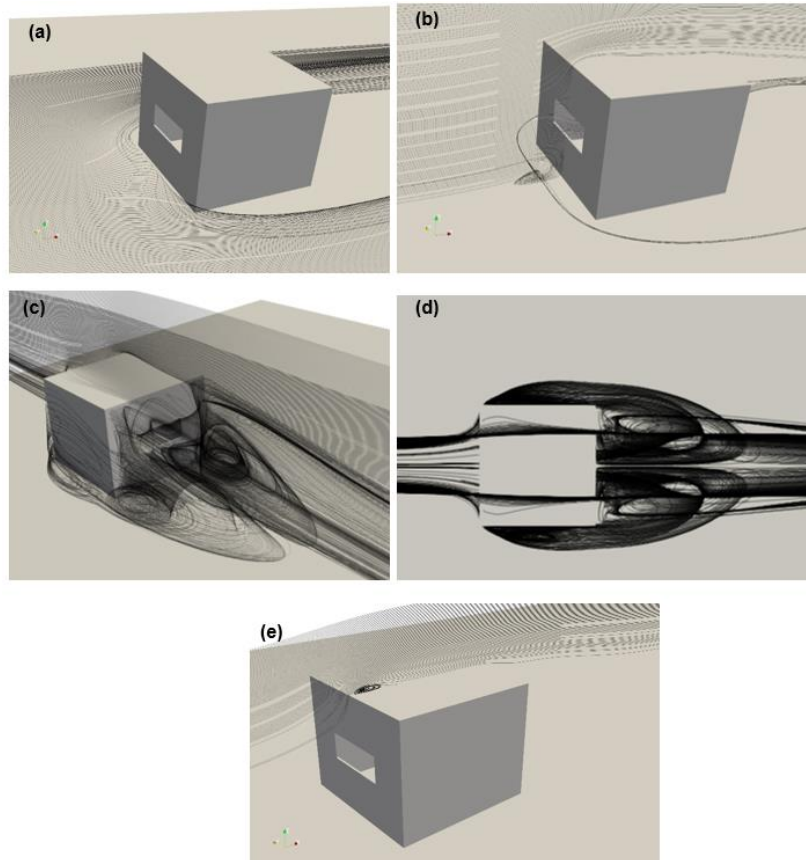


Fonte: Hooff, Blocken e Tominaga (2017).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{max;x/D=0} - Z_{max;x/D=0.5}}{x} \right) \quad (45)$$

Finalmente, na Figura 44, apresentam-se alguns dos principais fenômenos encontrados na simulação. Muitos dos fenômenos são frequentes nos meios urbanos e foram descritos no tópico 3.2, como por exemplo o vórtice de base Figura 44 (a) e (b), região de recirculação (c) e (d) e vórtice de topo (e).

Figura 44 - Linhas de corrente.

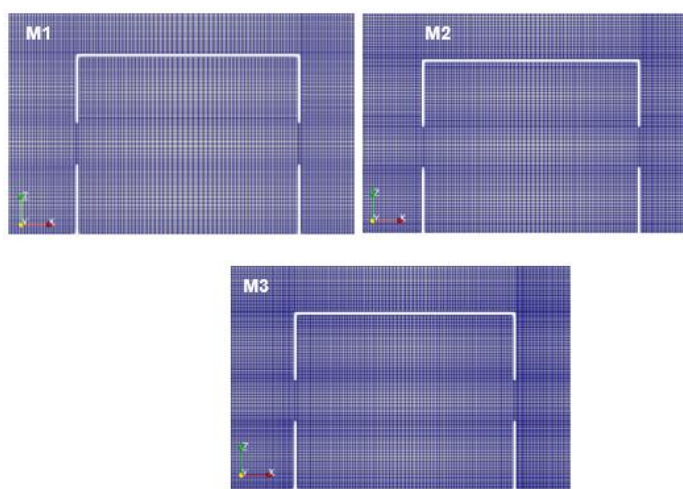


Fonte: Autor (2023).

6.4 Caso de Karava 2D

Inicialmente, considera-se o modelo de edificação isolada para fazer o estudo de convergência de malha. São analisadas três malhas, sendo: M1, M2 e M3, com respectivamente, 56.048, 76.177 e 99.735 volumes. Na Figura 45, mostram-se as malhas na região vizinha à edificação. O valor do y^+ na superfície das geometrias para as malhas foram 72.4, 52.3 e 47.4, respectivamente.

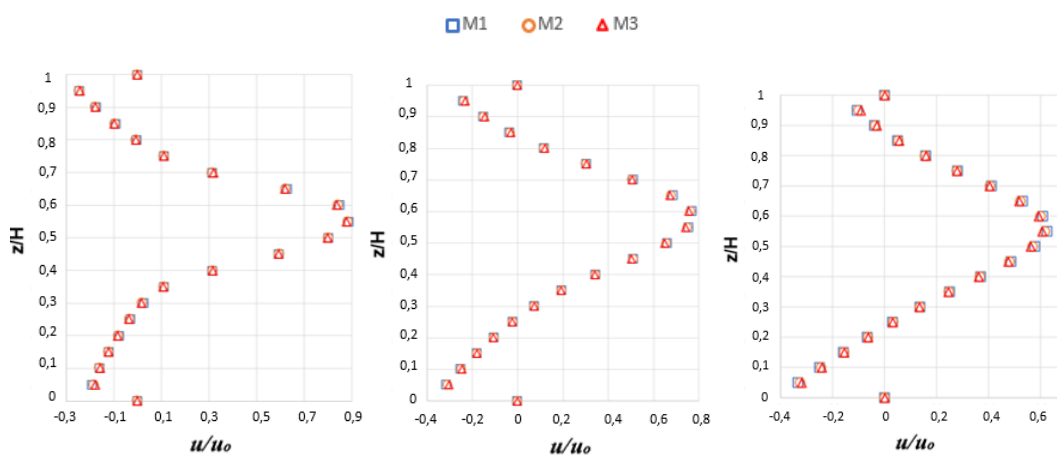
Figura 45 - Malhas utilizadas no estudo de convergência.



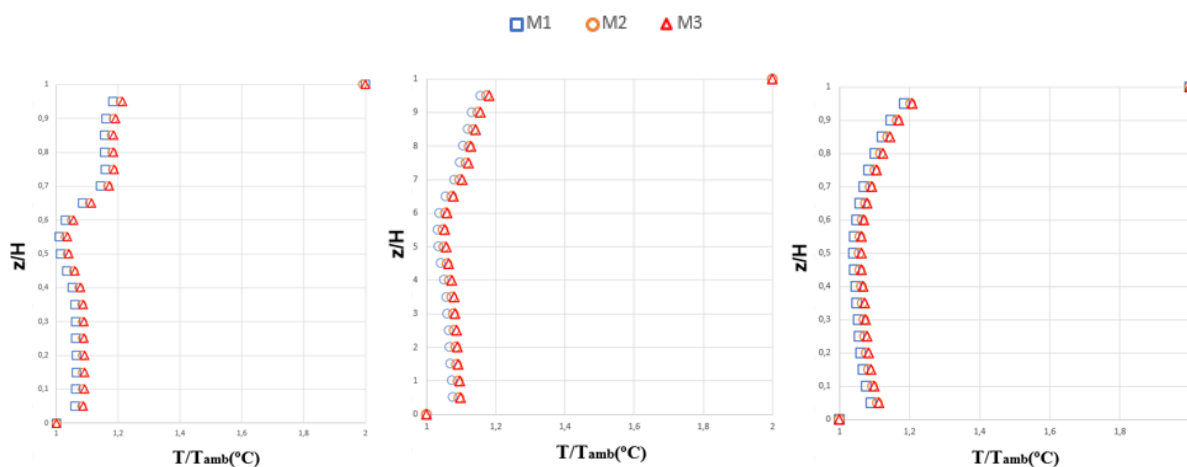
Fonte: Autor (2023).

Nos Gráficos 15 e 16, mostram-se os perfis de velocidade (componente u) e de temperatura para três posições localizadas no interior, $x/D = 0.25$; 0.50 e 0.75 .

Gráfico 15 - Perfis de velocidade (u) - $x/D = 0.25$; $x/D = 0.50$; $x/D = 0.75$.



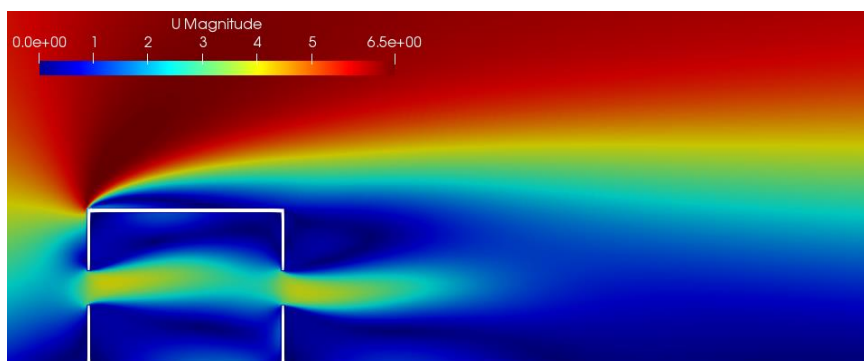
Fonte: Autor (2023).

Gráfico 16 - Perfis de temperatura - $x/D = 0.25$; $x/D = 0.50$; $x/D = 0.75$.

Fonte: Autor (2023).

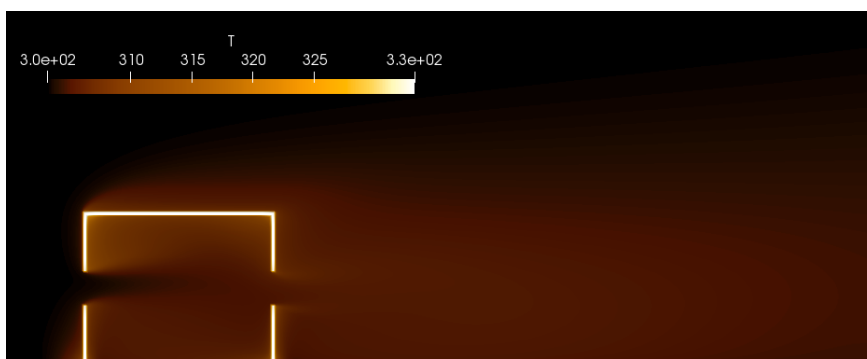
Nas Figuras 46 e 47, apresentam-se as distribuições de velocidade (magnitude), temperatura e isothermas para o caso Karava 2D, no plano de simetria da geometria. Assim como no caso Karava 3D (item 6.3), observa-se que a distribuição de temperatura resulta fortemente influenciada pela distribuição de velocidade. Percebe-se, que na região de alta velocidade do jato próximo à abertura de entrada (ver Figura 46 e 47), tem-se uma faixa de mínima temperatura, causando um decaimento local da mesma.

Figura 46 - Distribuição de velocidade (magnitude), caso Karava 2D.



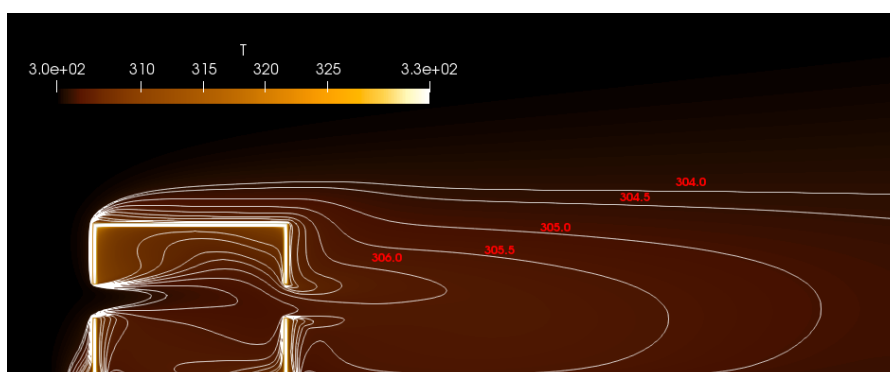
Fonte: Autor (2023).

Figura 47 - Distribuição de temperatura e isotermas, caso Karava 2D.



Fonte: Autor (2023).

Figura 48 - Distribuição de temperatura e isotermas.



Fonte: Autor (2023).

Pode-se observar como o valor da temperatura vai decaindo à medida que o escoamento se afasta da geometria. O fluido ao entrar em contato com a superfície aquecida ganha energia térmica, aumentando sua temperatura. Posteriormente, a tendência do escoamento é perder energia, seja por perdas difusivas ou advectivas para o ambiente com menor temperatura, de forma que a temperatura do fluido diminuí à medida que se afasta da superfície aquecida.

No Quadro 16, mostram-se os valores da vazão adimensional na abertura frontal da edificação.

Quadro 16 - Vazão adimensional na abertura de entrada.

Malha	Vazão adimensional
M1	0,705
M2	0,709
M3	0,710

Fonte: Autor (2023).

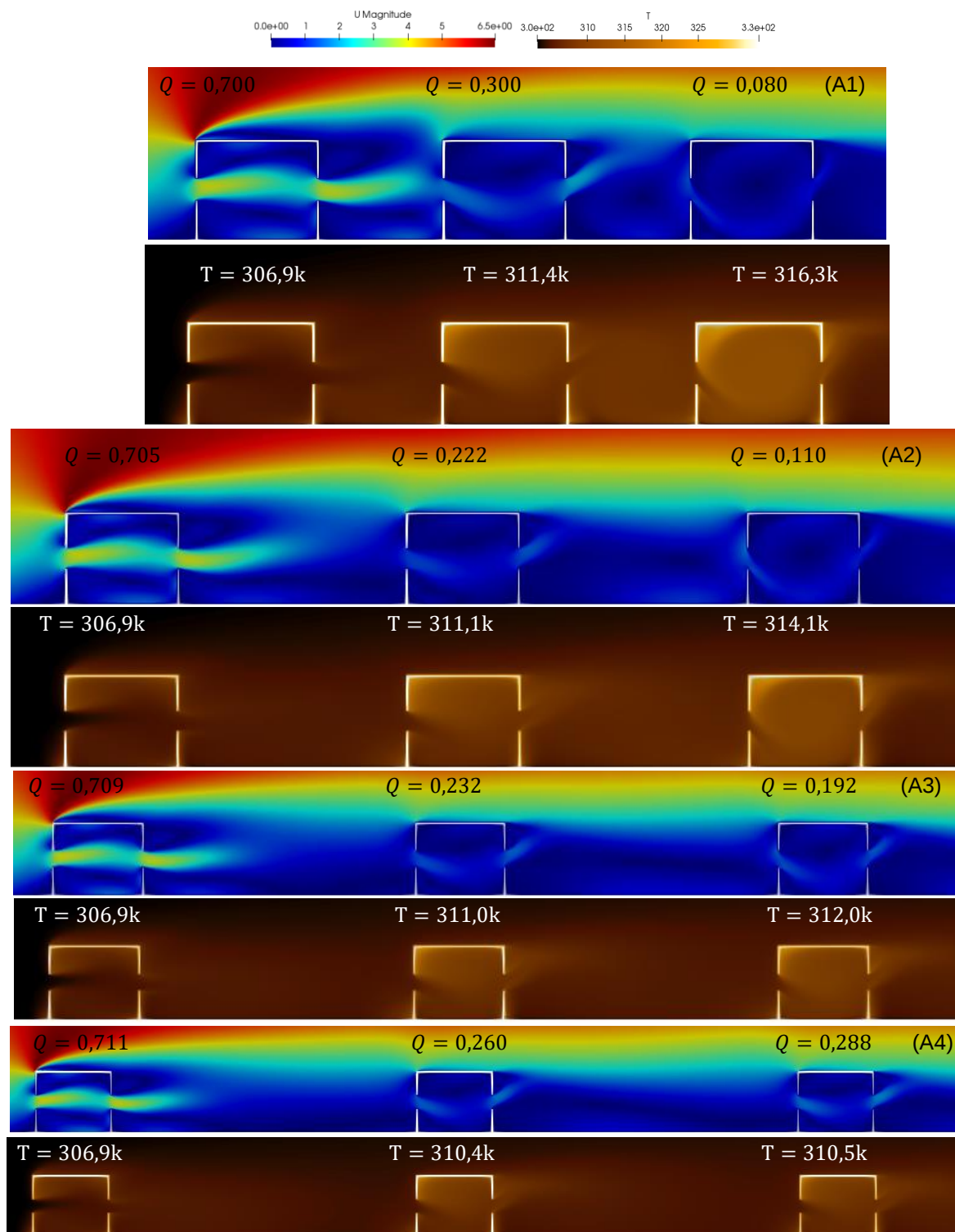
A incerteza numérica associada à qualidade da malha e à convergência foi avaliada através do Índice de convergência de malha (GCI). O valor do GCI foi de 2,2% entre as malhas M1 e M2 e de 0,5% entre as malhas M2 e M3, sendo utilizada a vazão adimensional na abertura como variável de análise. Observa-se que as variações nas variáveis velocidade e temperatura nas três malhas são pequenas, sendo mais sensíveis para os perfis de temperatura (Gráfico 16), nesses cortes observa-se uma tendência de convergência na malha M3. Nos resultados de vazão adimensional observa-se também resultados semelhantes, com a convergência tendendo para a malha M3. A temperatura média interna à geometria para a M3 foi de 306,9 K.

Em função dos resultados apresentados, para as análises dos arranjos das três edificações localizadas em série, será utilizada a mesma discretização da malha M3 nas arestas e nas proximidades das edificações.

6.4.1 Caso “A”

Apresentam-se, na Figura 49, as distribuições de velocidade (magnitude) e temperatura, para os casos nos quais a inclinação do solo é 0°, ou seja, os exemplos identificados como A1, A2, A3 e A4. Também são indicados os valores das vazões adimensionais e temperaturas médias internas para cada uma das edificações. Para simplificar as notações, a primeira geometria será identificada como G1, a segunda de G2 e a terceira de G3. No Anexo 3 são mostradas as distribuições do coeficiente de pressão para cada caso.

Figura 49 – Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: A1, A2, A3 e A4.



Fonte: Autor (2023).

Nas imagens, pode-se perceber que as maiores temperaturas estão localizadas nas edificações a sota-vento. Em todos os casos, a última geometria experimenta uma

temperatura média interna maior que as demais. Essa diferença tende a diminuir à medida que o afastamento entre elas aumenta, conforme mostra-se no Quadro 17.

Quadro 17 - Diferença de temperaturas entre as geometrias.

	ΔT_{G1-G2}	ΔT_{G2-G3}	ΔT_{G1-G3}
Caso A1	+4,5°C	+4,9°C	+9,4 °C
Caso A2	+4,2°C	+3,0°C	+7,2 °C
Caso A3	+4,1°C	+1,0°C	+5,1 °C
Caso A4	+3,5°C	+0,1°C	+3,6 °C

Fonte: Autor (2023).

Quando aumenta-se a distância entre as edificações, os efeitos dissipativos de energia térmica ocorrem com maior intensidade pelo fato de ar aquecido ter maior contato com o ar a menor temperatura (ar a temperatura ambiente), e a difusividade térmica ocorrer de forma mais expressiva. Observando-se assim, uma menor temperatura nas geometrias a sota-vento, conforme aumenta o afastamento entre as edificações.

No Quadro 18, apresentam-se as vazões adimensionais para cada geometria e caso analisado. Nota-se que de forma geral, as vazões aumentam à medida que cresce o afastamento entre as edificações. Porém algo interessante ocorre no caso A1. Observa-se que a vazão na segunda edificação (G2) é 36% maior que a mesma geometria do caso A2, isso deve-se ao fato da abertura de entrada na edificação G2 aproveitar a alta velocidade do jato de saída da edificação G1 aumentando, portanto, o valor da vazão. Quando afastamos as geometrias (caso A2), o jato de saída na primeira edificação, G1, fica distante da abertura de entrada da G2. Dessa forma não existe mais o aproveitamento desse jato pela abertura de entrada da G2.

As variações de velocidade e temperatura permaneceram praticamente constante para a geometria G1 independentemente do distanciamento adotado.

Quadro 18 - Vazões adimensionais de cada geometria para cada caso.

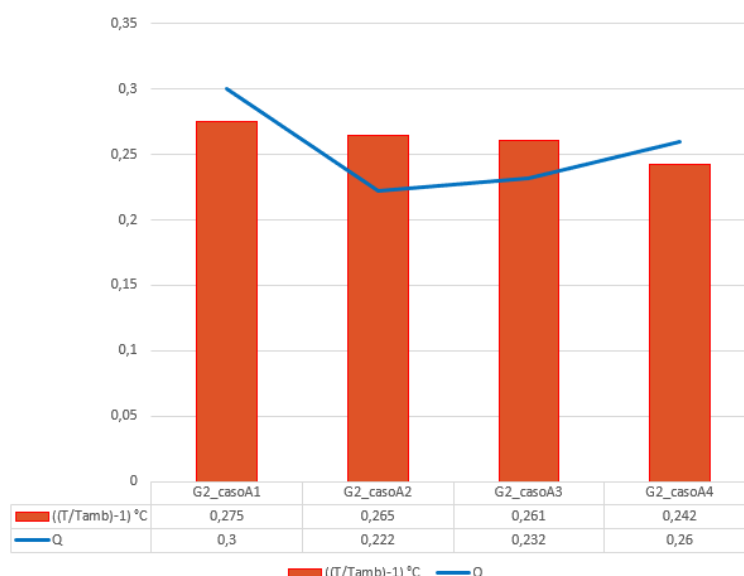
	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G3}
Caso A1	0,700	0,300	0,080
Caso A2	0,705	0,222	0,110
Caso A3	0,709	0,232	0,192
Caso A4	0,711	0,260	0,288

Fonte: Autor (2023).

A partir das simulações pode-se entender as relações importantes entre a ventilação natural e o conforto térmico. Por exemplo, é possível observar que apesar da vazão da edificação G2 no caso A1, ser 15% maior do que a vazão da mesma geometria no caso A4, a temperatura no caso A4 é menor que no caso A1. Ocorre que, apesar de ter uma vazão maior, esse ar é mais aquecido em função da maior proximidade entre as geometrias, de forma que mesmo tendo-se uma vazão maior a temperatura média é superior em comparação com o caso A4.

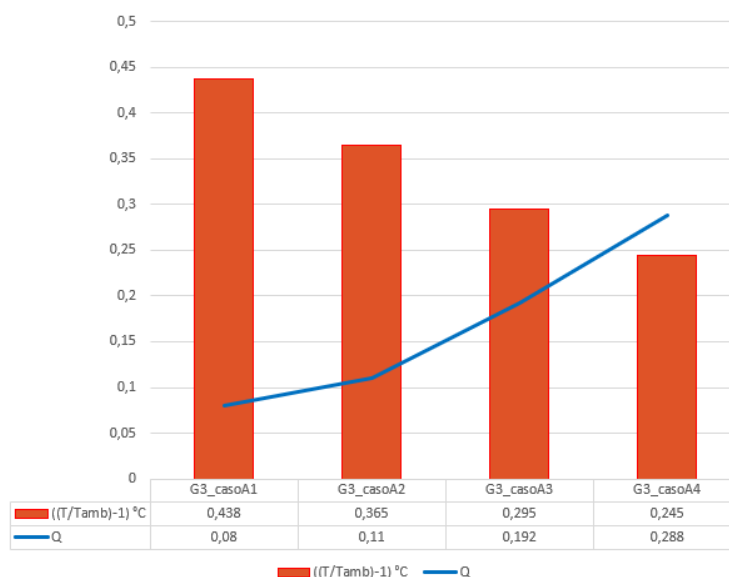
Apresenta-se nos Gráficos 17 e 18, a correlação entre os valores da vazão e temperaturas adimensionalizadas para as edificações G2 e G3, onde mostra-se como a variação do distanciamento influencia nos valores das variáveis.

Gráfico 17 - Vazões e temperaturas médias internas adimensionais para G2, casos A.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 18 - Vazões e temperaturas médias internas adimensionais para G3, casos A.



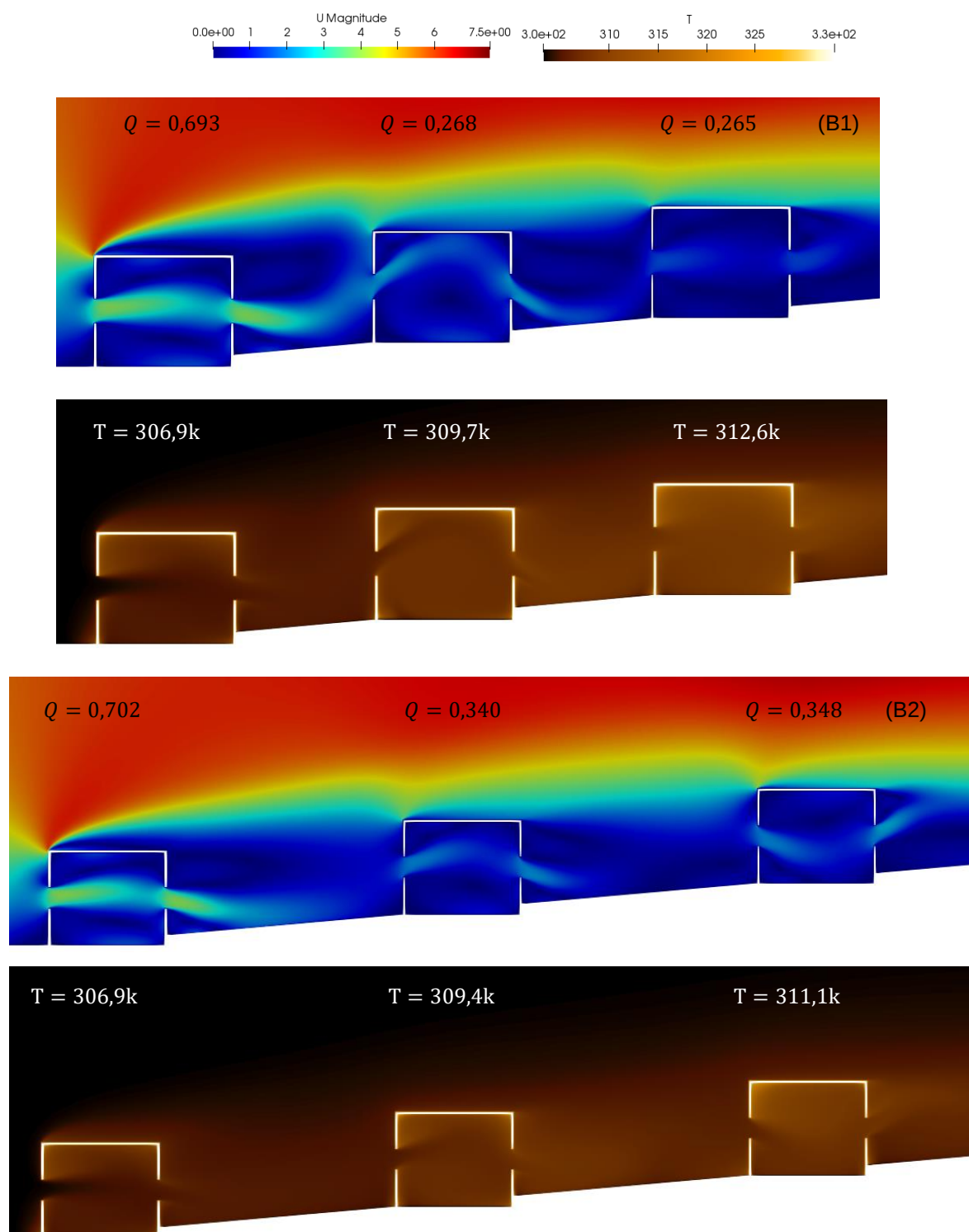
Fonte: Autor (2023).

Nota-se que, existe uma tendência de diminuição da temperatura na medida que cresce o distanciamento entre as geometrias. O valor da vazão tende a aumentar em função do distanciamento, com exceção da edificação G2 no caso A1.

6.4.2 Caso “B”

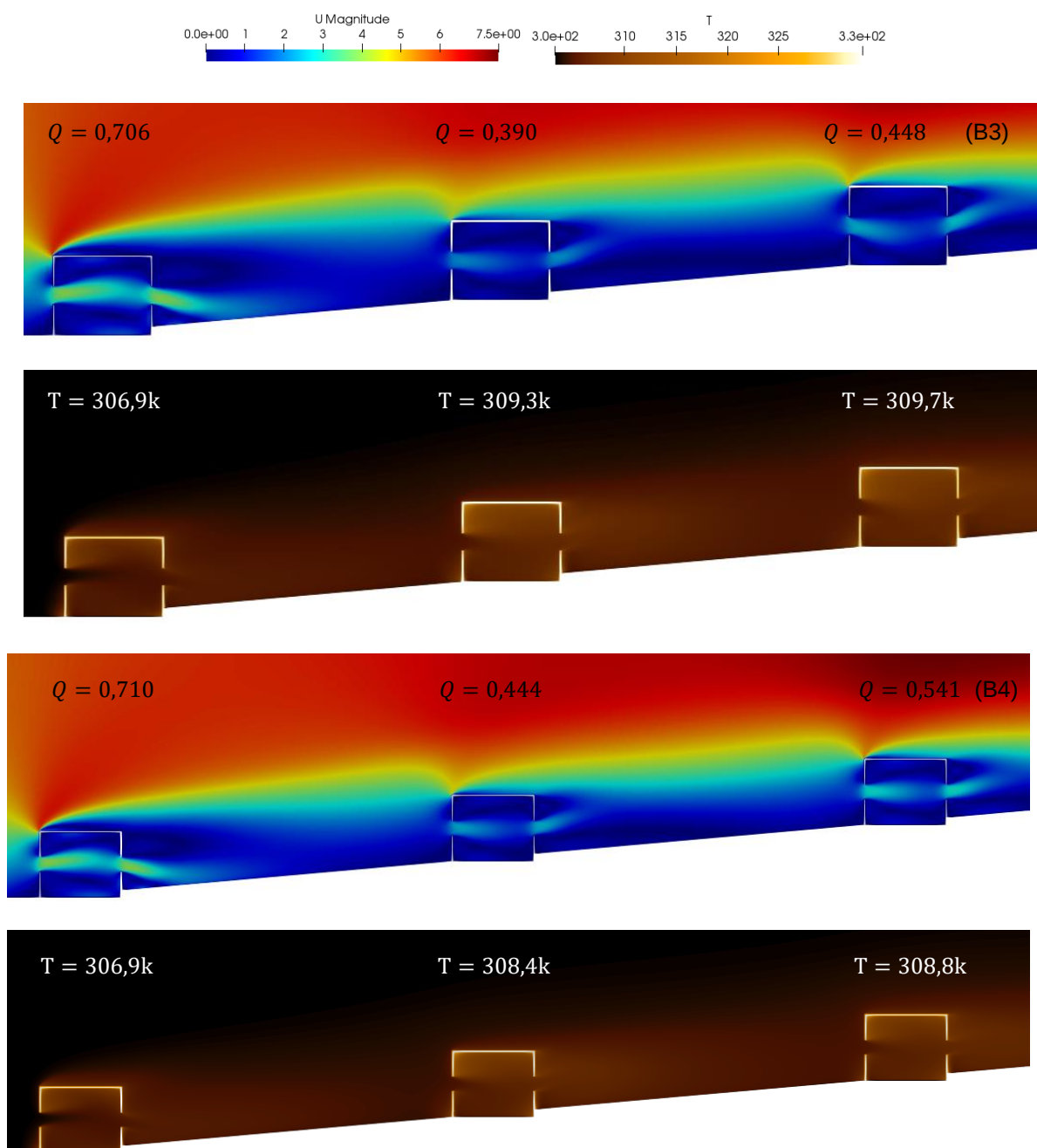
Apresenta-se, nas Figuras 50 e 51, as distribuições de velocidade (magnitude) e temperaturas médias, para os casos nos quais a inclinação do solo é 5° , ou seja, os casos B1, B2, B3 e B4. Também se mostram os valores das vazões adimensionais e as temperaturas médias internas relacionadas com cada edificação. No Anexo IV são mostradas as distribuições de coeficiente de pressão para os quatro distanciamentos.

Figura 50 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: B1, B2.



Fonte: Autor (2023).

Figura 51 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: B3, B4.



Fonte: Autor (2023).

Para os casos B, observa-se que, de forma geral, que os valores das vazões na edificação G3 são levemente maiores que o da segunda edificação, G2. Isso se deve ao fato da última edificação ter uma cota maior que a segunda, conseguindo que camadas de fluidos com velocidade mais altas aumentem a vazão na abertura de entrada da última edificação, conforme mostra-se na Figura 52 (caso B3). Observa-se uma pequena variação entre os valores das vazões na edificação G1, sendo

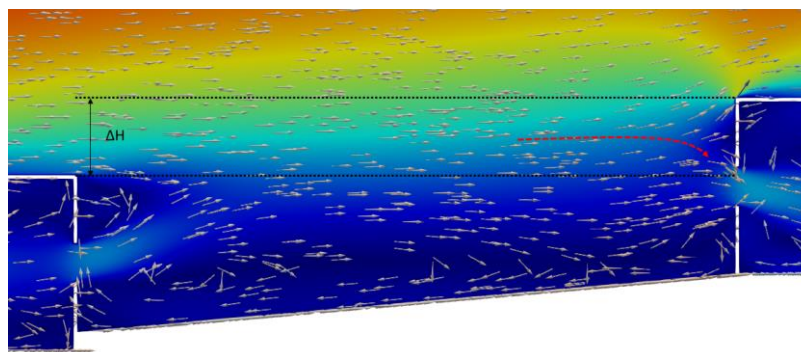
aproximadamente 2,4% do caso B1 para o caso B4. Entretanto, as temperaturas médias para a primeira edificação permaneceram as mesmas para os quatro distanciamentos analisados, conforme Quadro 19.

Quadro 19 - Vazões adimensionais.

	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G3}
Caso B1	0,693	0,268	0,265
Caso B2	0,702	0,340	0,348
Caso B3	0,706	0,390	0,448
Caso B4	0,710	0,444	0,541

Fonte: Autor (2023).

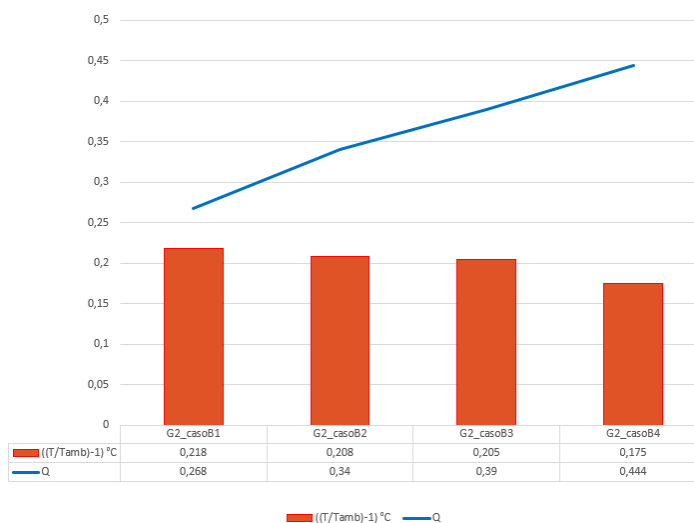
Figura 52 - Perfil de velocidade (magnitude) e vetores par ao caso B3.



Fonte: Autor (2023).

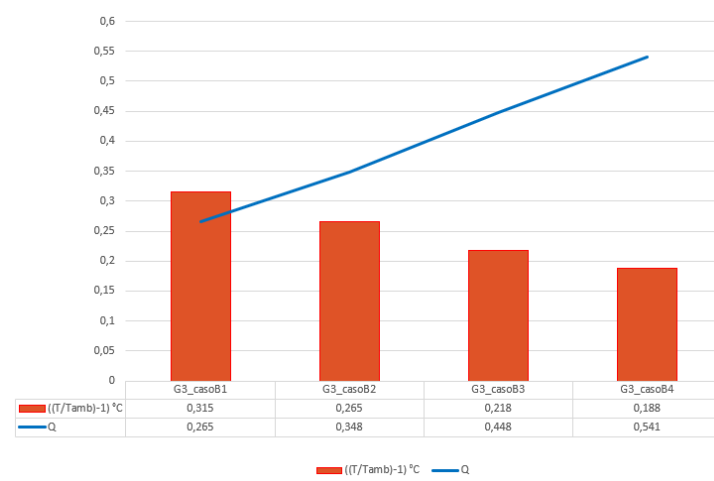
Apresenta-se nos Gráficos 19 e 20, a correlação entre vazão e temperatura adimensionalizada para as edificações G2 e G3 em função da variação do distanciamento entre as edificações. Da mesma forma que no caso anterior observa-se a tendência da diminuição da temperatura média interna e o aumento do valor da vazão quando ocorre um incremento do distanciamento entre as geometrias.

Gráfico 19 - Vazões e temperaturas médias internas para a geometria G2, casos B.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 20 - Vazões e temperaturas médias internas para a geometrias G3, casos B.

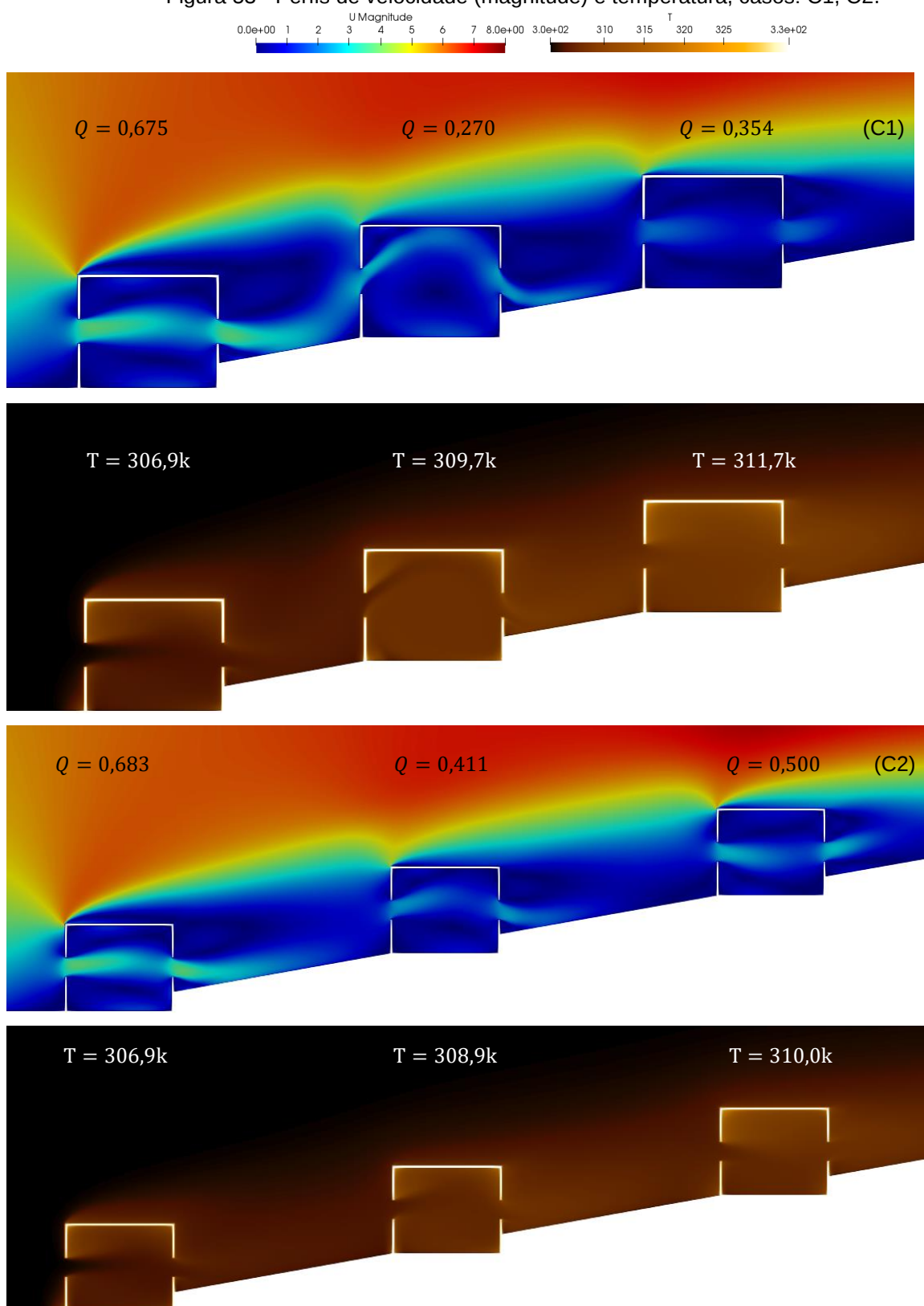


Fonte: Autor (2023).

6.4.3 Caso “C”

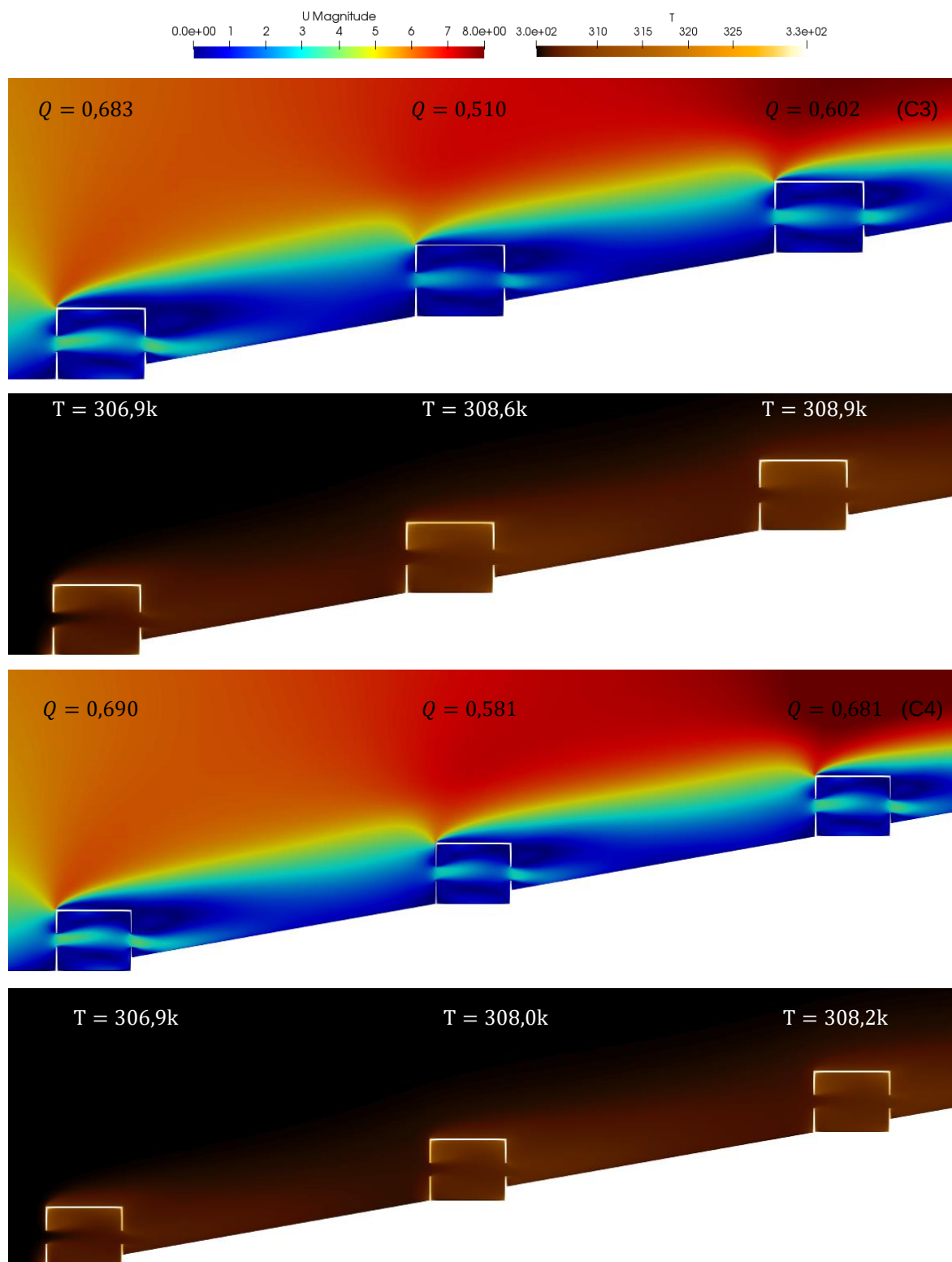
Apresenta-se nas Figuras 53 e 54 as distribuições de velocidade (magnitude) e temperaturas médias, para os casos definidos como C1, C2, C3 e C, ou seja, caso com inclinação do solo com 10°. Também, mostram-se os valores das vazões adimensionais e temperaturas médias. No Anexo V são mostradas as distribuições do coeficiente de pressão para todos os casos.

Figura 53 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: C1, C2.



Fonte: Autor (2023).

Figura 54 - Perfis de velocidade (magnitude) e temperatura, casos: C3, C4.



Fonte: Autor (2023).

Da mesma forma que os casos B, as geometrias G3 possuem maior vazão que as G2, também pelos mesmos motivos citados anteriormente. Ocorre também uma

variação de +2,2% entre o caso C1 e C4 para a geometria G1, semelhante ao observado no caso B.

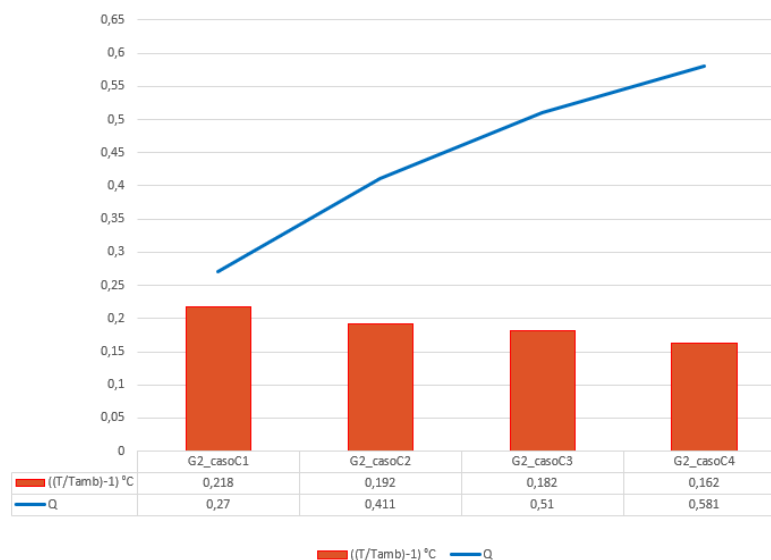
Quadro 20 - Vazões adimensionais.

	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G3}
Caso C1	0,675	0,270	0,354
Caso C2	0,683	0,411	0,500
Caso C3	0,683	0,510	0,602
Caso C4	0,690	0,581	0,681

Fonte: Autor (2023).

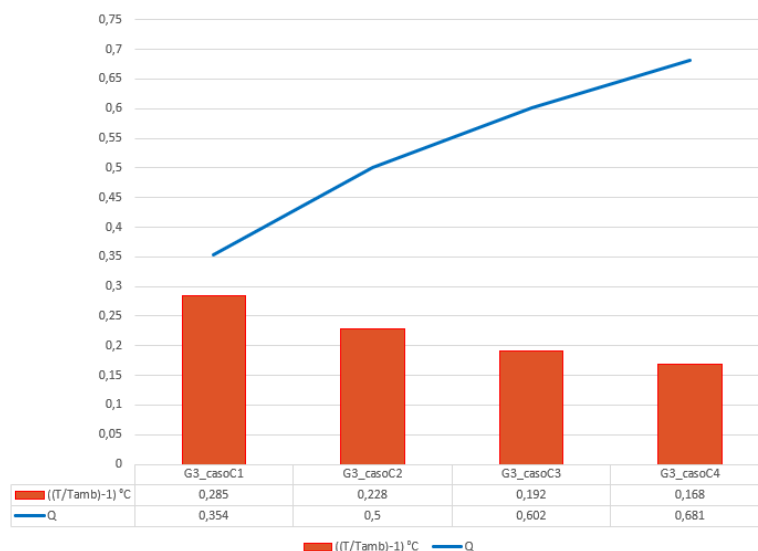
Apresenta-se nos Gráficos 21 e 22, a correlação entre vazão e temperatura adimensionalizada para as G2 e G3, onde é mostrado como a variação do distanciamento influencia na variação de vazão e temperatura média interna para geometria. Da mesma forma que nos casos anteriores, observa-se a tendência da diminuição da temperatura média interna e aumento da vazão quando ocorre um maior distanciamento entre as geometrias.

Gráfico 21 - Vazões e temperaturas médias internas para a geometria G2, caso C.



Fonte: Autor (2023).

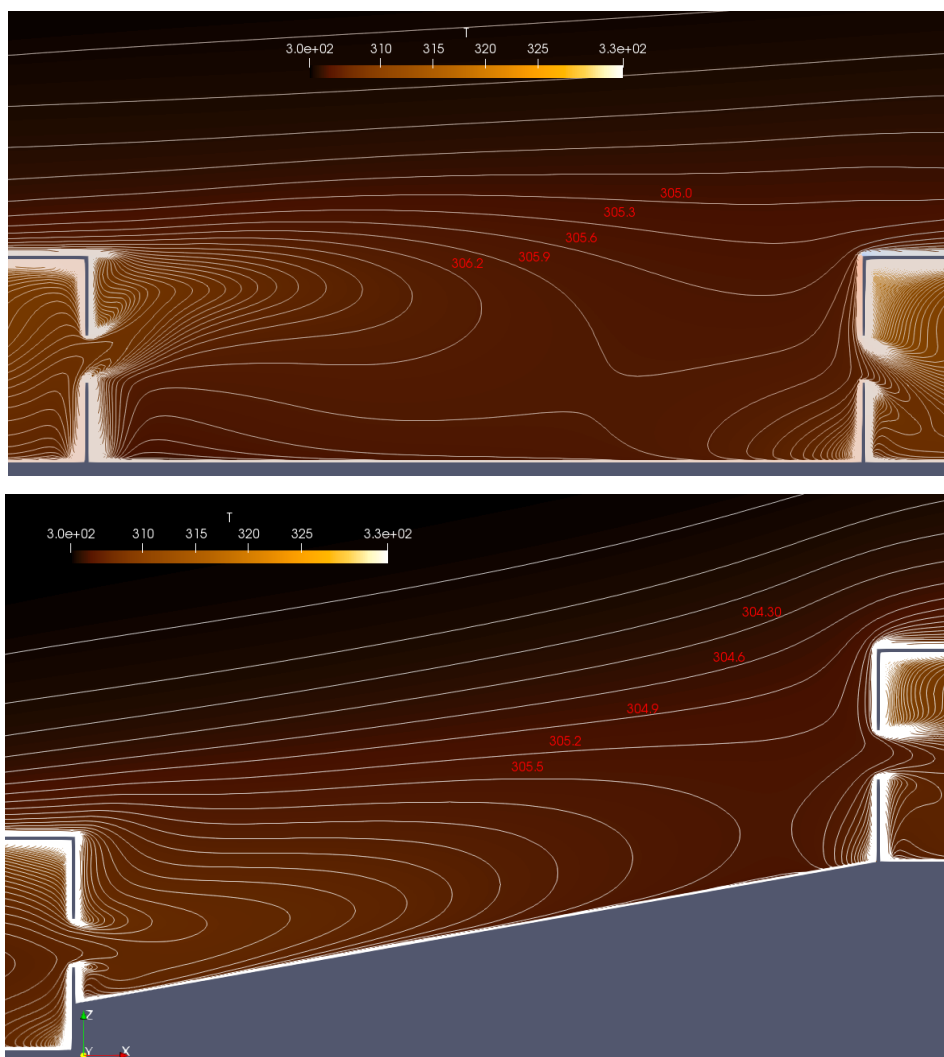
Gráfico 22 - Vazões e temperaturas médias internas para a geometria G3, caso C.



Fonte: Autor (2023).

No Gráfico 23, pode-se observar o valor da temperatura interna em cada edificação em função da posição e do ângulo de inclinação do solo. É possível perceber que os casos C são os que possuem uma menor temperatura interna média. A inclinação do solo, além de contribuir para uma maior vazão como visto no item 6.4.2, faz com que o modelo de edificação tenha um escoamento com menor temperatura pelo fato da abertura de entrada da edificação localizada a sota vento, estar em um valor de cota maior, e, portanto, a região da esteira tem menos influência, podendo as residências a sota vento captar camadas de ar mais frias, conforme se pode ver na Figura 55.

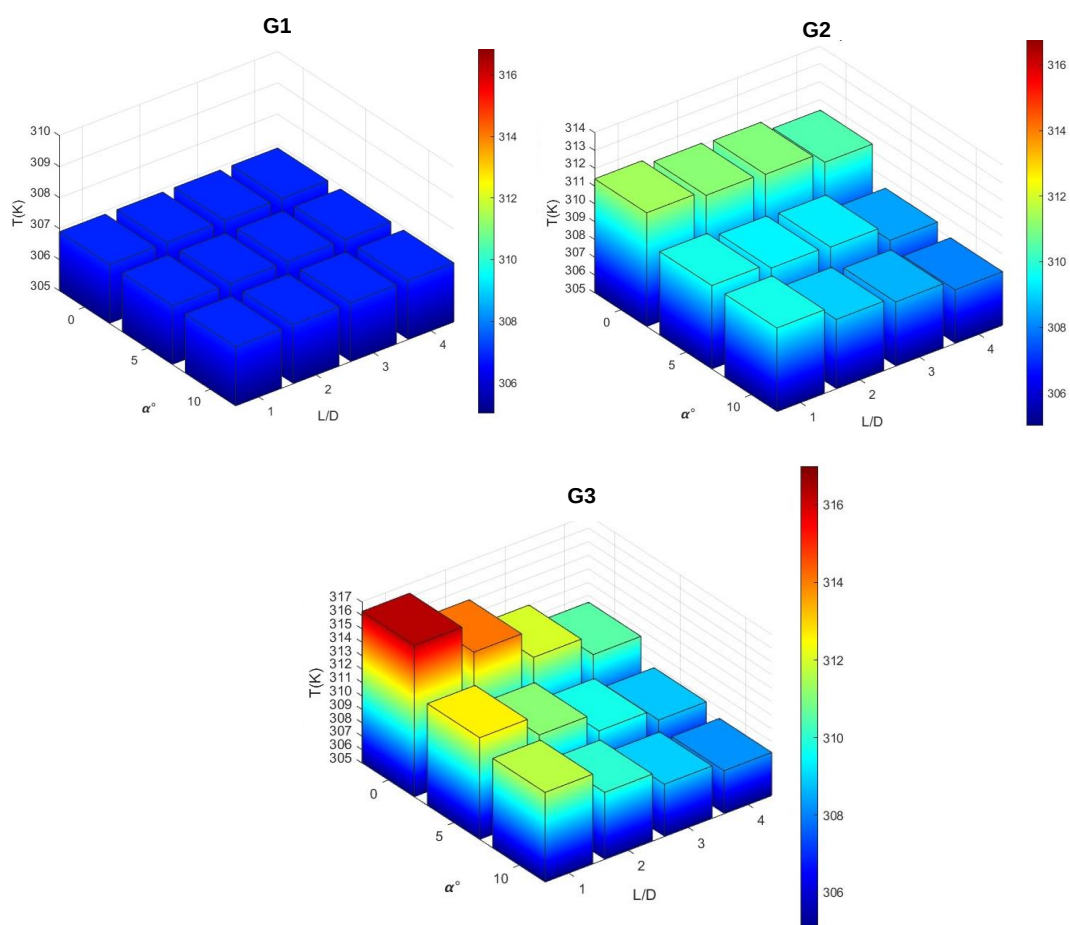
Figura 55 - Isotermas entre as Geometrias G2 e G3, para os casos A3 e C3.



Fonte: Autor (2023).

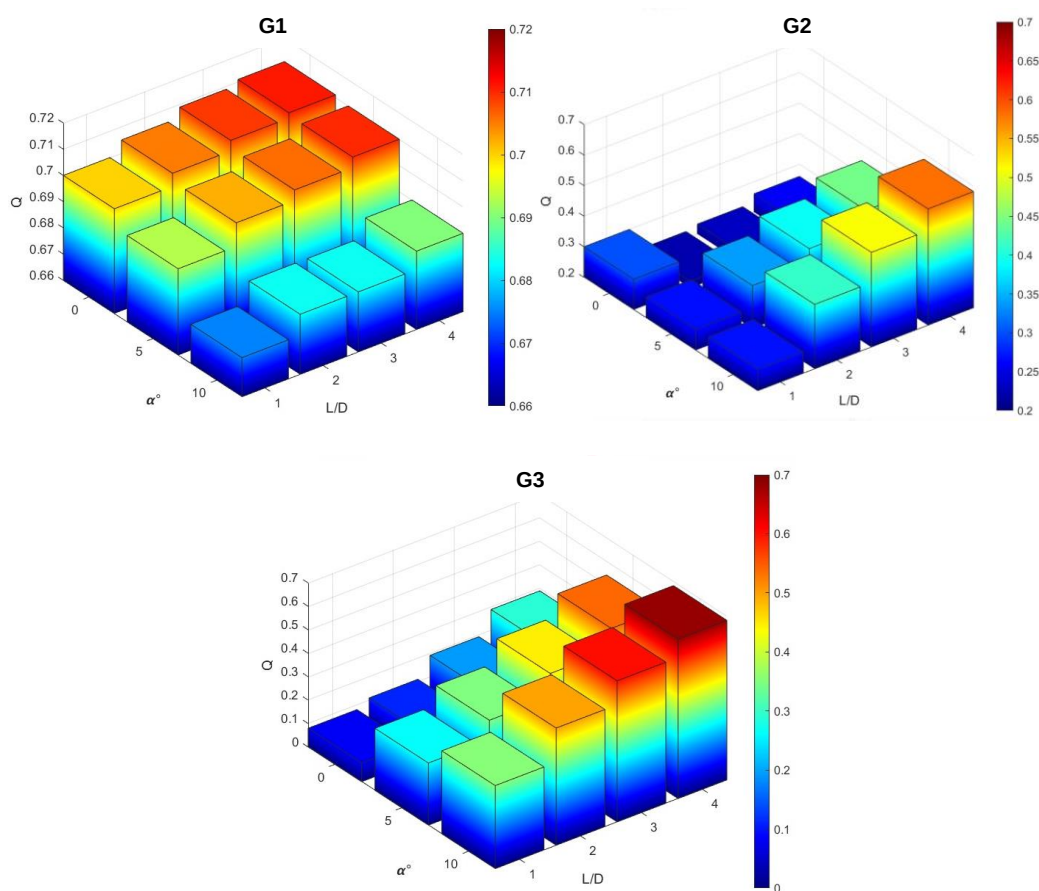
Observa-se, de forma geral, uma relação inversa entre vazão e temperatura, ou seja, maiores vazões tendem a gerar menores temperaturas internas. Percebe-se também, como os maiores afastamentos e maiores inclinações de solo tendem a aumentar as vazões e diminuir as temperaturas.

Gráfico 23 - Temperaturas médias internas para cada geometria.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 24 – Vazões adimensionais para cada geometria.



Fonte: Autor (2023).

No Gráfico 25, mostram-se as temperaturas médias internas para as edificações 2 e 3 em todos os casos. Analisando o gráfico, observa-se como a inclinação do solo influência nas médias de temperatura, sendo essa variação muito mais importante para a terceira edificação. Pode-se notar, por exemplo, que o caso C2 tem menor temperatura do que o caso A4. De forma que a inclinação do solo permite um maior adensamento das edificações, mantendo a mesma temperatura interna média ou até menor do que casos com um maior adensamento. Finalmente, no Quadro 21, apresenta-se um resumo de todas os valores normalizados com relação à edificação isolada das temperaturas médias internas e suas respectivas vazões adimensionais.

Gráfico 25 – Temperaturas médias (K) para as geometrias G2 e G3.



Fonte: Autor (2023).

Quadro 21 - Resumo das vazões e temperaturas médias internas.

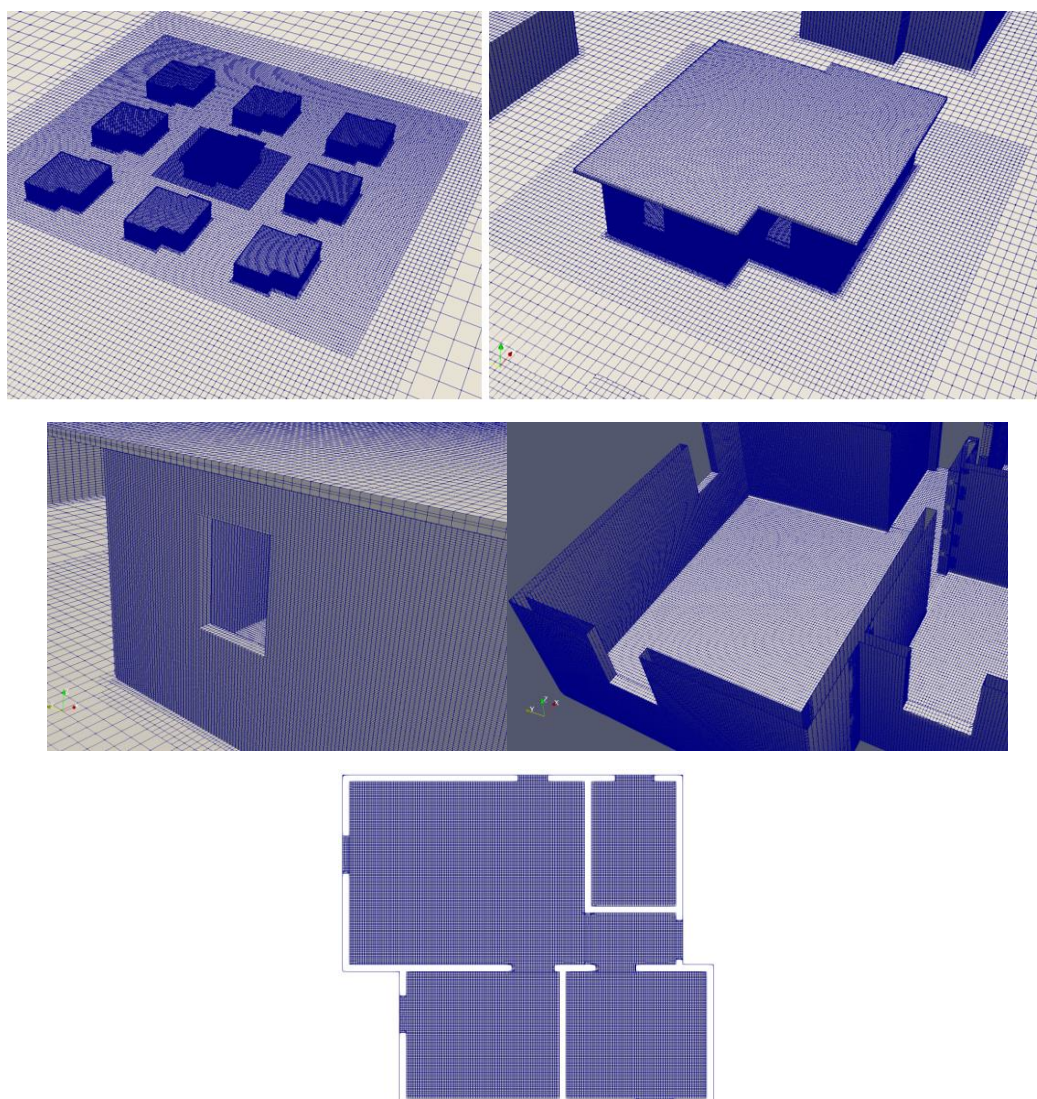
Caso	Q/ Qunitária			T/Tunitária (°C)		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Unitária	1			1		
A1	0,986	0,423	0,113	1	1,133	1,279
A2	0,993	0,313	0,155	1	1,124	1,213
A3	0,999	0,327	0,270	1	1,121	1,151
A4	1,001	0,366	0,406	1	1,104	1,107
B1	0,976	0,377	0,373	1	1,083	1,169
B2	0,989	0,479	0,490	1	1,074	1,124
B3	0,994	0,549	0,631	1	1,071	1,083
B4	1,000	0,625	0,762	1	1,044	1,056
C1	0,951	0,380	0,499	1	1,083	1,142
C2	0,962	0,579	0,704	1	1,059	1,092
C3	0,962	0,718	0,848	1	1,050	1,059
C4	0,972	0,818	0,959	1	1,033	1,039

Fonte: Autor (2023).

6.5 Conjunto Habitacional

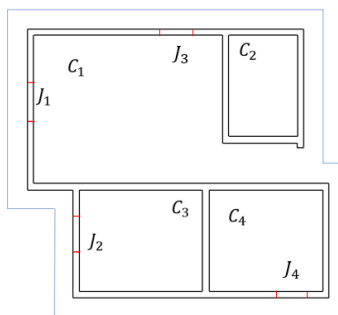
Na Figura 56, mostram-se algumas imagens da malha utilizada no último exemplo analisado. Para este caso também foi utilizado a ferramenta *snappyhexMesh*, assim como no caso do problema tridimensional de Karava (seção 5.3.3). O total de volumes empregados na discretização da casa isolada foi de 2.4 milhões, por sua vez, para os casos em que a casa está inserida no conjunto habitacional de 9 edificações foi de 3.5 milhões para cada malha. Na Figura 57, mostra-se a nomenclatura utilizada para os quatro cômodos e quatro janelas para posterior análise da temperatura interna e valores das vazões.

Figura 56 - Malha computacional utilizada.



Fonte: Autor (2023).

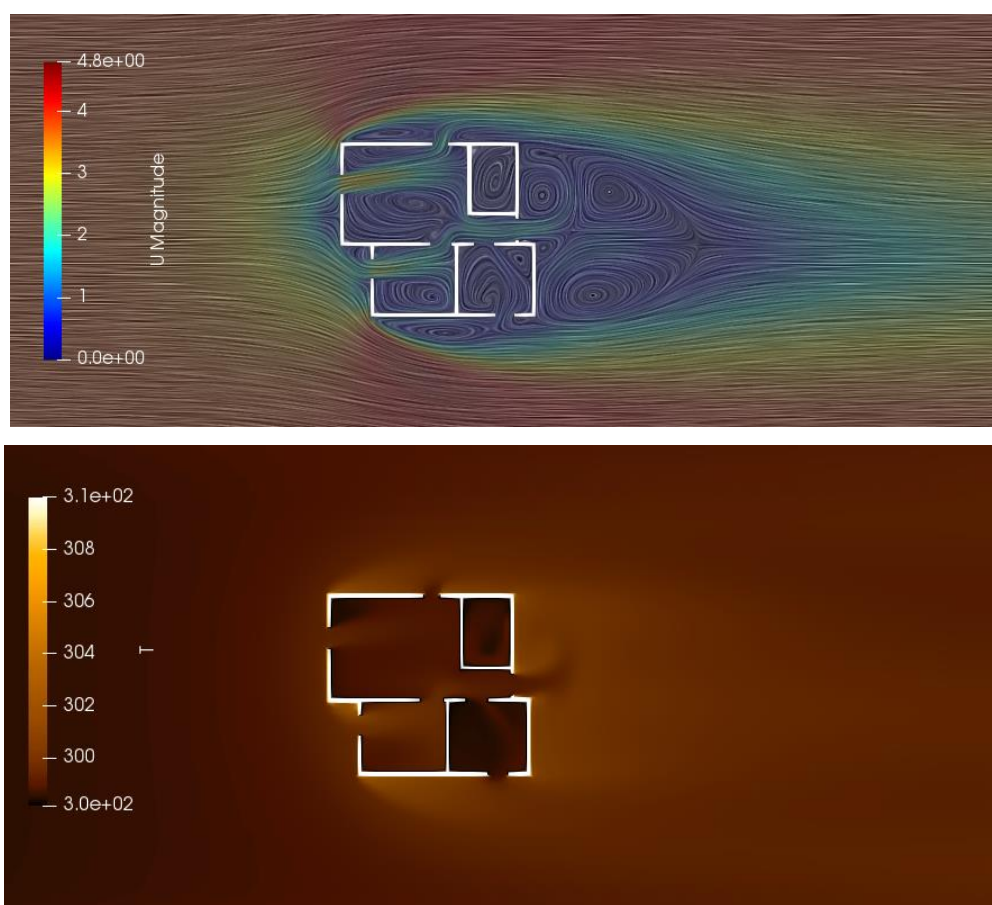
Figura 57 - Cômodos C_1, C_2, C_3, C_4 , e janelas J_1 e J_2



Fonte: Autor (2023).

Apresenta-se na Figura 58, as distribuições de velocidade (magnitude), as linhas de corrente e a distribuição de temperaturas no caso da casa isolada. Os valores das vazões adimensionais nas janelas J_1 e J_2 , são respectivamente: 0,556 e 0,500. Por sua vez, os valores das temperaturas médias internas dos cômodos C_1, C_2, C_3 e C_4 são respectivamente: 299,1K (26°C), 298,3K (25,2°C), 299,5K (26,4°C) e 298,5K (25,4°C).

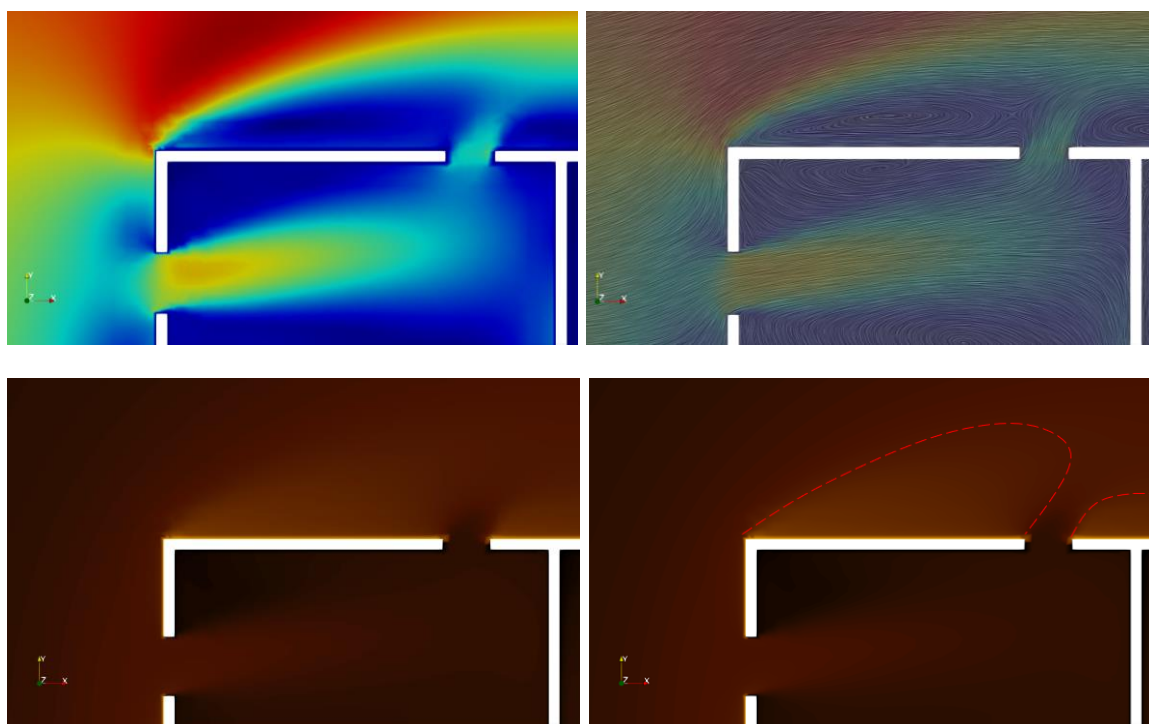
Figura 58 - Distribuições de velocidade (magnitude), linhas de corrente e temperaturas.



Fonte: Autor (2023).

É importante destacar a interação entre os campos de velocidade e temperatura. Nota-se como as regiões de alta velocidade influenciam as distribuições de temperatura. Também se observa, como os vórtices as distribuições de temperatura. Algumas regiões de alta velocidade dificultam as trocas térmicas com as demais camadas de fluido, criando uma espécie de “parede de vento” fazendo com que a massa de ar interna ao vórtice mantenha as temperaturas consideravelmente diferentes das camadas de ar próximas. Tal fenômeno pode ser observado na Figura 59, onde a faixa de alta velocidade da aresta externa da parede da residência faz com que uma massa de ar quente fique interna ao vórtice, enquanto as camadas externas ao vórtice têm temperaturas menores. O mesmo efeito observa-se no aumento de velocidade causado pela janela J_3 do quarto C_1 .

Figura 59 - Interação entre vórtices e temperatura.

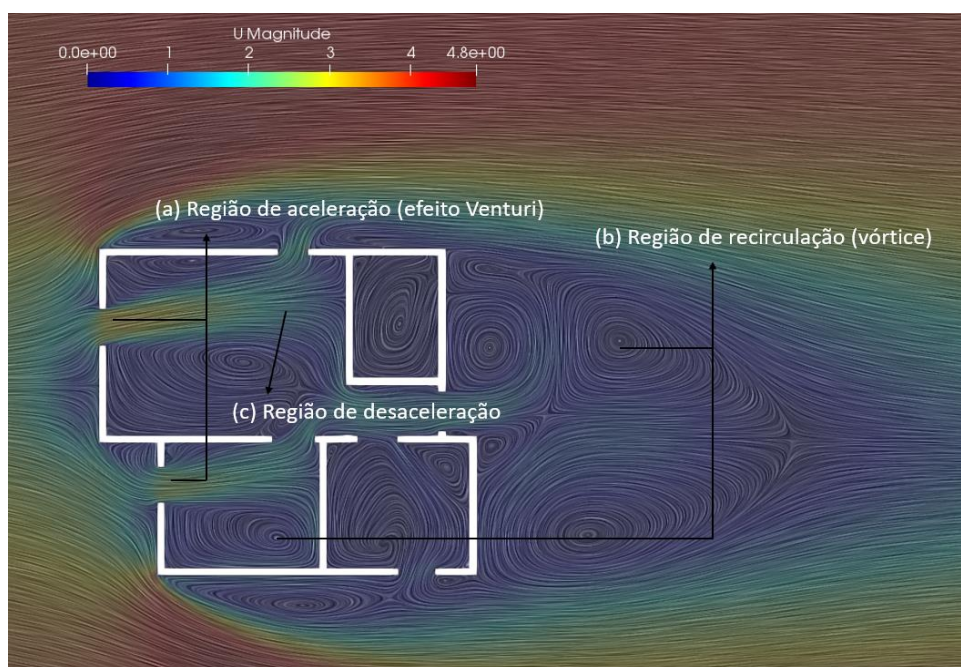


Fonte: Autor (2023).

Nas Figuras 60 e 61 (linhas de corrente), é possível observar diversos fenômenos típicos de escoamentos ao redor de corpos rombudos (não aerodinâmicos), que são os casos de escoamentos em meios urbanos. Pode-se destacar: uma região de aceleração na interface das janelas, ver marcações (a) e (f); esse efeito é conhecido como efeito Venturi e ocorre quando existe uma diminuição

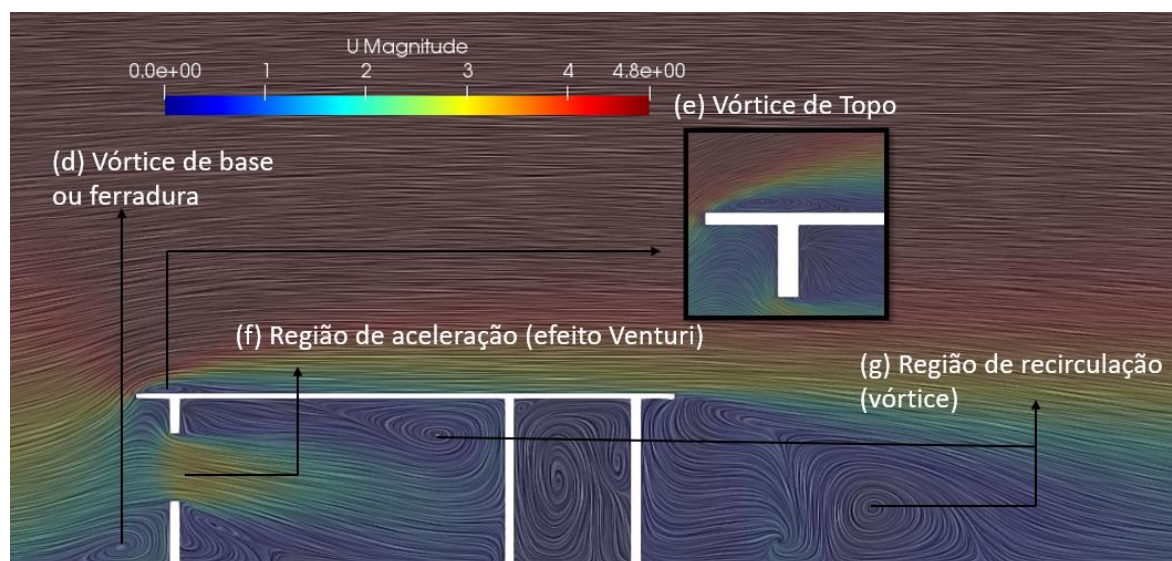
da área da seção por onde um fluido escoar, quando essa estricção acontece, as linhas de corrente se aproximam, aumentando a velocidade e diminuindo a pressão na região. Da forma inversa, quando ocorre um aumento da seção transversal, as linhas de corrente se afastam, diminuindo as velocidades e aumentando as pressões, ver marcação (c). Também se observam regiões de recirculação, ver (b) e (g), os vórtices no telhado (e) e de base (d). Os vórtices são formados por fortes gradientes de pressão causados pela natureza da geometria, o fluido tenta equilibrar essas diferenças de pressões e escoar para região, gerando, via de regra, um escoamento giratório com forma circular ou semelhante.

Figura 60 - Linhas de corrente plano $z = 0.5H$.



Fonte: Autor (2023).

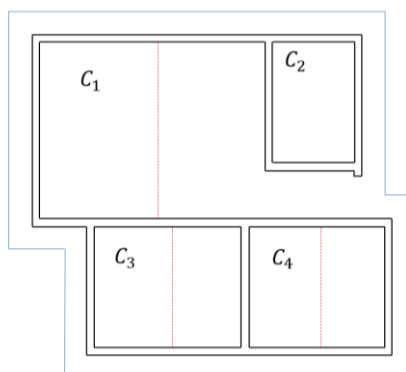
Figura 61 - Linhas de corrente plano vertical que divide ao meio a janela J_1 .



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 62, mostram-se as linhas transversais traçadas no meio dos cômodos de longa permanência (quartos, sala e cozinha) onde foram determinadas as velocidades médias necessárias para caracterizar o conforto térmico. Consideram-se 100 pontos por linha para determinar o comportamento médio da velocidade no cômodo. Essa velocidade, identificada como (V_a), será utilizada para obter o valor da variável "A" necessária no cálculo da temperatura operativa (T_o), ver a Eq. (40) no item 4.5.4. A medição da variável foi realizada a uma altura de 85 cm conforme recomendado na norma ISO 7726 (ISO, 1998).

Figura 62 - Linhas transversais no meio dos cômodos.



Fonte: Autor (2023).

No Quadro 22, mostram-se para cada cômodo de longa permanência os valores da velocidade médias internas (V_a), das temperaturas médias internas (T_a) e operativa (T_o).

Quadro 22 - Velocidade média, temperatura média interna e temperatura operativa.

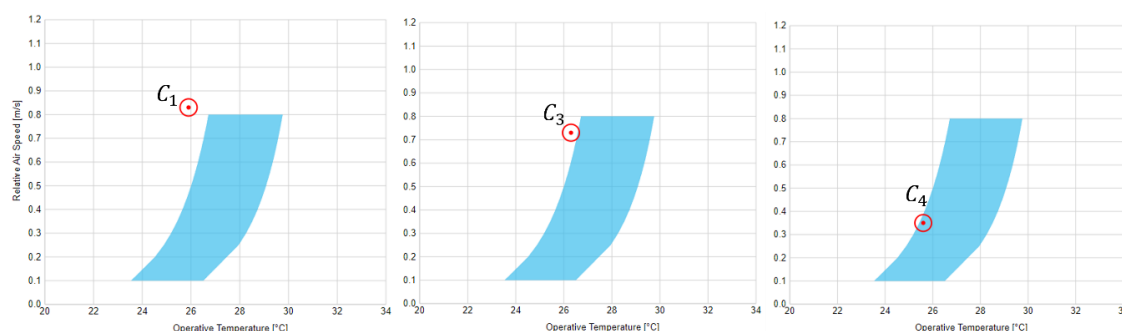
	C_1	C_3	C_4
Veloc. média do vento (V_a)	0.83 m/s	0.73 m/s	0.35 m/s
Temp. média interna (T_a)	299,1K (26°C)	299,5K (26,4°C)	298,5K (25,4°C)
Temp. Operativa (T_o)	299,0k (25,9°C)	299,4k (26,3°C)	298,8k (25,6°C)

Fonte: Autor (2023).

Vale destacar que a temperatura operativa foi levemente menor para os cômodos C_1 e C_3 , quando comparados com a temperatura média interna obtida pela simulação, já no cômodo C_4 a temperatura operativa ficou maior. Isso demonstra que a velocidade do vento (variável incluída no cálculo da T_o) influencia na temperatura percebida pelo ocupante, sendo menor quando as velocidades de vento são maiores e maiores quando as velocidades são menores.

Observa-se, na Figura 63, que os cômodos C_1 e C_3 , ficaram na faixa de desconforto térmico. Para o cômodo C_3 seria necessário a utilização de vestimentas de maior *clo*, como camisas de algodão, calças longas, ou até mesmo camisas de manga comprida. Para o cômodo C_1 , é necessário algum controle da velocidade do vento para que se obtenha conforto térmico. Já o cômodo C_4 , que apesar de ter temperaturas menores, não teve problemas para desconforto para o frio, ficando dentro das faixas para *clo* 0.50.

Figura 63 - Zonas de Conforto térmico para os cômodos da casa isolada.

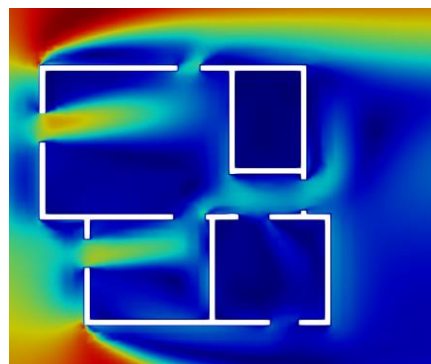
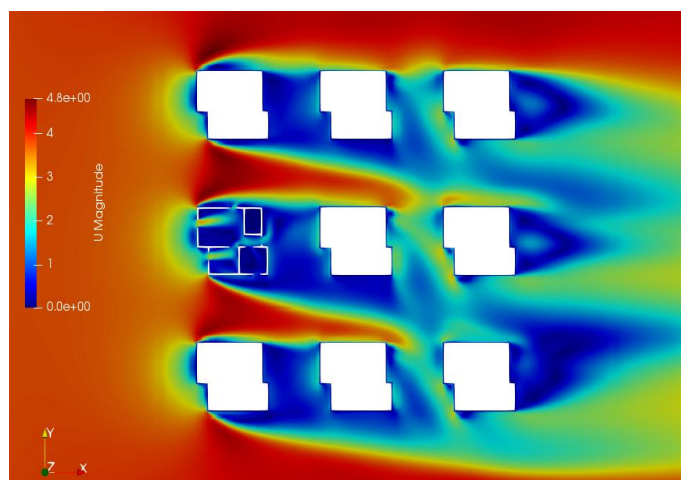


Fonte: Autor (2023).

Ainda sobre os gráficos representados na Figura 63, é importante notar que, apesar das temperaturas dos cômodos C_1 e C_3 serem maiores do que as do cômodo C_4 , eles ficaram na situação de desconforto, por conta, principalmente, das velocidades de vento internas ao ambiente. Dessa forma, observa-se a importância em se considerar tanto as variáveis de temperatura como velocidade de vento em uma análise de conforto térmico.

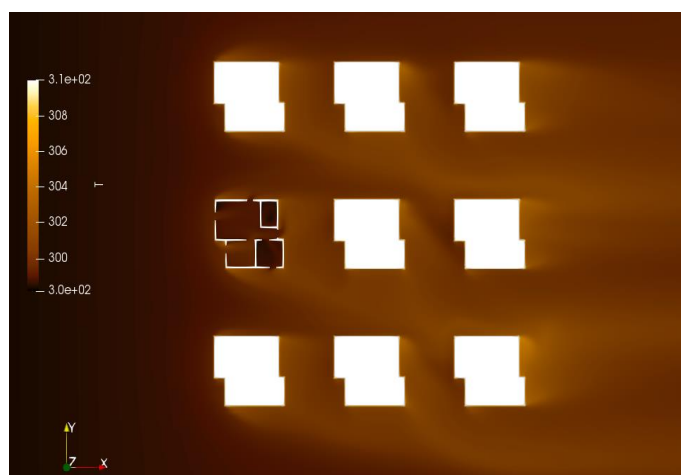
Nas Figuras 64 a 66, apresentam-se as distribuições de velocidade (magnitude) e de temperatura no plano $x - y$ para $z = 0.5H$ no caso da casa inserida no conjunto habitacional. Também se mostram os valores das vazões associadas com as aberturas nas janelas J_1 e J_2 , e as temperaturas médias internas para os cômodos C_1, C_2, C_3 e C_4 .

Figura 64 - Perfil de velocidade (magnitude) e temperatura para a posição 1.



$$Q_{J_1} = 0,555$$

$$Q_{J_2} = 0,498$$

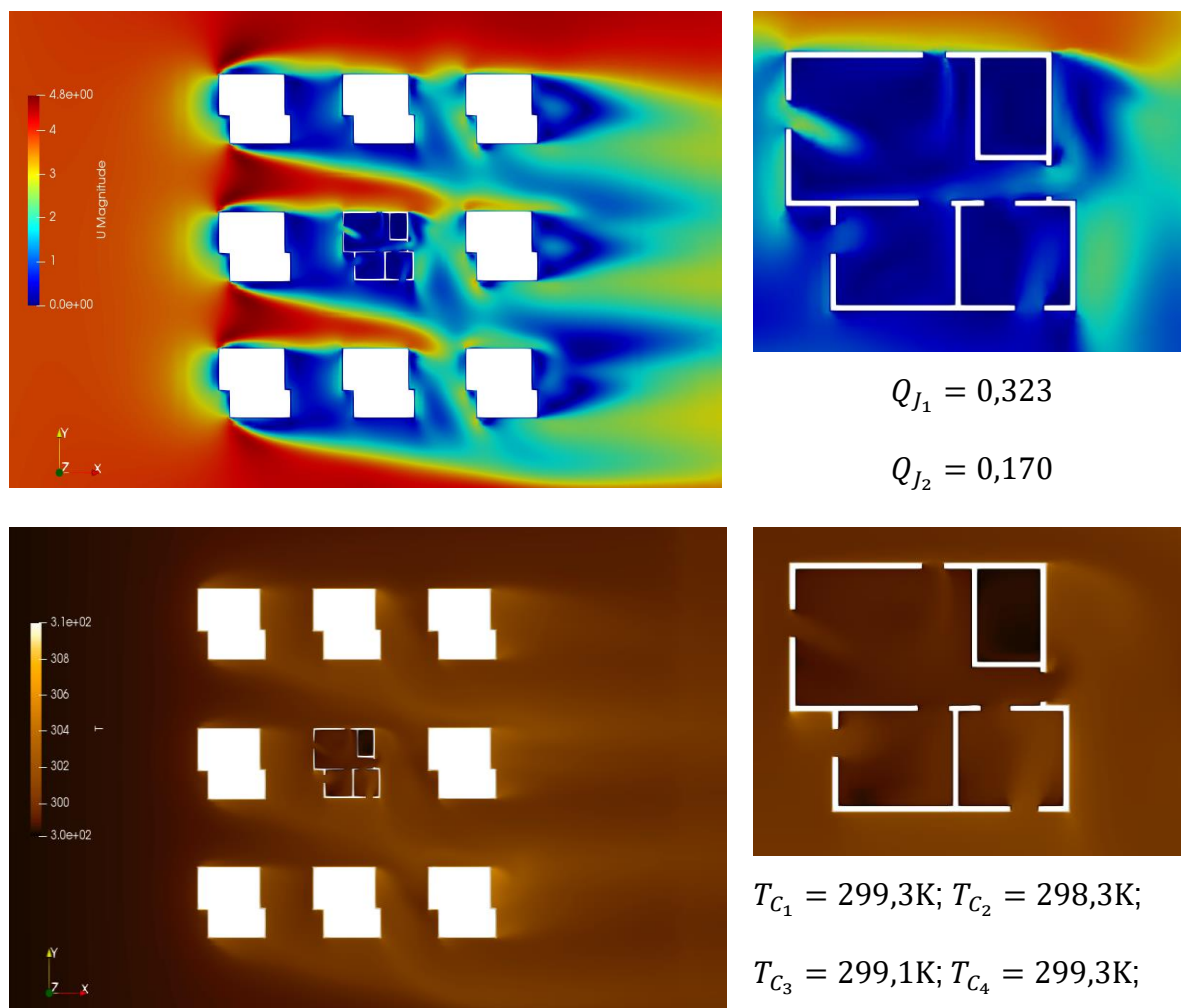


$$T_{C_1} = 299,1K; T_{C_2} = 298,3K;$$

$$T_{C_3} = 299,5K; T_{C_4} = 298,5K;$$

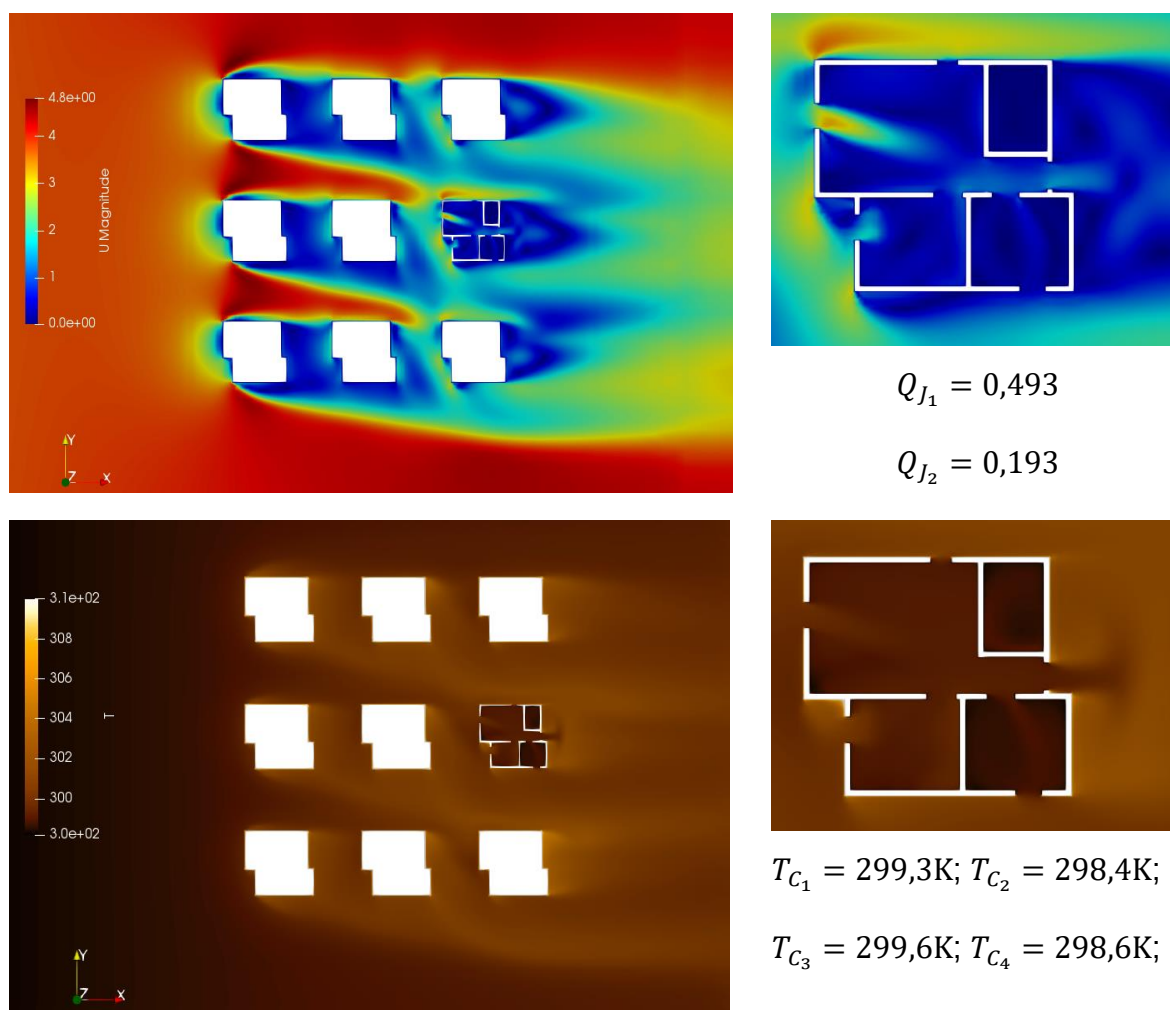
Fonte: Autor (2023).

Figura 65 - Perfil de velocidade (magnitude) e Temperatura para a posição 2



Fonte: Autor (2023).

Figura 66 - Perfil de velocidade (magnitude) e Temperatura para a posição 3

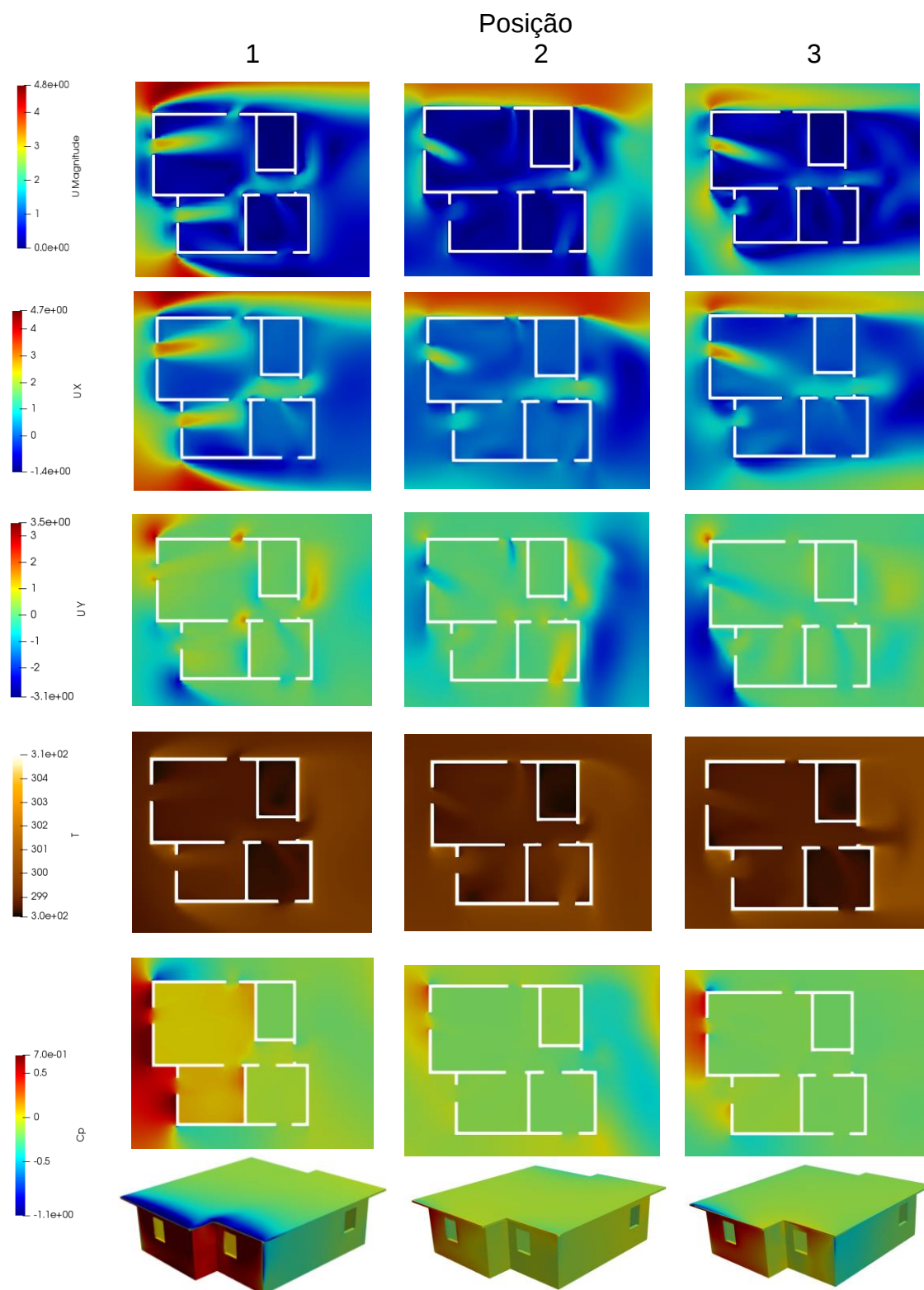


Fonte: Autor (2023).

Tal como foi observado no caso da casa isolada, a topologia do escoamento na edificação apresenta semelhanças, tais como: a formação das “paredes de vento” em regiões de alta velocidade e a distribuição de vórtices. Porém, algumas características da simulação no conjunto de residências podem ser destacadas, como a formação de uma faixa de alta velocidade entre as ruas (eixo x). Observa-se também, que em todos os casos a temperatura aumenta ao longo das ruas paralelas, pelo fato de o ar escoar entre as superfícies aquecidas das casas.

Na Figura 67, apresentam-se as distribuições de velocidade, temperatura e coeficientes de pressão no plano $z = 0.5H$ para as três posições da residência.

Figura 67 - Velocidades (magnitude, x, y), temperatura e pressão para as três posições.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se que a componente da velocidade em y é positiva na janela J_3 para a posição 1, ou seja, o escoamento tem o sentido de dentro para fora, já na posição 2,

a componente y é negativa, portanto, muda o sentido do escoamento. Nas proximidades da janela J_3 a pressão interna (cômodo C_1) é consideravelmente maior em comparação com a pressão na parte externa da edificação, dessa forma existe um escoamento das maiores pressões para as menores pressões. O contrário se observa na posição 2, sendo a pressão externa e próxima à janela J_3 ligeiramente maior em comparação com a pressão interna, fazendo, dessa forma, com que o escoamento seja de fora para dentro.

No Quadro 23, mostra-se um resumo das temperaturas para a casa isolada e para as três posições da casa inserida no conjunto habitacional. Por sua vez, no Quadro 24 apresenta-se um resumo das vazões adimensionais.

Quadro 23 - Resumo das temperaturas médias internas.

Casa e Posição	C_1	C_2	C_3	C_4
Casa isolada	299,1K (26°C)	298,3K (25,2°C)	299,5K (26,4°C)	298,5K (25,4°C)
Casa – Pos. 1	299,1K (26°C)	298,3K (25,2°C)	299,5K (26,4°C)	298,5K (25,4°C)
Casa – Pos. 2	299,3K (26,2°C)	298,3K (25,2°C)	299,1K (26°C)	299,3K (26,2°C)
Casa – Pos. 3	299,3K (26,2°C)	298,4K (25,3°C)	299,6K (26,5°C)	298,6K (25,5°C)

Fonte: Autor (2023).

Quadro 24 - Resumo das vazões adimensionais.

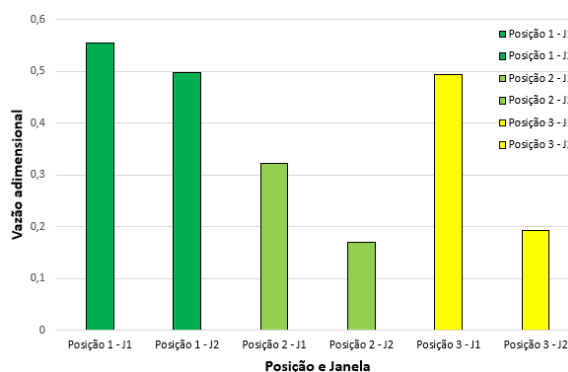
Vazão adimensional ($Q/(u_H A_{(abertura)})$)	Casa isolada	Casa – Pos. 1	Casa – Pos. 2	Casa – Pos. 3
Q_{J_1}	0,556	0,555	0,323	0,493
Q_{J_2}	0,500	0,498	0,170	0,193

Fonte: Autor (2023).

Percebe-se, que entre a casa isolada e a casa na primeira posição do conjunto habitacional as temperaturas são as mesmas e as variações nas vazões são praticamente iguais. As variações mais significativas aconteceram nas casas localizadas nas posições 2 e 3, sendo mais susceptível os valores da vazão.

No Gráfico 27, mostram-se os valores das vazões adimensionais para cada janela e posição, nota-se que da posição 1 para a posição 2 ocorre uma diminuição na vazão de entrada, enquanto que da posição 2 para a posição 3 ocorre um aumento considerável.

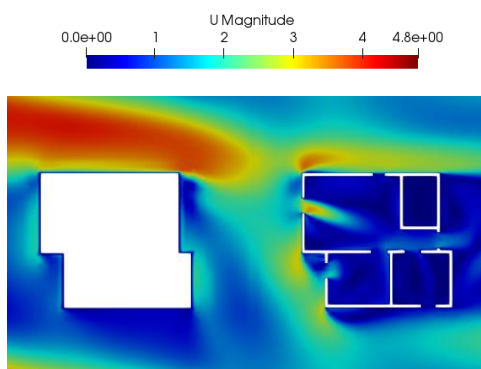
Gráfico 26 - Vazões adimensionais para as janelas J1 e J2.



Fonte: Autor (2023).

Semelhante ao que havia acontecido nos casos de Karava 2D, ver caso A2 (item 5.3.4.1), a ventilação na casa localizada na posição 3 melhora devido ao jato de ar de alta velocidade que se forma na rua lateral entre as edificações, conforme mostra-se na Figura 68. Esse jato incide nas janelas J_1 e J_2 causando um aumento significativo nos valores da vazão.

Figura 68 - Perfil de velocidade e jato de alta velocidade, $z = 0.5H$.



Fonte: Autor (2023).

Da mesma forma como foi realizado para o caso da casa isolada, foram obtidos os valores médios da magnitude de velocidade a partir das linhas transversais no meio dos cômodos de longa permanência (ver Figura 62). Esses valores serão considerados como sendo a variável V_a para o cálculo da temperatura operativa (T_o). No Quadro 25, se resumem para cada edificação e posições os valores das

temperaturas médias internas (T_a), velocidade médias internas (V_a) e temperaturas operativas (T_o).

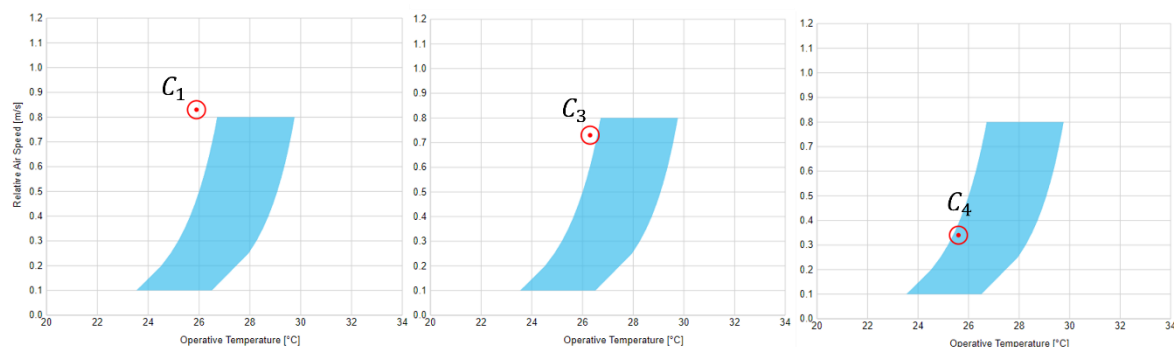
Quadro 25 - Velocidade média, temperatura média interna e temperatura operativa.

	C_1	C_3	C_4
Casa – Posição 1			
Velocidade média do vento (V_a)	0,83 m/s	0,73 m/s	0,34 m/s
Temperatura média interna (T_a)	299,1K (26°C)	299,5K (26,4°C)	298,5K (25,4°C)
Temperatura Operativa (T_o)	299,0k (25,9°C)	299,4k (26,3°C)	298,8k (25,6°C)
Casa – Posição 2			
Velocidade média do vento (V_a)	0,39 m/s	0,43 m/s	0,18 m/s
Temperatura média interna (T_a)	299,3K (26,2°C)	299,1K (26°C)	299,3K (26,2°C)
Temperatura Operativa (T_o)	299,0k (25,9°C)	299,1k (26,0°C)	299,5K (26,4°C)
Casa – Posição 3			
Velocidade média do vento (V_a)	0,76 m/s	0,39 m/s	0,28 m/s
Temperatura média interna (T_a)	299,1K (26°C)	299,5K (26,4°C)	298,5K (25,4°C)
Temperatura Operativa (T_o)	299,0K (25,9°C)	299,3K (26,2°C)	298,8K (25,7°C)

Fonte: Autor (2023).

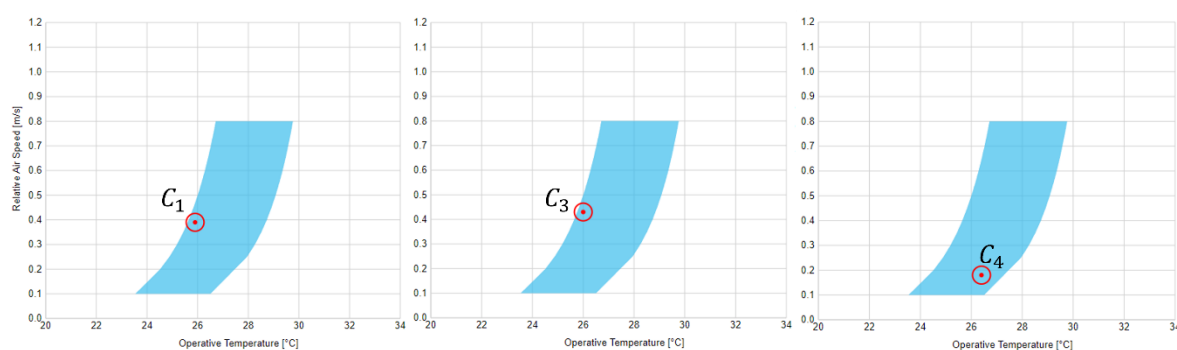
Com as informações apresentadas pode-se fazer a análise do gráfico das zonas de conforto para cada cômodo da residência em função da posição. Nas Figuras 69 a 71, mostram-se os gráficos para cada posição da edificação.

Figura 69 - Zonas de conforto térmico para o caso da casa na posição 1.



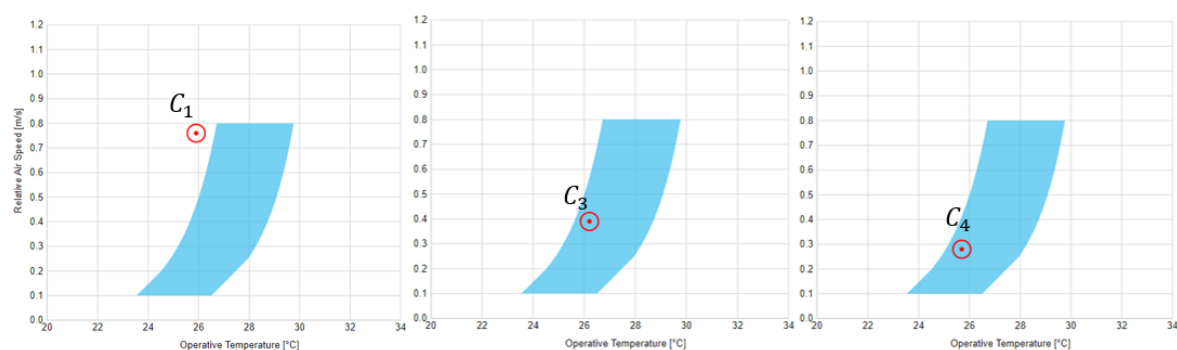
Fonte: Autor (2023).

Figura 70 - Zonas de conforto térmico para a casa na posição 2.



Fonte: Autor (2023).

Figura 71 - Zonas de conforto térmico para a casa na posição 3.



Fonte: Autor (2023).

Assim como para o caso da casa isolada, a casa na posição 1 apresentou os cômodos C_1 e C_3 com desconforto térmico, sendo necessária vestimenta de maior *clo* para o cômodo C_3 e controle de velocidade além de vestimentas de maior índice *clo* para o cômodo C_1 . Na posição 2, todos os cômodos ficaram dentro da faixa de conforto térmico para as vestimentas consideradas (*clo* 0.5). Na posição 3, observa-se que o

cômodo C_1 , assim como no caso da posição 1 e casa isolada, teve desconforto térmico, porém para esse caso, apenas a alteração do tipo de vestimenta seria necessário, sem a necessidade de controle de velocidade.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em razão da necessidade de se estudar o conforto térmico em ambientes urbanos, foi analisado nesse trabalho modelos típicos de edificações a fim de analisar e entender como o arranjo delas podem influenciar no conforto térmico, utilizando-se de uma simulação acoplada de fluido e transferência de calor.

Para isso, em todas as etapas foram utilizados *softwares* de licença pública (GPL): OpenFOAM, paraView, SALOME e o FreeCad. Para resolver o problema dos altos tempos de processamento foi desenvolvido um código modificado baseado no solucionador *simpleFoam*, o *simpleThermo*, onde foi adaptado para resolver a equação de energia, obtendo esse *solver* menores custos computacionais.

Inicialmente foram simulados dois casos tridimensionais, o da cavidade aquecida e o caso de Karava 3D. Esses casos tiveram como função principal avaliar os *solver's* em função dos seus tempos de processamento, como também validar os resultados. Dessa forma, foi possível avaliar a acurácia dos resultados e observar qual solucionador seria o ideal a se utilizar nos próximos casos, sendo observado que o *solver simpleThermo* seria o solucionador com melhor relação entre resultados e tempos de processamento.

Posteriormente, foi analisado o caso de Karava 2D, uma aproximação bidimensional do caso de Karava 3D, com três geometrias em série, onde variou-se o distanciamento entre as geometrias e a inclinação do solo, a fim de se estudar como tal mudança influenciaria nas distribuições de velocidade e temperatura. A partir dos resultados desse caso pode-se concluir que:

- I. O arranjo das edificações influencia nas distribuições de velocidade e temperatura de forma significativa. Pôde-se observar que, de forma geral, quanto maior o distanciamento, maiores são as vazões de ar, e menores as temperaturas internas;
- II. As casas a sota-vento são as que têm menor vazão de ar e possuem as maiores temperaturas médias internas;
- III. A inclinação do solo modifica de forma significativa as vazões e temperaturas médias internas, quanto maior a inclinação maiores as vazões e menores as temperaturas. Podendo-se assim, aumentar a

inclinação para diminuir o distanciamento, tendo maior adensamento de casas sem grandes aumentos de temperaturas internas.

Por fim, foi analisado um modelo 3D de um conjunto habitacional, com um projeto padrão do programa *Minha Casa, Minha Vida*, para esse caso concluiu-se que:

- I. Para o caso do conjunto habitacional, a primeira residência apresentou desconforto térmico nos primeiros cômodos, sendo necessário vestimentas de maior c/o para o cômodo C_3 e maior c/o e controle de velocidade para o cômodo C_1 ;
- II. Para a residência na posição 2 e 3, apresentaram menos problemas de desconforto térmico, tendo apenas o cômodo C_1 , da posição 3, desconforto térmico, sendo apenas necessário vestimentas de maior c/o para se enquadrar na faixa de conforto. A casa na posição 2 teve todos os seus cômodos dentro das zonas de conforto térmico, para o índice c/o proposto inicialmente;
- III. A análise de ventilação natural e conforto térmico ainda na fase de projeto é o ideal para que se observem problemas e se proponham modificações a fim de se obter um melhor conforto térmico e qualidade de ar.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise dos mesmos problemas com outros modelos de turbulência, como DES ou LES por exemplo. Sugere-se também, analisar propostas de modificação para os casos do conjunto habitacional, alterando-se as posições ou dimensões da janela, espaçamento e arranjo de posicionamento entre as casas, com o objetivo de melhorar as características de conforto térmico.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. F. M. C.; SILVA, M. V. C.; GANDU, A. W.; ROCHA, C. A.; CAVALCANTE R. M. **Caracterização de Cânions Urbanos e seus Efeitos Climáticos em Área com Intenso Processo de Verticalização na Cidade de Fortaleza, Ceará.** Revista Brasileira de Geografia e Física, Brasil, v. 10. p. 1046 – 1058, 2017.

AI, Z.; MAK, C. **Analysis of fluctuating characteristics of wind-induced airflow through a single opening using LES modeling and the tracer gas.** Building and Environment, v. 80, p. 249-258, 2014.

ALMEIDA, C. P. D. **Estudos de Modelos de Turbulência Aplicados à Ventilação de Espaços Interiores.** Dissertação de Mestrado – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, Portugal, 2021.

ALMEIDA, C. A. **Estudo numérico da ventilação natural em arranjo de edificações distribuídas em série.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, 2023.

AVIV, D.; CHEN, K. W.; TEITELBAUM, E.; SHEPPARD, D.; PANTELIC, J.; RYSANECK, A.; MEGGERS, F. **A fresh (air) look at ventilation for COVID-19: Estimating the global energy savings potential of coupling natural ventilation with novel radiant cooling strategies.** Applied Energy, Elsevier, v. 295, p. 1 – 13, 2021.

BAIK, J. J.; KIM, J. J. **A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons.** Journal of Applied Meteorology. Journal of Applied Meteorology, v. 38. p. 1576 – 1589, 1998.

BERRY, G.; PARSONS, A.; MORGAN, M.; RICKERT, J.; CHO, H. **A review of methods to reduce the probability of the airborne spread of COVID-19 in ventilation systems and enclosed spaces.** Environmental Research, Elseiver, v. 203, p. 1 – 12, 2021.

BOTTILLO, S.; DE LIETO VOLLARO, A.; GALLI, G.; VALLATI, A. **CFD modeling of the impact of solar radiation in a tridimensional urban canyon at different wind conditions.** Solar Energy, Elseiver, v. 102, p. 212 – 222, 2014.

BRAUN, A.L e AWRUCH, A.M. **Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation.** Computers & Strcutures., v. 87, 2009.

BRAUN, A.L. **Simulação Numérica na Engenharia do Vento incluindo efeitos de interação Fluido-Estrutura.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS – Rio Grande do Sul, 2007.

CAVALCANTE, M. C. A. D. **Influência da geometria da edificação na aerodinâmica de sistemas eólicos integrados utilizando OpenFOAM.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

CHATTERJEE, D.; MONDAL, B. **Effect of thermal buoyancy on vortex shedding behind a square cylinder in cross flow at low Reynolds numbers.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Elseiver, v. 54, p. 5262 – 5274, 2011.

CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. **CFD simulations of natural ventilation in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings.** Energy and Buildings, Elseiver, v.43. p. 1149-1158, 2011.

CHENG, T. S. **Characteristics of mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity with various Richardson and Prandtl numbers.** International Journal of Thermal Sciences, Elsevier, v. 50, p. 197 – 205, 2010.

CANION URBANO. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/o-impacto-dos-canions-de-concreto-bl0bps89v1odnt5t736kldrv2/>. Acessado em: 04/08/2021.

CÓRDOVA, S. M.; TENE, S. O.; TIGRE, O. F.; CARRILO, R. S.; CÓRDOVA S. D.; TAPIA, V. L.; QUESADA, R. D. **An OpenFOAM simulation of the natural ventilation system in a university chemical laboratory.** E3S Web of Conference, v. 167, p. 1-6, 2020.

ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; OLINGER, A. P.; LAMBERTS, R. **Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context.** Energy & Buildings, Elsevier, v. 244, 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica EPE 030/2018: Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro.** Rio de Janeiro, 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030.** Rio de Janeiro, 2020.

FRONTCAZAK, M.; SCHIAVON S.; GOINS, J.; ARENS, E.; ZHANG, H.; WARGOCKI, P. **Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design.** International Journal of Indoor Environment and Health, Indoor air, Dinamarca, v. 22. p. 119 – 131, 2011.

GARBRECHT, O. **Large Eddy Simulation of Three-dimensional Mixed Convection on a Vertical Plate**. Tese de Doutorado – Universidade Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen – Alemanha, 2017.

GARBARUK, A.; SHUR, M.; STRELETS, M.; SPALART, P. R.; BALAKRISHNAN, R. **DDes and IDDES of Tandem Cylinders**. BANC-I Workshop, 2010.

GUERRERO, J. **Introductory OpenFOAM® Course**. 14 – 18 de julho, 2014, Universidade de Genova. Notas de aula.

HINZE, J. O. **Turbulence**. 2nd. New York: McGraw-Hill, 1975.

HONG, S. W.; EXADAKTYLOS, V.; LEE, I. B.; AMON, T.; YOUSSEF, A.; NORTON, T.; BERCKMANS, D. **Validation of an open source CFD code to simulate natural ventilation for agricultural buildings**. Computers and Electronics in Agriculture, v. 138, p. 80-91, 2017.

HOOFF, T. V.; 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.

HU, J.; XUAN, H. B.; KWOK, K. C. S.; ZHANG, Y.; YU, Y. **Study of wind flow over a 6 m cube using improved delayed detached Eddy simulation**. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Elsevier, v.179, p. 463 – 474, 2018.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. D. **Fundamentos da transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro, LTC, 6ª Edição, 2008.

IWATSU, R.; HYUN, M. J.; KUWAHARA, K. **Mixed convection in a driven cavity with a stable vertical temperature gradient.** International Journal Heat Mass Transfer, v. 36, p. 1601 – 1608, 1995.

ISSA, R. I. **Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting.** Journal of Computational Physics, v. 62, n. 1, p. 40-65, 1986.

JIN, K.; VANKA, S. P.; THOMAS, B. G. **Three-Dimensional Flow in a Driven Cavity Subjected to an External Magnetic Field.** Journal of Fluids Engineering, ASME, v. 137, 2015.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. **Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements.** Building and Environment, v. 46, p. 266-279, 2011.

KASHAY, M. T. **Optimization of Window Configuration in Buildings for Sustainable Thermal and Lighting Performance.** Tese de Doutorado - Universidade Western Ontario. Canadá, 2019.

KASIM, N. F. M.; ZAKI, S. A.; ALI, M. S. M.; IKEGAYA, N.; RAZAK, A. A. **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.

KAVOLELIS, B.; BLEIZYGS, R.; CESNA, J. **Natural ventilation of animal sheds due to thermal buoyancy and wind.** Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, v. 16, p. 188 – 194, 2008.

KIM, J.; BAIK, J. **Urban street-canyon flows with bottom heating**. Urban Climate, Elsevier, v. 35. p. 3395 – 3404, 2001.

KIM, R.; HONG, S.; NORTON, T.; AMON, T.; YOUSSEF A.; BERCKMANS, D.; LEE, I.; **Computational fluid dynamics for non-experts: Development of a user-friendly CFD simulator (HNVR-SYS) for natural ventilation design applications**. Biosystems Engineering, Elsevier, v. 225, p. 232 – 246, 2020.

KING, M. F.; GOUGH, H. L.; HALIOS, C.; BARLOW, J. F.; ROBERTSON, A.; HOXEY, R.; NOAKES, C. J. **Investigating the influence of neighbouring structures on natural ventilation potential of a full-scale cubical building using time-dependent CFD**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 169, p. 265-279, 2017.

KLOOSTER, C. E. **Animal-based Control Algorithm for Natural Ventilation in Rig Houses**. American Society of Agricultural Engineers, v. 39, p. 1127 – 1133, 1996.

KOSUTOVA, K.; HOOFF, T. V.; VANDERWEL, C.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. **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.

LIM, J.; OOKA, R. **Building Arrangement Optimization for Urban Ventilation Potential Using Genetic Algorithm and CFD Simulation**. The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, 2014.

LUKANTCHUKI, M. A.; SHIMOMURA, A.P.; SILVA, F. M.; CARAM, R. M. **Evaluation of CFD simulations with wind tunnel experiments: Pressure coefficients at openings in sawtooth building**. Acta Scientiarum. Technology, [S. l.], 2018.

LAUNDER, B. E.; SPALDING D. B. **The Numerical Computation of Turbulence Flows**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 3, p. 269- 289, 1974.

LIMANE, A.; FELLOUAH, H.; GALANIS, N. **Three-dimensional OpenFOAM simulation to evaluate the thermal comfort of occupants, indoor air quality and heat losses inside an indoor swimming pool**. Energy and Buildings, Elseiver, v. 167, p. 49 – 68, 2018.

LAMBERTS, R., CANDIDO, C., DEAR, RICHARD., DE VECCHI, RENATA. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. 2013.

MICALLEF, D.; BUHAGIAR, V.; BORG, S. P. **Cros-ventilation of Room in a Coutyard Building**. Energy and Buildings, Elseiver, v. 133, p. 658 – 669, 2016.

MIDDEL, A.; LUKASCZYK, J.; MACIEJEWSKI, R.; DEMUZERE, M.; ROTH, M. **Sky View Factor footprints for urban climate modeling**. Urban Climate, Elseiver, v. 25. p. 120 – 134, 2018.

MORAIS, J. **Ventilação Natural em Edifícios Multifamiliares do “Programa Minha Casa Minha Vida”**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2013.

MORAIS, J. M. S. C.; LABAKI, L. C. **CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do “Programa Minha Casa, Minha Vida”**. Porto Alegre: Ambiente Construído, v. 17, n. 1, pp. 223-244, 2017.

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

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

NETO, R. X. M. **Temperatura da Superfície nos Materiais de Pavimentação: uma contribuição ao desenvolvimento urbano**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

NASCIMENTO, A. V.; CAVALCANTE M. C. A. D.; BONO, G. **Emprego do OpenFOAM no Estudo da Aerodinâmica de Edificações**. Associação Argentina de Mecânica de Computacional, v. 38, pp. 25 – 34, 2021.

OUERTATANI, N.; CHEIKH, N. B.; BEYA, B. B.; LILI, T.; CAMPO, A. **Mixed convection in a double lid-driven cavity**. International Journal of Thermal Science, Elsevier, v. 48, p. 1265 – 1272. 2009.

OKE, T. R.; CLEUGH, H. A. **Urban heat storage derived as energy balance residuals**. Boundary-Layer Meteorology, Canadá, v. 39. pp. 233 – 245, 1987.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. **A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows**. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15, pp. 1787-1806, 1972.

PARK, S.; CHOI, Y.; SONG, D.; KIM, E. K. **Natural ventilation strategy and related issues to prevent coronavirus disease 2019 (COVID-19) airborne transmission in a school building**. Science of The Total Environment, Elsevier, v. 789, p. 1 – 15, 2021.

Pagel, É. C.; Gouveia, G. L. O.; Martins, R. S.; Cruz, M. V. G. **Ventilação natural e desempenho térmico sob diferentes configurações de aberturas em uma sala de aula.** Ambiente Construído, v. 22, n. 3, p. 133 – 157, 2022.

POPE, S. B. **Turbulent Flows.** Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. **Simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, Itália. v. 104. p. 408 – 418, 2012.

RICHARDS, P. J.; HOXEY, R. P. **Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 46 e 47, p. 145-153, 1993.

ROCHA, M. V. R.; SOUZA, L. C. L.; CASTILLO, F. J. V. **Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano.** Revista Ambiente Construído. v. 11. p. 161 – 175, 2011.

SAKIYAMA, N. R. M.; FRICK, J.; BEJAT, T.; GARRECHT, H. **Using CFD to Evaluate Natural Ventilation through a 3D Parametric Modeling Approach.** Energies, v. 14, 2021.

SALIM, E.; SAADOUN, B.; FARID, B.; OMAR, K.; BACHIR, D.; ABDELKADER, F. **Unsteady Mixed Convection in a Cubic Lid-Driven Cavity Partially Heated from the Bottom.** Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, v. 57, p. 275 – 287.

SCHERER, P.; GRIGOLETTI, G. C. **Avaliação de estratégias de ventilação natural para salas de aula em clima subtropical úmido.** Ambiente Construído, v. 23, n. 1, p. 23 – 57, 2021.

SEYYEDI, S. M.; SOHEIL S.; GHASEMI, E.; GANJI, D. D.; GORJI-BANDPY, M.; BARARNIA, H. **Numerical Investigation of Laminar Mixed Convection in a Cubic Cavity by MRT-LBM: Effects of the Sliding Direction.** An International Journal of Computation and Methodology, Numerical Heat transfer, p. 285 – 303. 2013.

SCHIBUOLA, L.; TAMBANI, C. **High energy efficiency ventilation to limit COVID-19 contagion in school environments.** Energy and Buildings, Elsevier, v. 240, p. 1 – 14, 2021.

SHAO, J; LIU, J.; ZHAO, J. **Evaluation of various non-linear k - ϵ models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer.** Building and Environment, Elsevier, v. 57, p. 145-155, 2012.

SHARIF, M. A. R. **Mixed convection in a driven cavity with a stable vertical temperature gradient.** Applied Thermal Engineering, v. 27, p. 1036 – 1042, 2007.

SHIZARDI, M.; NAGHASHZADEGAN, M., MIRZAEI, P. A. **Improving the CFD modelling of cross-ventilation in highly-packed urban areas.** Sustainable Cities and Society, Elsevier, v. 37, p. 451 – 465, 2018.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design.** John Wiley Sons, 1996.

SINI, J.; ANQUETIN, S.; MESTAYER, G. P. **Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons**. Atmospheric Environment, Pergamon, França, v. 30. p. 2659 – 2677, 1995.

SOARES, R.C.A.; BONO, G. **Estudo numérico do escoamento ao redor de um cilindro circular de comprimento finito**. Trabalho apresentado no 1 Workshop Norte-Nordeste de CFD aplicado a Engenharia e Ciências correlatas, Campina Grande - Paraíba, 2015.

SOUZA, P. T.; OTT, G. G.; ALMEIDA, A. J.; SOUZA, R. A.; MORI, F.; VALENTE, A. M. **Efeito Da Condição Climática Na Temperatura De Pavimento De Concreto Asfáltico Espesso**. 33º Congresso de Pesquisa e ensino em transporte da ANPET. P. 1258 1268. 2019.

SPARLAT, P. R.; JOU, W. H.; STRELETS, M., ALLAMRAS, S. R. **Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach**. 1st AFOSR Int. Conf. on DNS/LES, 1997.

SOUZA, J. F. A.; OLIVEIRA L. R.; AZEVEDO J. L. L.; SOARES I. D.; MATA M.M. **Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 29(1), p. 21-41, 2011.

SPARROW, E. M.; EICHHOR, R.; GREGG, J. L. **Combined Forced and Free Convection in a Boundary Layer Flow**. Physics of Fluids, EUA, v. 2. p. 319 – 328, 1959.

TANWEER, S.; DEWAN, A.; SANGHI, S. **Study on Effects of Prandtl Number on Cross Buoyancy Flow past a Square Cylinder using OpenFOAM**. Journal of Applied Fluid Mechanics, v. 12, p. 257 – 269, 2019.

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

TOJA, S. F.; SANTOS, A. C.; GIL, M. C.; **Urban Wind exploitation systems: Behavior under multidirectional flow conditions – opprtunities and challengs**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Madrid – Espanha, v. 24, p. 364 – 378, 2013.

TOMINAGA, Y. **Flow around a high-rise building using steady an unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics**. J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics. Elseiver, Japão, v. 142, p. 93-103, 2015.

TUTAR, M.; OGUZ, G. **Large eddy simulation of Wind flow arround parallel buildings with varying configurations**. Fluid Dynamics Research, Elseiver, v. 31, p. 289-315, 2002.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. **Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance**. Energy Policy. Elseiver, v. 87, p. 524 – 541. 2015.

UEHARA, K.; MURAKAMI, S.; OIKAWA, S.; WAKAMATSU. **Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons**. Atmospheric Environment, Elseiver, v. 34. p. 1553 – 1562, 2000.

MURAKAMI, S.; MOCHIDA, A. **3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k - e model**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elseiver, v. 31, p. 283 – 303, 1988.

VAN HOFF, 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, Elsevier, v. 114, p. 148 – 165, 2017.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W., **Na Introduction to Computacional Fluid Dynamics: the Finite Volume Method.** Prentice Hall, Harlow, England, 2007.

WATSON, I. D.; JOHNSON, G. T. **Graphical estimation of sky view-factors in urban environments.** Journal of Climatology, Australia, v. 37. p. 233 – 245, 1987.

WRIGHT, N. G.; HARGREAVES, D. M. **Unsteady CFD Simulations for Natural Ventilation.** International Journal of Ventilation, v. 5, p. 13 – 20, 2016.

XIONG, Y.; CHEN, H. **Impacts of uneven surface heating of an ideal street canyon on airflows and indoor ventilation: Numerical study using OpenFOAM coupled with EnergyPlus.** Building Simulation, v. 15, p. 265 – 280. 2021.

XU, R.; WU, F.; ZHONG, M.; LI, X.; DING, J. **Numerical investigation on the aerodynamics and dynamics of a high-speed train passing through a tornado-like vortex.** Journal of Fluids and Structures, Elsevier, v. 96, 2019.

ZHENG, W.; HU, J.; WANG, Z.; LI J.; FU, Z.; LI, H., JURASZ, J., CHOU, S. K., YAN, J. **COVID-19 Impact on Operation and Energy Consumption of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems.** Advances in Applied Energy, Elsevier, v. 3, p. 1 – 25, 2021.

WANG, H.; WANG, H.; GAO, F.; ZHOU, P.; ZHAI, Z. **Literature review on pressure velocity decoupling algorithms applied to built-environment CFD simulation.** Building and Environment, v. 143, p. 671-678, 2018.

ANEXO I – CÓDIGO FONTE

```
// Solve the Temperature equation

alphanut = turbulence->nut()/Prt;
alphanut.correctBoundaryConditions();
volScalarField alphaEff("alphaEff", turbulence->nu()/Pr + alphanut);

fvScalarMatrix TEqn
(
    (
        fvm::ddt(T) *
        + fvm::div(phi, T)
        - fvm::laplacian(alphaEff, T)
    )
    }
    \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (UT) = \alpha(\nabla^2 T)
);

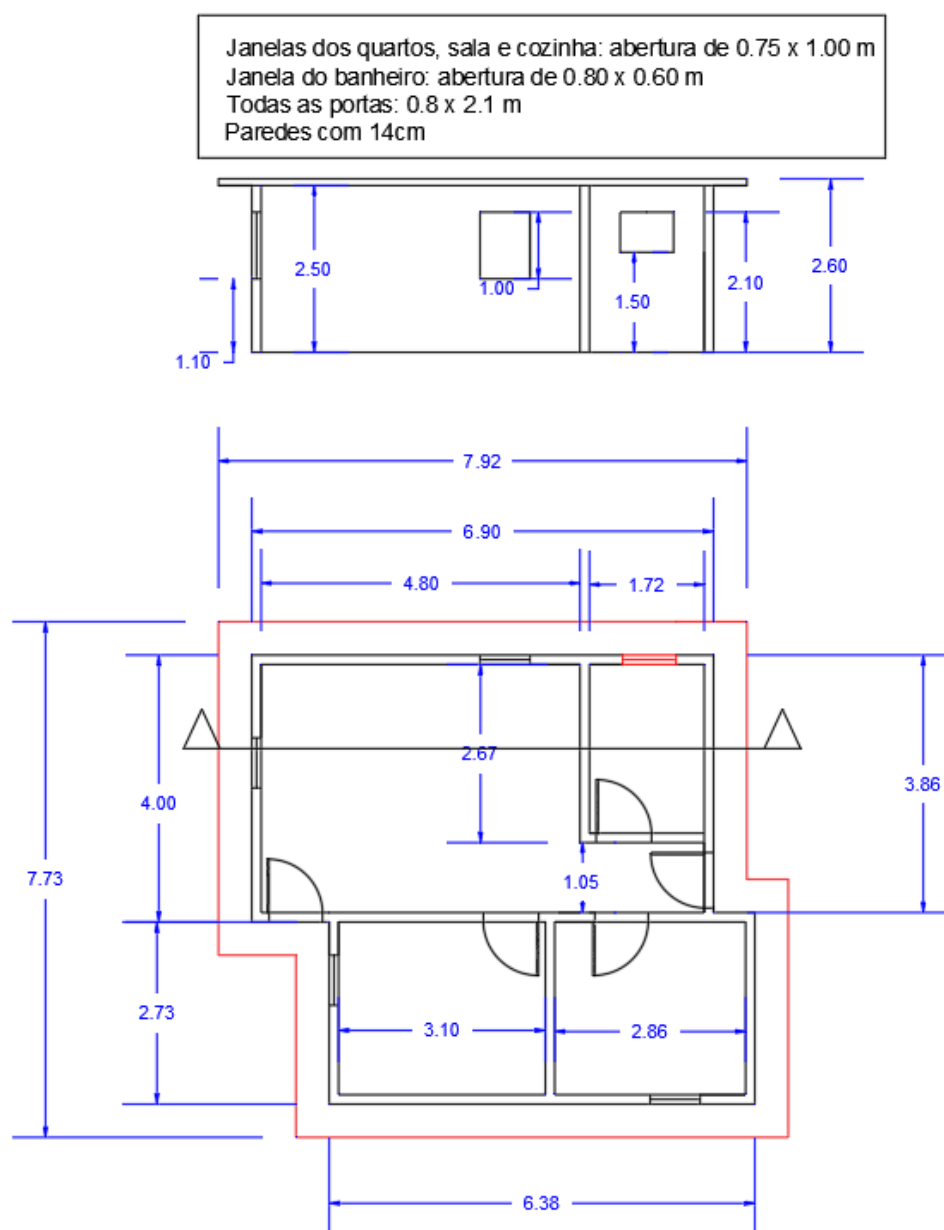
TEqn.relax();

fvOptions.constrain(TEqn);
TEqn.solve();
```

* Derivada temporal desconsiderada para o *simpleThermo*.

ANEXO II – PLANTA BAIXA

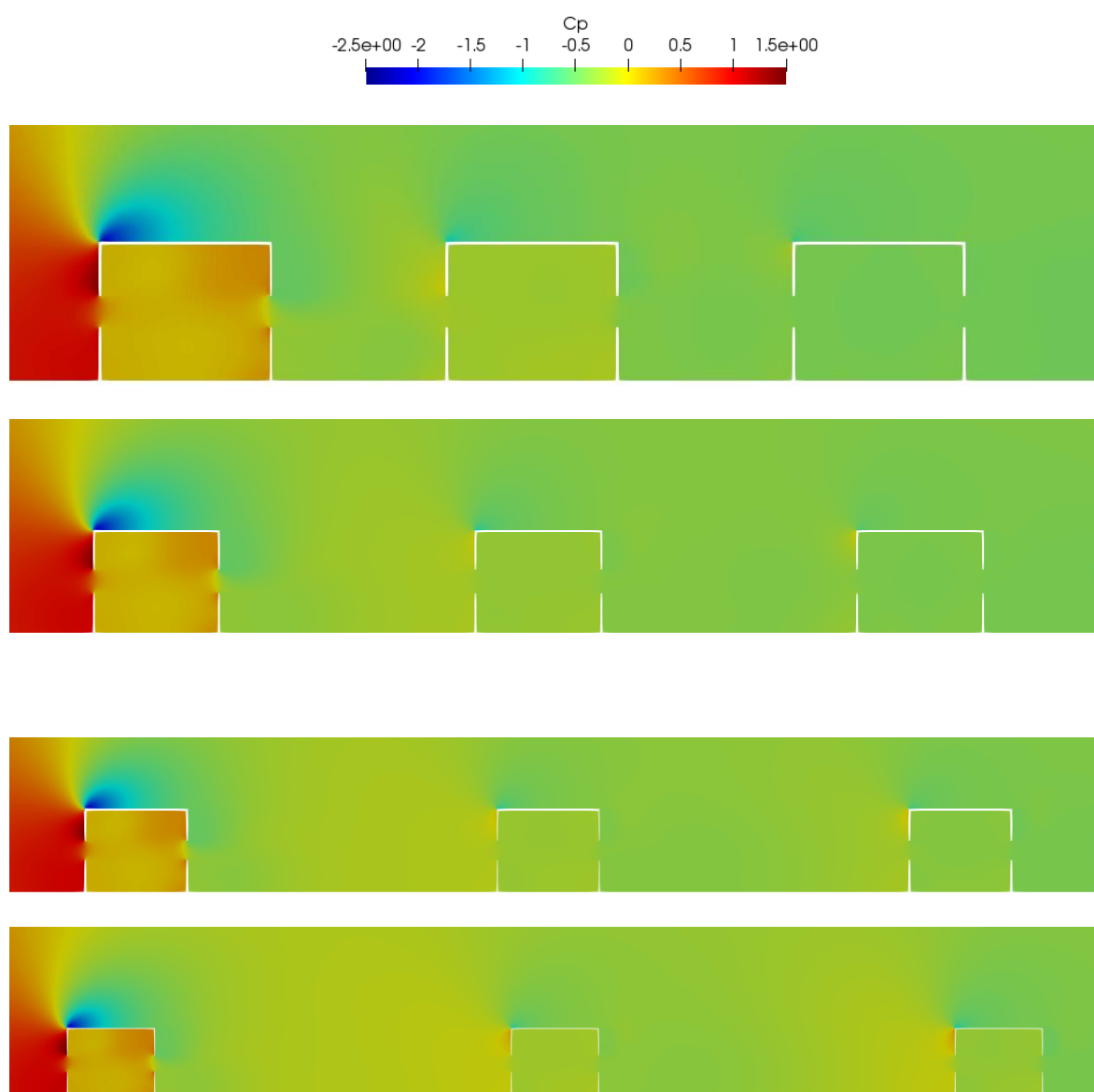
Figura 72 - Planta baixa e corte da casa do conjunto habitacional.



Fonte: Adaptado de Eli e Lamberts et. al (2021).

ANEXO III – COEF. DE PRESSÃO CASO “A”

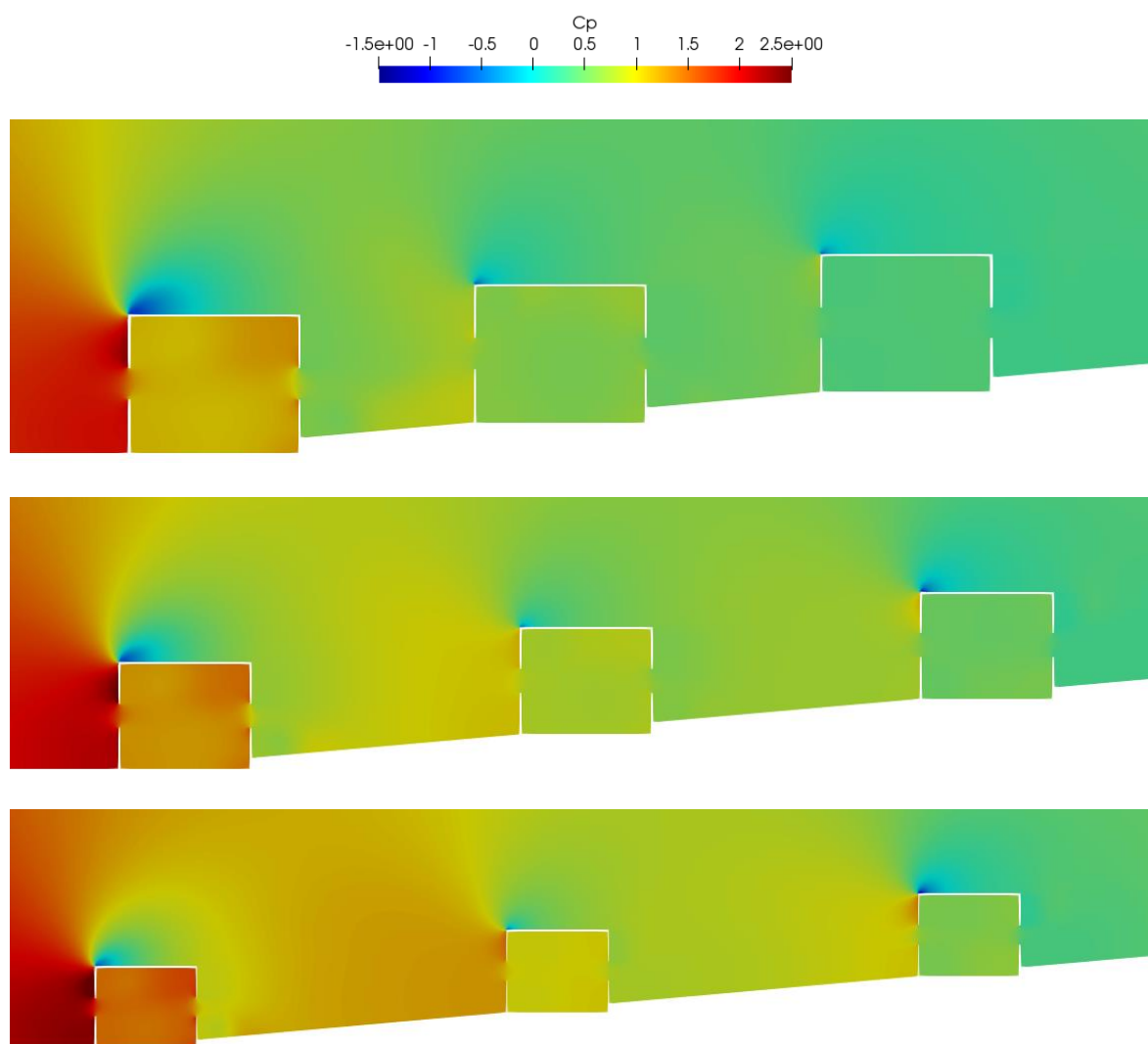
Figura 73 - Coeficiente de pressão para os casos A1, A2, A3 e A4



Fonte: Autor (2022).

ANEXO IV – COEF. DE PRESSÃO CASO “B”

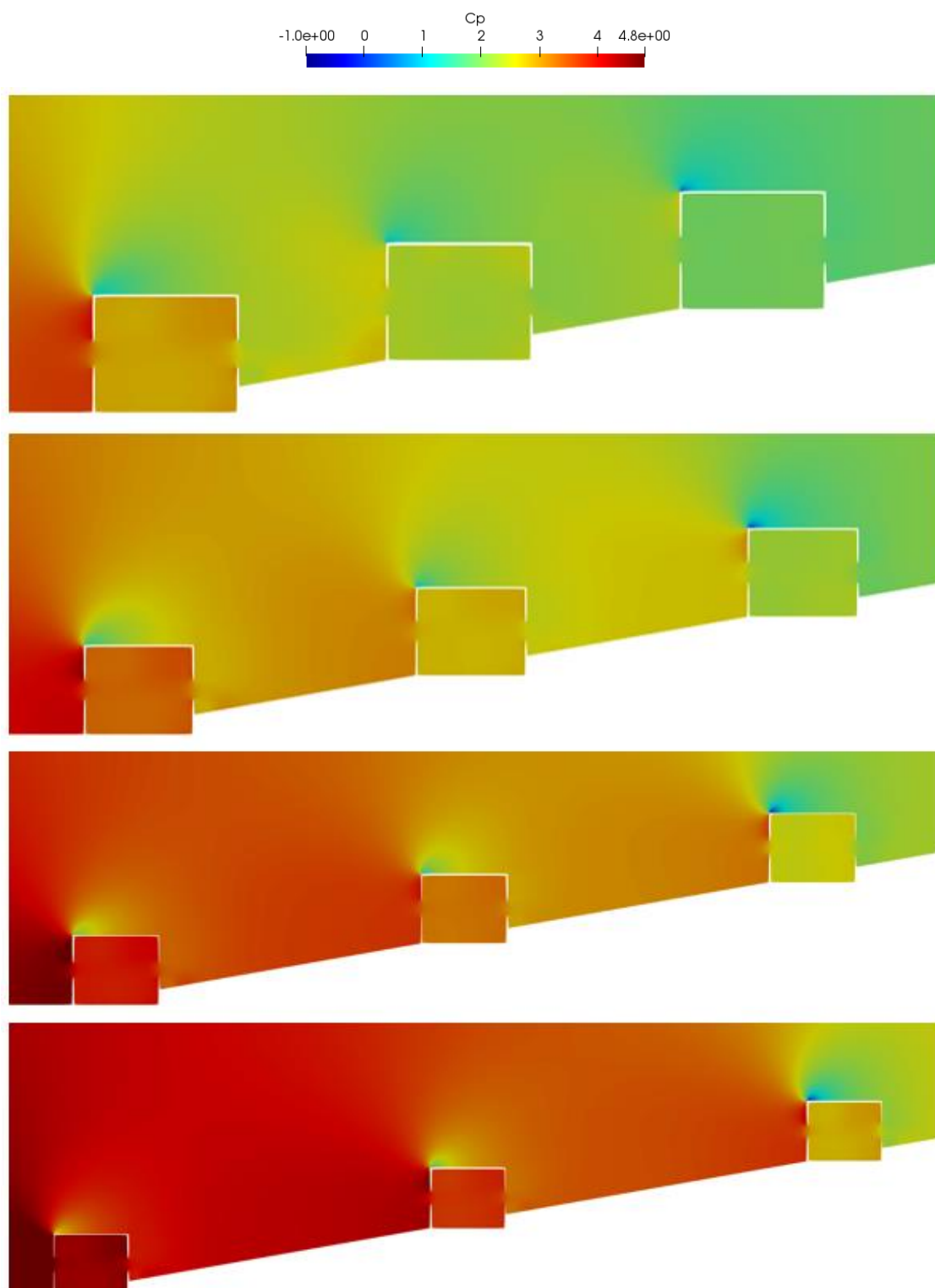
Figura 74 - Coeficiente de pressão para os casos B1, B2, B3 e B4



Fonte: Autor (2022).

ANEXO V – COEF. DE PRESSÃO CASO “C”

Figura 75 - Coeficiente de pressão para os casos C1, C2, C3 e C4



Fonte: Autor (2022).

