



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação do desempenho do OpenFOAM® em estudos de ventilação natural

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Ana Catarina Mendes Barradas

Orientador

Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira

Júri

Presidente	Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor José Joaquim da Costa Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2016

Como um ruído de chocalhos
Para além da curva da estrada,
Os meus pensamentos são contentes.

Pensar incomoda como andar à chuva
Quando o vento cresce e parece que chove mais.

O Mundo não se fez para pensarmos nele
(Pensar é estar doente dos olhos)
Mas para olharmos para ele e estarmos de acordo...

Alberto Caeiro em O Guardador de Rebanhos.

Não me esqueço de não pensar
O que enche o entardecer
Se a nota final de uma marcha fúnebre
Se o recolher obrigatório ao ventre da mãe.
Esqueci-me de refletir sempre que pude
As ovelhas dispersas na ordem que não devem estar,
No campo ou na cidade.
(Na cidade também as há na liberdade da forma humana)
Mas desta vez, só desta vez,
Obriguei-me a pensar.
Dispo o casaco molhado de andar à chuva a pensar,
Já não sabia o que era o frio.
Errado.
Já não sentia o que era o frio.

Agradecimentos

A realização desta tese não teria sido possível sem a paciência, a compreensão e a ajuda do Professor Almerindo Ferreira. Agradeço-lhe o entusiasmo que me transmitiu sobre o OpenFOAM® e a oportunidade que me concedeu para trabalhar com espírito livre. A liberdade revela ser sempre a maior anfitriã das descobertas.

Agradeço também ao Fábio Mendes que me deu a conhecer o TeamViewer, o qual me possibilitou trabalhar a qualquer hora e em qualquer lugar.

Ao Diogo Ramalho pela amabilidade de instalar o Ubuntu na raiz do computador, que me permitiu usufruir de todas as capacidades de processamento e memória. A ele, um muito obrigado.

Aos meus pais, José e Ana, à minha avó Alice, aos meus tios Delfina e Ei, por serem tão presentes e dedicados na minha vida. As 100 páginas desta tese não chegam para vos agradecer tudo o que fizeram por mim. Nos dias em que as coisas correram menos bem, pude contar com as vossas palavras e com o vosso conforto. No dia em que a sorte soprou, acompanharam-me na alegria.

Agradeço à Tita, a minha irmã, o meu bebé para sempre, por seres a pessoa que mais felicidade tive de conhecer e ver crescer.

A ti, Luis, porque há teses que não são escritas e estudos que não são feitos: nada haverá que explique o sopro do coração.

Agradeço a todos os amigos que me acompanharam em Coimbra e que me fizeram crer que a vida tem muito de bom para ser levada demasiado a sério. Rui, Jorge, Tozé, Salomé, Paiva, Simão, Fábio, Miguel, Dário. A minha leveza veio de vós. Obrigada.

Resumo

A ventilação natural tem a capacidade de melhorar a qualidade do ar interior e remover carga térmica de edifícios sem que haja consumo de energia, sendo por isso uma alternativa eficiente aos sistemas mecânicos de ar-condicionado. A fase de projeto de um edifício contempla o cálculo das necessidades de ar novo que podem ser ou não atingidas pela atuação exclusiva da ventilação natural. Existem vários métodos que permitem estimar os caudais de ventilação natural, entre os quais a modelação numérica da dinâmica dos fluidos.

Esta tese tem por objetivo avaliar o desempenho do OpenFOAM® na previsão dos caudais de ventilação do tipo *single-sided*, dinamizados pela ação do vento, por comparação com resultados experimentais documentados na bibliografia. Para isso, sugere-se e implementa-se uma metodologia para o cálculo dos caudais de ventilação em OpenFOAM®.

Verifica-se que os resultados obtidos apresentam erros elevados, quando a modelação numérica segue o procedimento convencional indicado na bibliografia. Por oposição, propõe-se uma nova estratégia para obtenção de caudais de ventilação *single-sided* que contempla a existência de um gradiente de pressão favorável nas fronteiras do domínio computacional.

A estratégia do gradiente de pressão favorável produz bons resultados para diferentes velocidades, áreas, geometrias e localizações da abertura e geometria do modelo, na maioria das vezes com erros inferiores a 10%.

Palavras-chave: Ventilação natural, Caudais de ventilação, OpenFOAM, Estratégia do gradiente de pressão favorável

Abstract

Natural ventilation has the ability to improve indoor air quality and to remove thermal load on buildings without consuming energy; it is therefore an efficient alternative to mechanical air-conditioned systems. Building design phase includes the calculation of fresh air requirements which can be entirely achieved, or not, by natural ventilation. There are several methods of estimating the natural ventilation flow rates, including computational fluid dynamics (CFD).

This thesis aims to evaluate the performance of OpenFOAM® in predicting the single-sided wind-driven ventilation flow rates, by comparison with experimental data available in the literature. For this, a methodology for computing natural ventilation flow rates in OpenFOAM® is suggested and implemented.

The results contain high errors when the numerical modeling follows the standard procedure indicated in the literature. In contrast, a new strategy for obtaining single-sided ventilation flow rates is proposed. It accounts for the existence of a favorable pressure gradient at the boundaries of the computational domain.

The strategy of favorable pressure gradients gives good results for different air velocity, area, geometry and position of the opening and model geometry, most of the times with errors less than 10%.

Keywords Single-Sided Ventilation, Natural Ventilation Flow Rates, OpenFOAM, Strategy of Favourable Pressure Gradient

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas	xi
Simbologia.....	xi
Siglas	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. VENTILAÇÃO NATURAL	5
2.1. Classificação da Ventilação Natural	5
2.2. Camada Limite Atmosférica	6
2.3. Mecanismos de Ventilação	7
2.4. Ventilação <i>Single-Sided</i>	8
2.4.1. Efeito da compressibilidade nos caudais de ventilação.....	9
2.4.2. Parâmetros que afetam os caudais de ventilação <i>single-sided</i>	10
2.5. Modelos de Previsão	13
2.5.1. Modelos empíricos de ventilação <i>single-sided</i>	14
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA DINÂMICA DE FLUIDOS.....	16
3.1. Princípios Governativos da Mecânica dos Fluidos.....	16
3.2. Modelação Numérica da Turbulência	18
3.2.1. Reynolds-averaged navier-stokes	19
3.2.2. Funções de parede	21
3.3. Discretização Espacial e Numérica.....	23
3.4. Algoritmos para o Cálculo dos Campos de Velocidades e Pressão.....	25
3.5. Resolução das Equações de Discretização Numérica.....	27
3.6. CFD em Ventilação Natural.....	28
4. METODOLOGIA PARA VENTILAÇÃO NATURAL EM OPENFOAM®	32
4.1. Estrutura, capacidades e organização do OpenFOAM®	32
4.1.1. Malha base e refinamento.....	35
4.2. Metodologia para ventilação natural.....	36
5. CASOS DE ESTUDO	41
5.1. Caso de Kato et al. (2006).....	42
5.1.1. Domínio computacional	43
5.1.2. Malha e refinamento	45
5.1.3. Condições iniciais e de fronteira	47
5.1.4. Algoritmo e esquemas numéricos de discretização.....	49
5.1.5. Resultados e discussão	49
5.2. Caso de Chu et al. (2011).....	58
5.2.1. Nova estratégia para o cálculo dos caudais de ventilação <i>single-sided</i>	59
5.2.2. Modelação numérica de Chu_a pela estratégia convencional	60

5.2.3. Modelação numérica de Chu_a pela estratégia do gradiente de pressão favorável.....	62
5.2.4. Modelação numérica de Chu_b pela estratégia do gradiente de pressão favorável.....	66
5.2.5. Modelação numérica de Chu_c pela estratégia do gradiente de pressão favorável.....	68
5.2.6. Influência da dimensão do domínio na estratégia do gradiente de pressão favorável.....	69
5.2.7. Hipótese de compressibilidade.....	70
5.2.8. Influência da intensidade de turbulência.....	72
5.3. Caso de Larsen (2006).....	73
6. CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXO A – Formulação do modelo de turbulência $k - \omega$ SST.....	85
ANEXO B – Coeficientes de discretização numérica.....	87
ANEXO C – Algoritmo SIMPLE.....	89
ANEXO D – Método GAMG.....	93
ANEXO E – Recomendações práticas para a modelação numérica de ventilação natural.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Exemplos de ventilação <i>single-sided</i> e de ventilação cruzada.....	5
Figura 2.2. Linhas de corrente do escoamento em torno de um edifício por Peterka et al. (1985).	7
Figura 2.3. Mecanismo de penetração de turbilhões, adaptado de Haghghat et al. (1991)..	9
Figura 2.4. Escoamento pulsante por Cockroft e Robertson (1976).	9
Figura 2.5. Parâmetros que afetam a ventilação natural com origem no escoamento atmosférico e na arquitetura do edifício.	10
Figura 2.6. Ângulo de incidência do escoamento num espaço ventilado (Chu et al. (2011)).	11
Figura 2.7. Variação do caudal adimensional de ventilação com o ângulo de incidência do escoamento (Chu et al. (2011))......	11
Figura 3.1. Domínio da modelação e resolução das escalas de turbulência em RANS e LES (Adaptado de Guerrero, 2015).....	19
Figura 3.2. Função de parede que substitui o efeito da subcamada viscosa (viscous sublayer) e a camada tampão (buffer layer) por Guerrero (2015).....	22
Figura 3.3. Volume de controlo finito hexaédrico com nó central P , faces n, s, e, w, b e t e nós vizinhos N, S, E, W, B e T (Versteeg e Malalasekera, 1995).	23
Figura 3.4. Diagrama da discretização de u pelo esquema <i>upwind</i> , adaptado de Fortuna (2000).	24
Figura 3.5. Volume de controlo para integração da equação da continuidade (Patankar, 1980).....	26
Figura 3.6. Malhas estruturadas não-uniformes, a) de Peren et al. (2015) e b) de Stavrakakis et a. (2012).	31
Figura 4.1. Organização de um caso em OpenFOAM®.	33
Figura 4.2. Linha de comandos do sistema operativo Ubuntu.	35
Figura 4.3. Interface gráfica Helyx-OS.	35
Figura 4.4. Refinamento por níveis no OpenFOAM®, adaptado de (Jackson, 2012).	36
Figura 4.5. Exemplo de refinamento superficial e de refinamento volumétrico, adaptado de (Jackson, 2012).	36
Figura 4.6. Isolamento das faces das células que compõem um plano na abertura.....	38
Figura 4.7. Diagrama do método para o cálculo dos caudais de ventilação em OpenFOAM®.....	40
Figura 5.1. Montagem experimental de Kato et al. (2006)	42

Figura 5.2. Dimensões da placa e do modelo cúbico em milímetros, de Kato et al. (2006).	42
Figura 5.3. Vistas frontais e plantas dos modelos experimentais de Kato et al.(2006) com $L = 0,2$ m.....	43
Figura 5.4. Dimensões características do domínio de Kato et al. (2006).....	44
Figura 5.5. Refinamentos volumétricos no teste de independência de malha para o caso Kato_a.	46
Figura 5.6. Evolução da razão entre os caudais de ventilação calculados pelo OpenFOAM, $Q_{OpenFOAM}$, e o caudal de ventilação experimental, $Q_{experimental}$, ao longo das iterações (malha B).....	52
Figura 5.7. Linhas de corrente no plano imediatamente superior à abertura ($y = 0,001$ mm) em Kato_a.....	53
Figura 5.8. Linhas de corrente no plano imediatamente inferior à abertura ($y = -0,002$ mm) em Kato_a.....	54
Figura 5.9. Linhas de corrente no plano imediatamente superior à abertura ($y = 0,001$ mm) em Kato_d.	54
Figura 5.10. Linhas de corrente no plano imediatamente inferior à abertura ($y = -0,002$ mm) em Kato_d.....	54
Figura 5.11. Linhas de corrente na abertura em Kato_c.....	55
Figura 5.12. Campo de velocidades tridimensional no modelo cúbico ventilado em Kato_b.	55
Figura 5.13. Campo de velocidades bidimensional no plano xOy do modelo cúbico em Kato_f.....	56
Figura 5.14. Distribuição da velocidade nas fronteiras do domínio em Kato_a, Kato_d e Kato_e.	57
Figura 5.15. Distribuição da velocidade nas fronteiras do domínio em Kato_b.	57
Figura 5.16. Esquema de montagem experimental de Chu et al. (2011).....	58
Figura 5.17. Modelo cúbico posicionado na secção de teste em Chu et al. (2011).....	58
Figura 5.18. Esquema geral de Chu et al. (2011) para um escoamento incidente de 90° ...	60
Figura 5.19. Fronteiras laterais de saída e superior do domínio em Chu et al. (2011).....	60
Figura 5.20. Caudais adimensionais determinados experimental e pelo OpenFOAM® em função do lado da abertura no caso Chu_a – metodologia convencional.	62
Figura 5.21. Condições de fronteira para a pressão estática na saída, laterais e superior pela estratégia convencional (a) e pela estratégia do gradiente de pressão favorável (b), em Chu_a.....	63
Figura 5.22. Resultados de Chu_a para a estratégia convencional e para a estratégia do gradiente de pressão favorável.	64
Figura 5.23. Escoamento em torno do modelo cúbico resultante da modelação numérica convencional (caso Chu_a com $L = 0,04$ m).	65

Figura 5.24. escoamento em torno do modelo cúbico resultado da estratégia do gradiente de pressão favorável (caso Chu_a com $L = 0,04\text{ m}$).....	65
Figura 5.25. Campo bidimensional de velocidades no plano xOz que intercepta a abertura segundo a estratégia convencional (caso Chu_a com $L = 0,04\text{ m}$).....	66
Figura 5.26. Campo bidimensional de velocidades no plano xOz que intercepta a abertura segundo a estratégia do gradiente de pressão favorável (caso Chu_a com $L = 0,04\text{ m}$).....	66
Figura 5.27. Caudais de ventilação adimensionais obtidos experimental e numericamente em função da velocidade do escoamento de aproximação, em Chu_b.	68
Figura 5.28. Discretização espacial de um escoamento com $\theta = 22,5^\circ$ coerente com a direção principal do escoamento.	69
Figura 5.29. Malha com refinamento volumétrico e superficial para o caso de referência de Chu et al. (2011).	71
Figura 5.30. Convergência de Q^+ ao longo das iterações para modelação numérica para escoamento incompressível e incompressível.	72
Figura 5.31. Influência da intensidade de turbulência nos caudais de ventilação determinados numericamente pela estratégia do gradiente de pressão favorável.	73
Figura 5.32. Esquema de montagem experimental de Larsen (2006).	74
Figura 5.33. Geometria e dimensões do protótipo de Larsen (2006).	74
Figura 5.34. Zoom da malha na zona do protótipo de Larsen (2006).	75
Figura 5.35. Domínio computacional de Larsen (2006).	76
Figura C.1. Fronteira do domínio coincidente com a face e do volume de controlo (Patankar, 1980).	92
Figura D.1. Ciclo em V do método GAMG dividido em ciclo do método <i>multigrid</i> (quadrado), iterações de suavização (círculo) e equações de pós-relaxação (triângulo) por (Behrens, 2009).....	94
Figura D.2. Aglomeração geométrica dos volumes de controlo no método GAMG por (Behrens, 2009).	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Equações governativas do escoamento compressível de um fluido newtoniano.	17
Tabela 3.2. Formulação geral das equações conservativas RANS.....	19
Tabela 3.3. Resumo do tipo de ventilação <i>single-sided</i> (VSS) ou cruzada (VC), dimensões do modelo e domínio computacional, número de elementos de malha, simplificações e modelo de turbulência usados nos estudos de ventilação natural em CFD.	30
Tabela 4.1. Dicionários contidos na subdiretoria <i>/system</i> relevantes para a modelação de ventilação natural.	34
Tabela 5.1. Resumo dos estudos experimentais objeto de modelação numérica no presente trabalho.....	41
Tabela 5.2. Teste sobre influência das dimensões do domínio na qualidade e convergência dos resultados em Kato et al. (2006).	44
Tabela 5.3. Informações sobre a malha base, os níveis de refinamento volumétrico e o número de células para cada malha testada no caso Kato_a.	47
Tabela 5.4. Resultados do teste de independência de malha para o caso Kato_a.	47
Tabela 5.5. Condições de fronteira da entrada, saída, superior e laterais na modelação numérica de Kato et al.(2006).	48
Tabela 5.6. Condições de fronteira das superfícies sólidas de Kato et al.(2006).	48
Tabela 5.7. Resultados da modelação numérica de Kato_a, Kato_b, Kato_c e Kato_d para a malha A.	50
Tabela 5.8. Resultados da modelação numérica de Kato_a, Kato_b, Kato_c, Kato_d, Kato_e e Kato_f para a malha B.	50
Tabela 5.9. Resíduo final da pressão, y^+ máximo, número de iterações para a convergência e número de células das simulações numéricas para as malha A e B.	51
Tabela 5.10. Influência do aumento da extensão do domínio no erro de previsão dos caudais de ventilação e resíduo final da pressão em Kato_b e Kato_c.	58
Tabela 5.11. Resumo das condições dos ensaios experimentais de Chu et al. (2011).	59
Tabela 5.12. Condições de fronteira da entrada, saída, superior e laterais na modelação numérica de Kato et al.(2006).	61
Tabela 5.13. Condições de fronteira das superfícies sólidas de Kato et al.(2006).	61
Tabela 5.14. Erro associado à medição dos caudais de ventilação em Chu_a em percentagem (%).	64

Tabela 5.15. Pressão estática na fronteira de saída em função da velocidade do escoamento de aproximação em Chu_b	67
Tabela 5.16. Erro associado à medição dos caudais de ventilação em Chu_b em percentagem (%).....	68
Tabela 5.17. Testes de verificação da influência do domínio para o caso de referência $v = 4,2 \text{ m/s}$ e $L = 0,04 \text{ m}$ (valores em metros).....	70
Tabela 5.18. Parâmetros de comparação do desempenho dos algoritmos Simple e rhoSimple.....	72
Tabela 5.19. Resumo das condições dos ensaios experimentais de Larsen (2006).....	74
Tabela 5.20. Domínio real e domínio adimensional das modelações numéricas de Larsen (2006).....	76
Tabela 5.21. Erro associado ao cálculo dos caudais de ventilação <i>single-sided</i> de Larsen (2006) para $v = 3 \text{ m/s}$	77

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – área da abertura (m^2)

a_i – coeficientes da discretização numérica ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$)

b – termo fonte

c_v – calor específico a volume constante ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)

D – condutância (na discretização numérica) ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$)

F – caudal mássico (na discretização numérica) ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$)

H – altura da abertura (m)

$H(\omega)$ – função de transferência

i – energia interna específica ($J\ kg^{-1}$)

k – condutibilidade térmica ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)

k – energia cinética turbulenta específica ($J\ kg^{-1}$)

ℓ - escala de comprimento dos turbilhões (m)

p – pressão (Pa)

p_a – pressão atmosférica (Pa)

p_d – pressão dinâmica do escoamento médio (Pa)

p_e – pressão estática nas fronteiras livres (Pa)

p_{out} – pressão estática na saída (Pa)

Q – caudal de ventilação médio ($m^3\ s^{-1}$)

Q^* – caudal de ventilação adimensional

Q^+ – caudal de ventilação de entrada ($m^3\ s^{-1}$)

Q^- – caudal de ventilação de saída ($m^3\ s^{-1}$)

q – caudal de ventilação instantâneo ($m^3\ s^{-1}$)

R – constante dos gases perfeitos ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)

S – termo fonte

S_p – espectro de energia da pressão do vento (Pa^2)

- S_q – espectro de energia do caudal de ventilação $((m^3/s)^2)$
 T – temperatura ($^{\circ}C$)
 t – tempo (s)
 u_{τ} – velocidade de atrito $(m s^{-1})$
 V, \vec{V} – velocidade $(m s^{-1})$
 V_L – velocidade na direção paralela ao plano da abertura, velocidade $(m s^{-1})$
 \mathcal{V} – volume de ar contido no espaço ventilado (m^3)
 x – coordenada (m)
 y – coordenada (m)
 y^+ - distância adimensional à parede
 z – coordenada (m)
 Γ – coeficiente difusivo
 Φ – função de dissipação
 β – coeficiente de descarga
 γ – coeficiente de expansão adiabática
 ε – taxa de dissipação da energia cinética da turbulência $(J s^{-1})$
 θ – ângulo de incidência do escoamento
 μ – viscosidade dinâmica $(kg m^{-1}s^{-1})$
 μ_t – viscosidade dinâmica turbulenta $(kg m^{-1}s^{-1})$
 ν – viscosidade cinemática (m^2s^{-1})
 ρ – massa volúmica, $(kg m^{-3})$
 ρ – vetor residual
 σ_q – média quadrática das flutuações do caudal de ventilação, $(kg m^{-3})$
 ϕ – propriedade genérica de variação contínua
 ω – frequência angular (s^{-1})
 ω – taxa de dissipação específica (s^{-1})

Siglas

CFD – Computational Fluid Dynamics

DNS – Direct Numerical Simulation

GAMG – Generalised Geometric-Algebraic Multi-Grid Solver

LES – Large Eddy Simulation

RANS – Reynolds-Averaged Navier-Stokes

SIMPLE – Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética tem-se insurgido como um ímpeto de modernidade ante o aumento da demanda de energia. Ela procura dar resposta às exigências económicas e ambientais sem comprometer a qualidade de vida e de trabalho das pessoas. Esta traduz-se num exercício de gestão e otimização do consumo de energia.

Segundo dados da União Europeia relativos a 2010, o setor doméstico e o setor terciário (comércio e serviços) absorveram, respetivamente, 4,7% e 15,33% da energia elétrica total para aplicações de ventilação e ar condicionado. Estas aplicações têm como principal objetivo o arrefecimento dos espaços interiores, com remoção de carga térmica, e a manutenção da qualidade do ar interior, com introdução de ar novo.

Os sistemas de ventilação mecânica, que assentam no uso de equipamentos de insuflação de ar novo vindo do exterior e de extração de ar interior, permitem controlar com algum rigor as condições de temperatura, humidade e velocidade do ar interior, garantindo a qualidade do ar e o conforto térmico dos ocupantes. No entanto, consomem grandes quantidades de energia elétrica. A estratégia que se interpõe como alternativa a este sistema é a ventilação natural.

A Portaria nº353-A/2013 de 4 de Dezembro, que estabelece os “Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior” em edifícios de comércio e serviços, propõe a seguinte definição de ventilação natural:

“A ventilação com recurso às ações naturais do vento e da diferença de temperatura baseia-se em soluções que permitam o escoamento natural do ar nos espaços interiores do edifício, através de aberturas permanentes ou controláveis, com área adequada para o efeito, sendo que o caudal de ar novo efetivo nos espaços está dependente dos efeitos naturais e da atuação dos ocupantes nas folhas móveis dos vãos.”

A ventilação natural promove o escoamento do ar interior dos espaços, através de um gradiente de pressão entre o interior e o exterior do edifício, gradiente esse que pode ser de origem aerodinâmica, de origem térmica ou resultar do efeito combinado destas

duas. Tem um caráter aleatório e imprevisível, em virtude da sua forte dependência das condições atmosféricas (temperatura, velocidade e direção do vento e turbulência da camada limite atmosférica), mas também da própria arquitetura do edifício, onde o número, a área e a disposição das aberturas para o exterior são variáveis, o que determina uma interação singular entre o edifício e o escoamento de aproximação.

Se as condições forem favoráveis, a ventilação natural pode constituir uma técnica de arrefecimento passivo que consiste em remover carga térmica do edifício durante a noite, nas estações quentes, em consequência da temperatura do ar interior do edifício ser superior à temperatura do ar exterior. Durante o dia, a ventilação natural favorece a circulação e entrada de ar novo no edifício, contribuindo assim para a manutenção da qualidade do ar interior.

A imponderabilidade da ventilação natural leva os arquitetos, na maioria dos casos, a optar por um sistema híbrido de ventilação, composto por ventilação mecânica e ventilação natural.

A prática da engenharia reserva-se ao cálculo dos caudais de ar novo necessários para a remoção da carga poluente e da potência térmica de arrefecimento, no processo de dimensionamento de sistemas de ventilação e ar-condicionado. Para além disso, cabe-lhes garantir que não existem zonas críticas de desconforto térmico. Estas máximas permanecem válidas para cálculo e dimensionamento de ventilação natural.

No que concerne aos modelos de previsão da ventilação natural, os engenheiros têm à sua disposição quatro modelos com crescente grau de complexidade. Por um lado, existem os modelos empíricos e os modelos multi-zona que permitem estimar os caudais de ventilação para espaços com e sem partições internas, respetivamente, mediante a aplicação de relações empíricas. Por outro lado, há também os modelos zonais e os modelos de dinâmica de fluidos computacional, vulgo CFD, que acrescentam a possibilidade de inferir com diferente grau de detalhe as distribuições de velocidade, temperatura e pressão no interior do espaço ventilado.

As potencialidades do CFD nos estudos de ventilação natural são altamente reconhecidas, a comprovar pelo volume de publicações científicas que se socorrem dos seus resultados. Muito embora seja um método rigoroso, está fortemente dependente das condições de fronteira e dos parâmetros numéricos, o que dificulta muitas vezes a obtenção de resultados conclusivos e concordantes com os ensaios experimentais. O CFD exige, em

primeiro lugar, um *software* capaz de modelar o fenómeno e, em segundo lugar, uma elevada capacidade de processamento.

As aplicações informáticas de CFD disponíveis no mercado são variadas, no entanto a fatura a pagar pelas licenças não é sustentável para quem deseja fazer-lhe uso, tanto em pequenas utilizações de engenharia, como para fins pessoais ou académicos. A vaga recente de aplicações *Open Source*, isto é, *softwares* de distribuição livre e gratuita, refletiu-se nas aplicações de CFD, nomeadamente com a criação do designado OpenFOAM®, uma ferramenta completíssima de CFD ao acesso de todos.

Não há evidências de que alguma vez o OpenFOAM® tenha sido utilizado em casos de ventilação natural, não obstante é constatável o aumento exponencial de publicações científicas que recorrem ao OpenFOAM®.

A matriz de funcionamento do OpenFOAM® tem particularidades que dificultam a sua utilização, o que faz com que, a cada novo problema físico, seja necessário reconhecer e implementar um procedimento próprio capaz de dar resposta às expectativas do utilizador. Em suma, o utilizador tem de reconhecer e estabelecer o que pretende retirar das simulações e pensar na forma, às vezes pouco evidente, de o concretizar, respeitando os recursos existentes no OpenFOAM®.

No contexto do presente trabalho, urge-se dar cumprimento aos seguintes objetivos:

1. Idealizar e implementar uma metodologia em OpenFOAM® capaz de calcular os caudais de ventilação através das aberturas de espaços ventilados;
2. Selecionar casos de estudos experimentais sobre ventilação natural e modelá-los em OpenFOAM®;
3. Avaliar o desempenho do OpenFOAM® por comparação com os resultados experimentais;
4. Analisar a influência que as propriedades do escoamento, as características geométricas e os parâmetros da modelação e resolução numérica exercem nas previsões dos caudais de ventilação;
5. Propor uma nova abordagem para a modelação numérica de ventilação *single-sided*;

6. Incentivar e difundir a utilização do OpenFOAM® em estudos de ventilação natural.

A presente tese começa por fazer uma revisão dos princípios que regem a ventilação natural, bem como os mecanismos que a identificam. Ainda no segundo capítulo, são dados a conhecer estudos realizados sobre ventilação *single-sided* que culminam na compreensão da influência de alguns parâmetros nos caudais de ventilação e na identificação de modelos de previsão dos mesmos.

O terceiro capítulo aborda a temática da modelação numérica da dinâmica dos fluidos, revisitando os aspetos mais relevantes que a sustentam, nomeadamente os princípios governativos na mecânica dos fluidos, a modelação da turbulência, a discretização espacial e numérica e os algoritmos de resolução numérica. Por fim, faz-se um enquadramento da modelação numérica em ventilação natural, através do levantamento de estudos já realizados que dão a conhecer as capacidades e as limitações do CFD em ventilação natural.

O quarto capítulo expõe a metodologia desenvolvida para o cálculo dos caudais de ventilação e revela os princípios de funcionamento do OpenFOAM®.

O quinto capítulo replica as condições experimentais dos ensaios seleccionados para simulação numérica. Para além disso, percorre as estratégias transversais de garantia da qualidade dos resultados, como a independência da malha. Apresenta, escrutina e discute os resultados numéricos. É no quinto capítulo que é proposta a nova estratégia para a determinação dos caudais de ventilação *single-sided*.

O sexto capítulo contém as conclusões sobre o trabalho realizado, as fragilidades e a formulação completa da nova estratégia para determinação dos caudais de ventilação *single-sided*.

2. VENTILAÇÃO NATURAL

O estudo da ventilação natural compreende diferentes tópicos e abordagens, o que se explica pelas naturezas distintas da sua manifestação e pelo interesse particular sobre determinadas variáveis. Entender os fenómenos que regem a ventilação natural reveste-se de grande importância na hora de replicar empírica e numericamente os seus efeitos. É disto que se ocupa o capítulo que agora se inicia.

2.1. Classificação da Ventilação Natural

A ventilação natural surge sob diferentes designações na literatura. A sua classificação é baseada em dois critérios, o primeiro diz respeito à natureza da força motriz e o segundo ao modo como a ventilação opera.

O movimento do ar na ventilação natural deve a sua existência a uma força motriz que é o resultado de um gradiente de pressão entre o interior e o exterior do espaço ventilado. Se a força motriz for devida à ação aerodinâmica do vento, a ventilação diz-se *wind-driven*; se, pelo contrário, for justificada pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício que provoca um efeito de impulsão térmica, diz-se que a ventilação é do tipo *buoyancy-driven*.

Quanto ao modo de operação, a ventilação surge com dois padrões distintos. Como ilustra a Figura 2.1, se o espaço destinado à ventilação apenas contiver aberturas numa das paredes exteriores, as trocas de ar entre o interior e o exterior dão-se no mesmo plano e a ventilação diz-se do tipo *single-sided*. Por sua vez, se duas ou mais paredes contiverem aberturas para o exterior, o escoamento é impelido a atravessar o espaço e a ventilação diz-se do tipo *cross*, ou ventilação cruzada, em português.

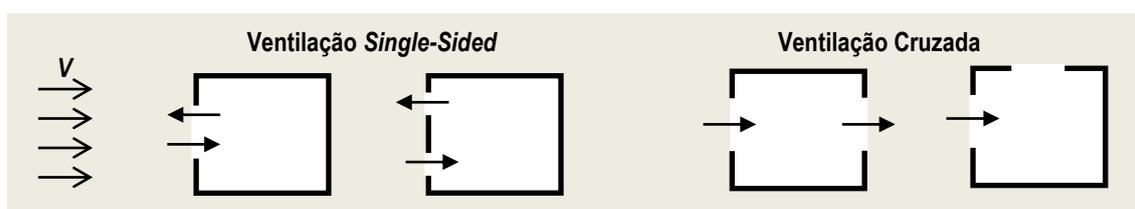


Figura 2.1. Exemplos de ventilação *single-sided* e de ventilação cruzada.

2.2. Camada Limite Atmosférica

À semelhança do que acontece em todos os escoamentos na natureza, o escoamento atmosférico desenvolve uma camada limite onde se registam fortes gradientes de velocidade, segundo a direção vertical e em especial junto ao solo, e onde predominam fenómenos de difusão turbulenta. Essa camada estende-se desde a superfície terrestre, onde a velocidade do ar é nula, até uma altura onde o gradiente da velocidade segundo a vertical é nulo.

O vento à superfície da Terra é altamente variável e turbulento e aumenta de intensidade com a altura. Para além da turbulência naturalmente presente no vento, em virtude da rugosidade do solo e das mudanças de direção e intensidade do vento, existem outras fontes que contribuem para a formação de instabilidades, tais como as correntes térmicas.

Seja \vec{V} a velocidade do vento, com componentes u , v , e w segundo as direções x , y , e z , respetivamente, T a sua temperatura e p a sua pressão. Se ϕ definir genericamente u , v , w , T e p então diz-se que

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t) \quad (2.1)$$

isto é, as componentes da velocidade, a pressão e a temperatura resultam da contribuição conjunta de um valor médio $\bar{\phi}$ e de um valor flutuante ϕ' , em cada instante.

Um escoamento turbulento é normalmente caracterizado por oscilações na pressão, velocidade e temperatura, sobre o campo médio dessas propriedades. Essas flutuações resultam de instabilidades no seio do escoamento que se traduzem na formação de estruturas coerentes e altamente rotacionais, ditos turbilhões. A dimensão característica dos turbilhões, designada por escala de turbulência, pode ir desde o comprimento típico das fronteiras do escoamento até à escala difusiva. A cada escala de comprimento corresponde uma frequência de oscilação das propriedades flutuantes.

O escoamento médio cede energia cinética aos turbilhões de maior dimensão (menor frequência) que a transmitem, por sua vez, aos turbilhões de menor dimensão (maior frequência). Esta transferência sucessiva de energia é cessada por efeito da dissipação viscosa nos turbilhões mais reduzidos do escoamento.

Outro ponto importante a reter é a interação do vento com obstáculos. Quando um escoamento de ar contorna um edifício, o campo de velocidades em redor deste

modifica-se, o que origina uma distribuição não uniforme da pressão na sua superfície, normalmente quantificada, em cada ponto, por coeficientes de pressão positivos ou negativos, consoante a pressão seja superior ou inferior à pressão atmosférica.

O escoamento em torno de um edifício é bastante complexo, não se pode atribuir-lhe padrões expectáveis. No entanto, sabe-se que esse escoamento depende da geometria do edifício, da presença ou não de edifícios nas redondezas e das características do vento atmosférico (Gomes et al., 2003). Segundo Peterka et al. (1985), é possível identificar zonas de separação e recirculação, pontos de estagnação e efeito de esteira, tal como indica a Figura 2.2.

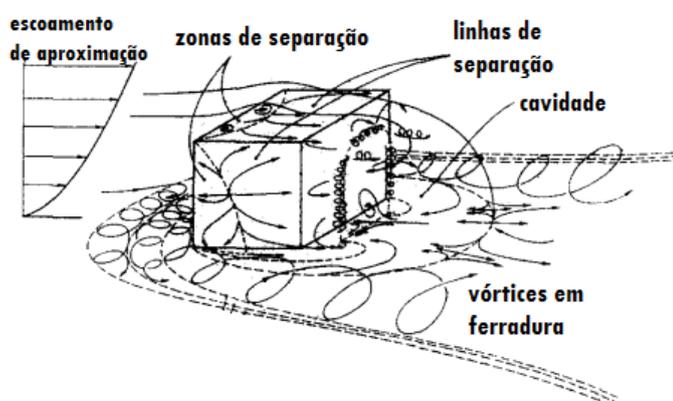


Figura 2.2. Linhas de corrente do escoamento em torno de um edifício por Peterka et al. (1985).

2.3. Mecanismos de Ventilação

O escoamento de ventilação natural é estimulado por um conjunto de fatores que podem ser sumariamente agrupados em dois grupos: aqueles que induzem um escoamento permanente em virtude do seu valor médio e aqueles cujo efeito reside na sua natureza flutuante.

O primeiro grupo inclui os coeficientes de pressão na superfície do edifício e a diferença de temperatura entre o interior e o exterior e está normalmente associado à ventilação cruzada. Duas aberturas situadas em zonas com coeficientes de pressão diferentes estabelecem um gradiente de pressão entre si, capaz de produzir um escoamento permanente, de entrada e saída de ar no espaço.

O segundo grupo inclui a turbulência do vento e o comportamento aleatório da intensidade e direção da velocidade. Estes fatores são responsáveis pela ventilação *single-*

sided onde normalmente as aberturas para o exterior estão contidas no mesmo plano e não se registam gradientes de pressão significativos.

A este respeito, Malinowski (1971) postula os quatros fenómenos que estão na origem da ventilação natural:

- a) escoamento através do compartimento
- b) escoamento pulsante
- c) penetração de turbilhões
- d) difusão molecular.

2.4. Ventilação *Single-Sided*

A ventilação *single-sided* recebe a contribuição do escoamento pulsante e da penetração de turbilhões que são favorecidos por variações da pressão ao longo do tempo, nas aberturas e que têm origem na turbulência e na oscilação da direção e intensidade do vento.

A turbulência cria diferenças de pressão positivas e negativas, em simultâneo, entre a abertura e o interior do espaço, o que incita à entrada e saída de ar ao mesmo tempo e na mesma abertura. De facto, Hill e Kusuda (1975) e Potter (1979) documentam experimentalmente a influência da turbulência no processo de ventilação *single-sided*, através de análise espectral de turbulência.

A penetração de turbilhões decorre da transferência de vórtices altamente rotativos presentes no escoamento exterior para o interior do espaço, consistindo um mecanismo adicional de troca de quantidade de movimento (Figura 2.3).

Relativamente ao escoamento pulsante, considere-se um espaço fechado com uma abertura para o exterior sujeito à ação de escoamento de ar com velocidade $\vec{V} = (u, 0, 0)$, tal como mostra a Figura 2.4. No caso em que o escoamento incidente é perpendicular ao plano que contém a abertura, assume-se $v' = w' = 0$. À medida que o escoamento se aproxima da superfície que contém a abertura, u diminui e a pressão estática aumenta. Na abertura, as componentes médias da velocidade são nulas, $\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$, mas as componentes flutuantes não o são, $u', v', w' \neq 0$. Assim, haverá transferência flutuante de ar para o interior do espaço, em cada direção x, y, z . O escoamento pulsante é, então, a flutuação de um volume significativo de fluido dentro do espaço ventilado, devido à afetação da pressão na abertura pelas flutuações da velocidade.

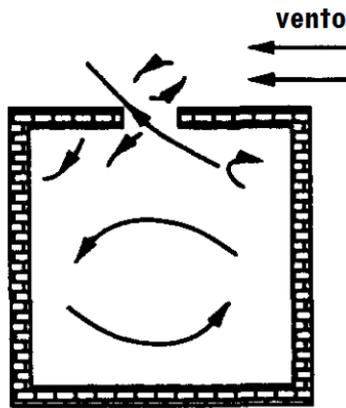


Figura 2.3. Mecanismo de penetração de turbilhões, adaptado de Haghghat et al. (1991).

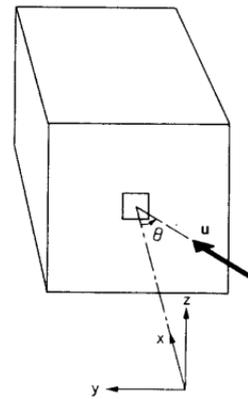


Figura 2.4. Escoamento pulsante por Cockroft e Robertson (1976).

2.4.1. Efeito da compressibilidade nos caudais de ventilação

Sobre o efeito de compressibilidade, Maas et al. (1991) realizam ensaios num modelo à escala real e comprovam que o contributo da compressibilidade para a ventilação *single-sided* é preponderante, especialmente em edifícios que têm aberturas de pequena dimensão e grandes volumes. Importa clarificar, então, como a compressibilidade se faz sentir na ventilação *single-sided*.

O ar contido no espaço ventilado assume-se como um gás ideal e compressível. Para um processo adiabático,

$$p \mathcal{V}^\gamma = \text{constante} \quad (2.2)$$

onde p é a pressão, \mathcal{V} é o volume de ar contido no espaço e γ é o coeficiente de expansão adiabática.

Se o espaço ventilado, inicialmente à pressão atmosférica p_a e com um volume inicial \mathcal{V}_i , for sujeito a uma pressão interior p_i , tal que $\Delta p = p_i - p_a$, o volume da massa de ar originalmente contida no espaço diminui numa quantidade v . Então,

$$p_i (\mathcal{V}_i - v)^\gamma = p_a \mathcal{V}_i^\gamma \quad (2.3)$$

Dado que $v/\mathcal{V}_i \ll 0$ e $(p_i - p_a)/p_i \ll 1$, a equação (2.3) é assim simplificada como

$$\frac{p_i - p_a}{p_a} = \frac{\gamma v}{\mathcal{V}_i} \quad (2.4)$$

A equação (2.4) reflete a resposta do sistema a uma variação de pressão $\Delta p = p_i - p_a$. O decréscimo de volume da massa de ar originalmente contida no espaço, v , não é

mais do que a quantidade de ar que entra no sistema e que só é acomodado graças à compressibilidade do ar. Assim,

$$v = \int_0^t q dt \quad (2.5)$$

onde q é o caudal de ventilação instantâneo devido à flutuação da pressão.

2.4.2. Parâmetros que afetam os caudais de ventilação *single-sided*

A previsibilidade dos caudais de ventilação é tanto maior quanto maior for o conhecimento das variáveis que os afetam. A Figura 2.5 sintetiza os parâmetros que são vulgarmente apontados como determinantes para os caudais de ventilação *single-sided* isotérmica.

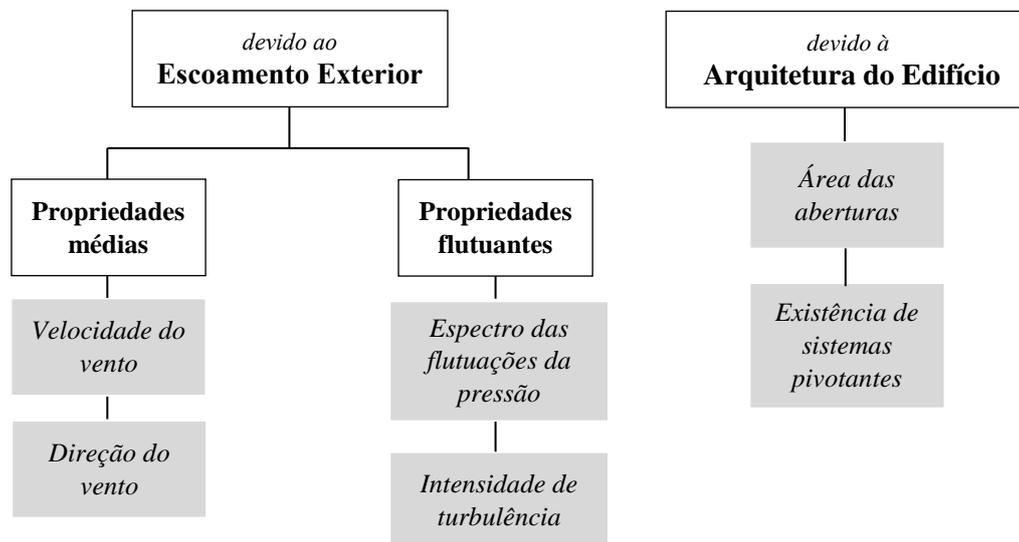


Figura 2.5. Parâmetros que afetam a ventilação natural com origem no escoamento atmosférico e na arquitetura do edifício.

2.4.2.1. Velocidade média do vento

Crommelin e Vrins (1988) comprovam que o caudal de ventilação é proporcional à velocidade média do vento, quando o escoamento exterior é paralelo à abertura. A constante de proporcionalidade depende da distância entre a abertura e a fachada a barlavento, quanto menor ela for, maior será o caudal, em virtude da maior intensidade turbulenta a montante do modelo.

Narasaki et al. (1987) verificam também uma relação linear entre o caudal de ventilação e a velocidade média do vento, desta vez para um escoamento exterior

perpendicular à abertura, para diferentes intensidades de turbulência e para diferentes áreas de abertura.

2.4.2.2. Direção média do vento

Seja Q o caudal de ventilação natural, A a área da abertura e V a intensidade da velocidade média do vento. O caudal adimensional Q^* é dado por

$$Q^* = \frac{Q}{AV} \quad (2.6)$$

Warren (1977) documenta, pela primeira vez, o efeito do ângulo de incidência do escoamento, θ , nos caudais de ventilação *single-sided*. θ é formalmente reconhecido como o ângulo formado entre a direção principal do escoamento exterior e a normal ao plano que contém a abertura, tal como se observa na Figura 2.6.

Outros autores apresentam estudos neste âmbito e nota-se que há um registo muito semelhante para a evolução de Q^* com θ . A Figura 2.7 mostra os resultados experimentais de Warren (1977), Larsen e Heiselberg (2008), Bu et al. (2010) e Chu et al. (2011) a este respeito. O comportamento de Q^* em função de θ respeita uma função do tipo sinusoidal, onde Q^* é máximo para um intervalo de θ entre 30 e 60° e mínimo para um intervalo de θ entre 120 e 150°. Isto significa que o caudal adimensional máximo e mínimo ocorre para uma situação em que a abertura se situa numa fachada a barlavento e sotavento, respetivamente. O escoamento paralelo à abertura, $\theta = 0^\circ \vee \theta = 180^\circ$, e o escoamento perpendicular à abertura, $\theta = 90^\circ$, produzem caudais adimensionais semelhantes.

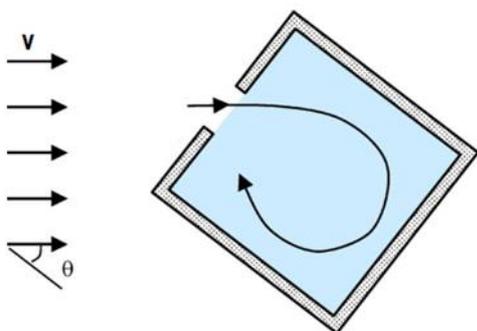


Figura 2.6. Ângulo de incidência do escoamento num espaço ventilado (Chu et al. (2011)).

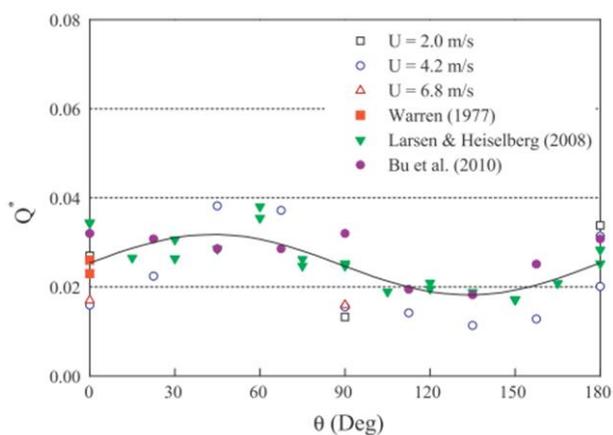


Figura 2.7. Variação do caudal adimensional de ventilação com o ângulo de incidência do escoamento (Chu et al. (2011)).

2.4.2.3. Espectro das flutuações da velocidade

Cockroft e Robertson (1976) mostram ainda que as flutuações da velocidade de maior frequência estão na origem da difusão turbulenta do ar para o interior do espaço, fenómeno que está menos dependente da compressibilidade do ar.

Haghighat et al. (1991) esclarecem como as flutuações da pressão influenciam os caudais de ventilação. O ar tem de ser deslocado no mínimo numa distância equivalente à espessura da abertura, para permitir que o ar exterior penetre e que o ar interior se extraia. Quando o caudal de ventilação é flutuante, como é no caso da ventilação *single-sided*, nem todo o ar que atravessa a abertura contribui efetivamente para a ventilação do espaço, porque existem mudanças de direção da velocidade na zona da abertura. Haghighat et al. (1991), Cockroft e Robertson (1976) e Gusten (1989) constatam que, na abertura, as flutuações de menor frequência induzem maior uniformidade da direção da velocidade e que as flutuações de maior frequência provocam distribuição irregular da direção da velocidade. Haghighat et al. (1991) concluem que a contribuição das várias frequências para o caudal de ventilação efetivo é tanto maior quanto menor forem as frequências das flutuações.

Crommelin e Vrins (1988) estudam o efeito da velocidade média do vento no espectro das flutuações da pressão no plano da abertura. Os seus ensaios experimentais comprovam que a forma do espectro mantém-se semelhante com o aumento da velocidade, mas a energia diminui mais rapidamente para maiores frequências, bem como que os turbilhões gerados pela interação entre o escoamento e o edifício são aqueles que mais contribuem para a ventilação *single-sided*, em virtude do pico de energia que se lhes associa.

2.4.2.4. Área da abertura

Warren (1977) investiga o impacto da área e geometria das aberturas nos caudais de ventilação adimensionais, Q^* , e faz notar que os caudais adimensionais não variam consistentemente com a área da abertura, tenha ela uma geometria quadrangular ou seja ela mais delgada.

Narasaki et al. (1987) e Crommelin e Vrins (1988) mostram que o caudal de ventilação é proporcional à área de abertura. Narasaki et al. (1987) provam que o crescimento do caudal com a área de abertura é tanto mais acentuado quanto maior for a velocidade média do escoamento exterior e quanto maior for a intensidade de turbulência.

Bu et al. (2010) reportam que a relação linear entre a área de abertura e os caudais de ventilação adimensionais mantém-se independentemente do número de aberturas contidas no mesmo plano e do ângulo de incidência do escoamento de aproximação.

Haghighat et al. (1991) documentam que a área de abertura e os caudais de ventilação têm uma relação que se afasta da linearidade, quando o escoamento é puramente pulsante, isto porque um escoamento pulsante está limitado ao volume do espaço e à capacidade que o ar tem para pressurizar e despressurizar. Nos restantes estudos, o aumento da área de abertura conta com o efeito do aumento da penetração de turbilhões, responsável por manter a relação linear entre ela e o caudal de ventilação.

2.4.2.5. Existência de sistemas pivotantes

As considerações feitas até agora dizem respeito à ventilação *single-sided* através de uma abertura simples. No entanto, é frequente encontrar janelas com elementos giratórios ou membranas fixas que tendem a potenciar ou a inibir a ventilação natural, tal como é observado experimentalmente por Crommelin e Vrins (1988).

Warren (1977) demonstra que a colocação de uma lâmina na abertura interfere nos caudais adimensionais de ventilação que são tanto maiores quanto maior for o ângulo formado pela lâmina e o plano que contém a abertura. Para pequenos ângulos de abertura da lâmina, a variação do ângulo de incidência do escoamento não afeta os caudais adimensionais de ventilação.

2.5. Modelos de Previsão

O estudo da ventilação natural deve responder às exigências e aos critérios dos projetos arquitetónicos e energéticos. Na prática, falar em ventilação natural significa ser capaz de calcular expeditamente caudais de ventilação para as condições de projeto, garantir conforto térmico aos ocupantes, com o conhecimento da distribuição da velocidade e temperatura do ar no espaço ventilado, e reconhecer a quantidade de gases contaminantes no espaço. Existem quatro modelos de complexidade crescente que reproduzem os efeitos da ventilação natural (Allard e Ghiaus, 2005): São eles os modelos empíricos, os modelos multi-zona, os modelos zonais e o CFD.

Os modelos empíricos baseiam-se em correlações empíricas para o cálculo de caudais de ventilação em espaços simples, obtidas com base nos resultados de ensaios

experimentais em modelos à escala e medições em protótipos. São exemplo disso Phaff et al. (1980), Warren (1986), Dascalaki et al. (1996), Wang e Chen (2012) e Wang et al. (2015).

Os modelos multi-zona permitem calcular os caudais em espaços com múltiplos compartimentos, a partir de correlações empíricas e do conhecimento da pressão exterior, como é o caso de Nantka e Majerski (1981) e Hayashi et al. (1987), Já os modelos zonais recorrem a uma discretização macroscópica do espaço e da aplicação de equações de conservação da massa e energia para determinar a distribuição das propriedades do escoamento, de uma forma mais expedita, mas menos precisa relativamente ao CFD, como por exemplo Backer et al. (2014) e Kotani et al. (1998).

Por fim, o método de que se ocupa esta tese, o CFD, que tem a capacidade de determinar os caudais de ventilação e as distribuições de velocidade, pressão, temperatura e concentração de contaminantes nos espaços, pela resolução numérica das equações de transporte e de turbulência, num domínio altamente discretizado. A este tema será dada toda a atenção no Capítulo 3.

2.5.1. Modelos empíricos de ventilação *single-sided*

No que concerne à presente tese, os caudais de ventilação obtidos em ensaios experimentais são o principal objeto de aferição da qualidade das simulações numéricas.

Saber identificar correlações empíricas e dominar os princípios que sustentam equações teóricas para o cálculo dos caudais de ventilação *single-sided* pode ser um auxílio relevante quando se pretende transpor o modelo físico de ventilação para um modelo numérico de simulação. Seguem-se, então, alguns dos mais notáveis trabalhos na previsão de caudais de ventilação *single-sided* e que suportam algumas das decisões tomadas na presente tese.

Cockroft e Robertson (1976) desenvolvem um modelo teórico para um escoamento pulsante, com ângulo de incidência igual a 0°, fazendo incluir o efeito de compressibilidade do ar contido no espaço ventilado, dado pela equação (2.7). Narasaki et al. (1987) prova que o modelo de Cockroft e Robertson (1976) não reproduz boas estimativas quando o ângulo de incidência do escoamento se afasta de 0°, uma vez que não entra em conta com o efeito da penetração de turbilhões, determinante nesses casos.

$$Q = \frac{dv}{dt} = \pm A\beta |V^2 - (2\gamma p_a/\rho)v/\mathcal{V}_i|^2 \quad (2.7)$$

onde v é o volume de ar imaginário na abertura, β o coeficiente de descarga e p_a a pressão do escoamento não perturbado.

Phaff et al. (1980) e Warren (1986) sugerem correlações empíricas para a determinação dos caudais de ventilação *single-sided*. Phaff et al. (1980) definem a correlação empírica em função da área efetiva de abertura, da velocidade do vento e da diferença de temperatura como na equação (2.8). Warren (1986) relaciona-a com a área da abertura e com a velocidade e direção do vento, tal como as equações (2.9) e (2.10).

$$Q = 0,5 A (0,001 V^2 + 0,0035 H \Delta T + 0,01)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

onde H é a altura da abertura e ΔT a diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício.

$$Q = 0,1 A V_L \text{ se } \frac{V_L}{V} < 0,25 \quad (2.9)$$

$$Q = 0,025 A V \text{ se } \frac{V_L}{V} \geq 0,25 \quad (2.10)$$

onde V_L é a intensidade da velocidade na direção paralela ao plano da abertura, que varia em função de θ e do número de Reynolds.

Haghighat et al. (1991) propõem um modelo teórico de previsão dos caudais de ventilação natural que assenta no balanço das forças de pressão do sistema, representado na ótica de uma transformada de Fourier. Haghighat et al. (1991) verificam que existe uma relação linear entre o espectro de energia do caudal de ventilação e o espectro de energia da pressão induzida pelo vento, o que os leva a concluir que a média quadrática do caudal de ventilação é o resultado da integração do espectro de pressão do vento e de uma função de transferência, sobre o domínio das frequências. À semelhança de Cockroft e Robertson (1976), Haghighat et al. (1991) consideram o efeito de compressibilidade do ar:

$$\sigma_q = 2\pi \int_0^{\infty} S_q(\omega) d\omega \quad (2.11)$$

$$S_q(\omega) = \|H(\omega)\|^2 S_p \quad (2.12)$$

onde σ_q é a média quadrática (*root mean square*) do caudal de ventilação, ω a frequência angular, S_q o espectro de energia do caudal de ventilação, S_p o espectro de energia da pressão do vento e $H(\omega)$ a função de transferência, dependente da área de abertura, espessura da abertura, compressibilidade do ar e de um parâmetro de flutuações.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA DINÂMICA DE FLUIDOS

O modelo físico de um problema de ventilação natural pode ser representado através de um modelo matemático, sem que haja perda de informação. O modelo matemático consiste num conjunto de equações conservativas aplicadas a um volume de controlo que respeitam determinadas condições iniciais e de fronteira. A modelação numérica da dinâmica dos fluidos, ou CFD, ocupa-se da resolução numérica dos modelos matemáticos, mediante processos iterativos de convergência.

A importância do CFD no estudo da ventilação natural é sustentada por Jiru e Bitsuamlak (2010) que sublinham a necessidade de métodos que forneçam informação qualitativa e quantitativa sobre a interação entre as condições climáticas e o edifício, durante a fase de projeto. Neste campo, o CFD apresenta algumas vantagens face aos métodos experimentais em túneis de vento, porque é capaz de representar as variáveis em todo o domínio, elimina a dificuldade de controlar as condições experimentais e não revela constrangimentos ao nível da semelhança entre modelo e protótipo.

Neste capítulo, são enunciados os princípios da modelação numérica da dinâmica dos fluidos, entre os quais as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, a modelação da turbulência e a discretização segundo o método de volumes finitos. São também revistas algumas investigações sobre CFD em ventilação natural.

3.1. Princípios Governativos da Mecânica dos Fluidos

As equações que regem o movimento de um fluido assentam nas leis da conservação da física, nomeadamente a conservação da massa, da quantidade de movimento e de energia, por unidade de volume do fluido. A solução destas equações é representativa da distribuição das propriedades do escoamento no domínio espacial e temporal. Estas equações podem ser formuladas como relações integrais ou diferenciais (Versteeg e Malalasekera, 1995). A Tabela 3.1 condensa as equações de conservação na

sua forma diferencial, para um escoamento tridimensional, transiente e compressível de um fluido newtoniano com transferência de calor, bem como as equações de estado.

Tabela 3.1. Equações governativas do escoamento compressível de um fluido newtoniano.

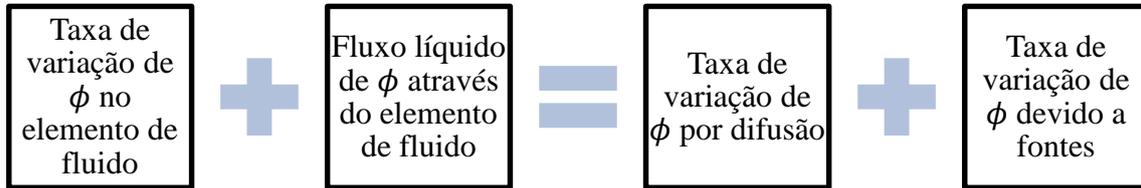
<i>Massa</i>	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0$	(3.1)
<i>Quantidade de movimento (x)</i>	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \overrightarrow{\operatorname{grad}} u) + S_x$	(3.2)
<i>Quantidade de movimento (y)</i>	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \overrightarrow{\operatorname{grad}} v) + S_y$	(3.3)
<i>Quantidade de movimento (z)</i>	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \overrightarrow{\operatorname{grad}} w) + S_z$	(3.4)
<i>Energia</i>	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho i \vec{V}) = -p \operatorname{div} \vec{V} + \operatorname{div}(k \overrightarrow{\operatorname{grad}} T) + \Phi + S_i$	(3.5)
<i>Eq. de Estado</i>	$p = \rho RT \text{ e } i = c_v T$	(3.6)
Legenda:		
μ – viscosidade dinâmica	k – condutibilidade térmica	Φ – função de dissipação
S_x, S_y, S_z, S_i – termos fonte	i – energia interna térmica	R – c. ^{te} gases perfeitos
		c_v – calor específico a volume c. ^{te}

A equação (3.1) obedece ao princípio de continuidade, de que a massa volúmica e a velocidade são funções contínuas, por isso mesmo postula que a taxa de variação da massa por unidade de volume é igual ao fluxo líquido da massa através das fronteiras do elemento de volume. As equações (3.2), (3.3) e (3.4) são também conhecidas como equações de Navier-Stokes e refletem o balanço de forças que atuam num volume unitário de fluido onde a taxa de variação da quantidade de movimento é igual à ação conjunta das forças de pressão, de corpo e viscosas. Por fim, a equação (3.5) inclui os mecanismos capazes de variar a energia interna térmica, por transferência de calor: a condução, advecção e radiação, por dissipação viscosa e devido a fontes/poços semelhantes.

As equações de conservação são formalmente idênticas. De facto, se se introduzir a variável genérica ϕ , é possível reescrever todas as equações na seguinte forma condensada (Versteeg e Malalasekera, 1995):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{V}) = \text{div}(\Gamma \overrightarrow{\text{grad}} \phi) + S_\phi \quad (3.7)$$

que, por palavras, significa



A equação (3.7) designa a equação de transporte da propriedade ϕ que pode assumir as variáveis 1 , u , v , w e T e traduz o balanço, por um lado, da derivada local da propriedade ϕ e de um termo advectivo e, por outro lado, de um termo difusivo ($\Gamma =$ coeficiente difusivo) e um termo de fonte.

3.2. Modelação Numérica da Turbulência

Na Secção 2.1, foi feita uma breve revisão sobre os aspetos fundamentais da turbulência. Pretende-se, agora, responder às questões da sua modelação em CFD.

Como é sabido, os turbilhões caracterizam-se por diferentes escalas de comprimento, a que correspondem distintas frequências de oscilação da velocidade. A simulação numérica da turbulência pode consistir na resolução direta das equações de Navier-Stokes, assumindo que essas representam todos os movimentos devidos à turbulência. No entanto, este procedimento implica a existência de uma discretização temporal e espacial capaz de cobrir todo o espectro de escalas de turbulência do escoamento e, conseqüentemente, uma avultada capacidade de memória e de processamento. A alternativa passa por aproximar, na totalidade ou parcialmente, as escalas de turbulência por modelos preditivos, como sucede nos modelos *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) e *Large Eddy Simulation* (LES).

Na Figura 3.1, esquematiza-se o domínio de aplicação dos modelos RANS e LES, dentro de um espectro genérico de escalas de turbulência. Como é possível ver, o modelo LES resolve diretamente as maiores escalas de turbulência (menor frequência) e aproxima as escalas de turbulência mais pequenas (maior frequência). Por sua vez, os modelos RANS aproximam todo o espectro de escalas de turbulência, o que os torna mais imprecisos, mas menos dispendiosos computacionalmente. Por este último motivo, serão apenas usados os modelos RANS nesta dissertação.

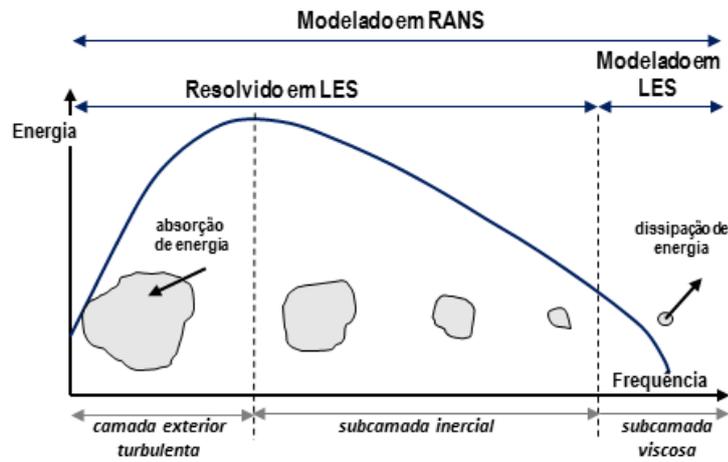


Figura 3.1. Domínio da modelação e resolução das escalas de turbulência em RANS e LES (Adaptado de Guerrero, 2015).

3.2.1. Reynolds-averaged navier-stokes

Os modelos RANS assentam no princípio de que as propriedades do escoamento i , p , u , v e z oscilam aleatoriamente em torno de um valor médio, ao longo do domínio, tal como indica a equação (2.1). A sua estratégia consiste em transformar p , i , u , v , e w das equações conservativas nos respetivos valores médios, de onde resulta uma nova formulação patente na Tabela 3.2 (Wilcox, 1994).

Tabela 3.2. Formulação geral das equações conservativas RANS.

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0$		(3.8)
$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \vec{V}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \text{div}(\mu \overrightarrow{\text{grad}} \bar{u}) + \left[-\frac{\partial \overline{\rho u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\rho u'w'}}{\partial z} \right] + S_x$		(3.9)
$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v} \vec{V}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \text{div}(\mu \overrightarrow{\text{grad}} \bar{v}) + \left[-\frac{\partial \overline{\rho v'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\rho v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\rho v'w'}}{\partial z} \right] + S_y$		(3.10)
$\frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{w} \vec{V}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \text{div}(\mu \overrightarrow{\text{grad}} \bar{w}) + \left[-\frac{\partial \overline{\rho u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\rho v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\rho w'^2}}{\partial z} \right] + S_z$		(3.11)
$\frac{\partial(\rho \bar{i})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{i} \vec{V}) = \text{div}(\Gamma_i \overrightarrow{\text{grad}} \bar{i}) + \left[-\frac{\partial \overline{\rho u'i'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\rho v'i'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\rho w'i'}}{\partial z} \right] + S_i$		(3.12)

A formulação RANS é em tudo semelhante à forma original das equações, mas faz incluir termos adicionais, $-\rho\overline{u'_i u'_j}$, que têm dimensões de quantidade de movimento por unidades de área e tempo, ou seja, de densidade de fluxo de quantidade de movimento. São apelidados de tensões de Reynolds e funcionam como um mecanismo adicional de troca de quantidade de movimento, por vezes muito mais determinante do que a ação viscosa.

A introdução das tensões de Reynolds nas equações de conservação aumenta o número de incógnitas e, conseqüentemente, impossibilita a resolução do sistema matemático. A solução passa por estabelecer correlações empíricas e, por isso, questionáveis, destinadas a relacionar as novas incógnitas com as variáveis do escoamento médio, isto é, implementar modelos de turbulência (Oliveira e Lopes, 2010).

3.2.1.1. Modelos de turbulência RANS

Um modelo de turbulência é um procedimento computacional que tem por objetivo tornar o sistema de equações (3.8)-(3.12) possível e determinado. O modelo selecionado para o presente estudo é o modelo de duas equações $k - \omega$ SST.

Este modelo parte do conceito de energia cinética específica das flutuações turbulentas, k , que serve de base para a escala de velocidades dos turbilhões,

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.13)$$

vindo a ser incorporada nas equações RANS, de modo a obter a equação de transporte de k . Para que a formulação seja coerente, é necessário relacionar k com uma segunda variável, de tal forma que se tornem representativas da escala de comprimentos ℓ e da viscosidade turbulenta μ_t .

A hipótese de Boussinesq completa os modelos, determinando que as tensões de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, em que a constante de proporcionalidade é a viscosidade turbulenta μ_t .

3.2.1.1.1. $k - \omega$ SST

O modelo $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport) foi proposto por Menter (1993) e tem vindo a arrebatrar diversos utilizadores de CFD pela sua capacidade de combinar as vantagens dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$. Por um lado, acompanha a formulação do modelo $k - \omega$ no interior da camada limite, o que o torna utilizável desde a fronteira sólida até ao limite da subcamada viscosa e, por outro lado, aproxima-se do comportamento do modelo

$k - \varepsilon$ em zonas de escoamento livre, o que o torna menos sensível às condições de entrada do fluido, em comparação com o modelo $k - \omega$.

É indicado para a modelação de escoamentos com separação, mas produz níveis de turbulência elevados em zonas de estagnação e zonas de grande aceleração (Guerrero, 2015).

Se ε for a taxa de dissipação da energia cinética da turbulência, figurativa da taxa de conversão de energia cinética turbulenta em energia interna térmica, por unidade de massa ($J/kg.s$)

$$\frac{dk}{dt} = -\varepsilon \quad (3.14)$$

então ω pode descrever-se como a taxa de dissipação específica que expressa a taxa de conversão de energia cinética turbulenta em energia interna térmica, por unidade de tempo e volume, e que tem unidades s^{-1} , assim

$$\omega \sim \frac{\varepsilon}{k} \quad (3.15)$$

Por análise dimensional, estabelece-se que

$$\mu_t \sim \rho \frac{k}{\omega}, \quad \ell \sim \frac{k^{1/2}}{\omega} \quad (3.16)$$

A formulação do modelo $k - \omega$ SST encontra-se detalhada no Anexo A.

3.2.2. Funções de parede

A camada limite turbulenta regista importantes gradientes de velocidade, em virtude da dissipação viscosa que aí ocorre, por esse motivo, o conhecimento rigoroso das propriedades do escoamento junto de uma superfície sólida obriga à utilização de malhas muito refinadas nessa região. Se esse conhecimento não for preponderante para a aplicação em curso, é possível fazer uso de funções de parede que consistem em correlações empíricas para a determinação das condições de fronteira das propriedades k , ω , ε e μ_t nas superfícies sólidas.

A Figura 3.2 revela as regiões da camada limite turbulenta com as correspondentes extensões, medidas através da distância adimensional à parede y^+ .

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (3.17)$$

onde y é a distância, medida na normal, entre o nó da primeira célula e a superfície sólida e u_τ é a velocidade de atrito parietal.

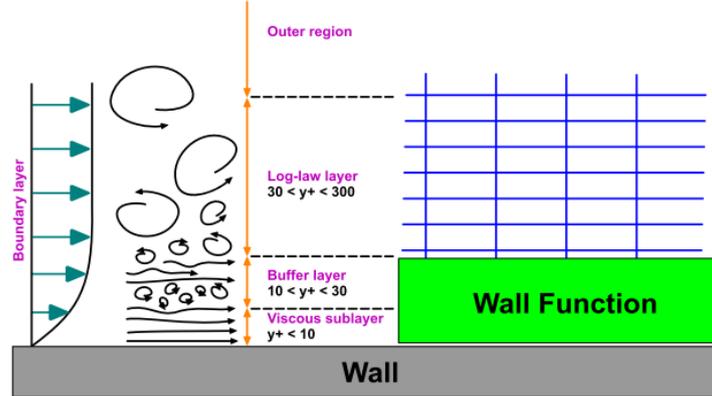


Figura 3.2. Função de parede que substitui o efeito da subcamada viscosa (viscous sublayer) e a camada tampão (buffer layer) por Guerrero (2015).

Normalmente, a aplicação de funções de parede exige que $30 \leq y^+ \leq 300$, no entanto o OpenFOAM® disponibiliza o tratamento automático das propriedades turbulentas k , ω e μ_t defendido por Vieser et al. (2002). Esta técnica não depende tanto de y^+ , pois tanto fornece aproximações para a subcamada viscosa, como para a região logarítmica, o que lhe confere grande vantagem face às funções de parede tradicionais. Com efeito,

$$\omega_{vis} = \frac{6\nu}{0,075y^2}; \quad \omega_{log} = \frac{1}{0.3\kappa} \frac{u_\tau}{y} \quad (3.18)$$

que em termos de y^+ fica

$$\omega(y^+) = \left(\omega_{vis}^2(y^+) + \omega_{log}^2(y^+) \right)^{0,5} \quad (3.19)$$

A velocidade de atrito parietal está relacionada com a tensão de atrito parietal τ_0 , tal que $\tau_0 = \rho u_\tau^2$, e é determinada por

$$u_\tau^{vis} = \frac{u_0}{y^+}; \quad u_\tau^{log} = \frac{u_0}{\frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C}; \quad u_\tau = \left[(u_\tau^{vis})^4 + (u_\tau^{log})^4 \right]^{0,25} \quad (3.20)$$

onde u_0 representa a velocidade no primeiro nó existente na direção normal à superfície sólida.

Para a equação de transporte de k , é utilizada a condição de fluxo nulo.

Basta garantir $y^+ \leq 300$ para que a modelação da turbulência junto de superfícies sólidas seja considerada válida.

3.3. Discretização Espacial e Numérica

As equações de conservação só são resolúveis analiticamente em escoamentos muito simples e ideais. Na maioria dos casos, é necessário resolvê-las numericamente, o que significa calcular as várias propriedades do escoamento, em cada ponto e instante, por meio de aproximações algébricas que convergem iterativamente.

A hipótese do *continuum* do fluido reserva a possibilidade de dividir o domínio espacial do escoamento num número finito de volumes de controlo, cada um deles representado por um nó interior. As equações de conservação da propriedade genérica ϕ são integradas sobre cada volume de controlo, em concordância com a formulação diferencial das equações que se destinam a um volume de controlo infinitesimal. Este procedimento de discretização é amplamente usado em CFD e é designado por método dos volumes finitos (Patankar, 1980).

Considerando um volume de controlo hexaédrico, o nó central P do volume de controlo finito tem seis nós vizinhos, N , S , E , W , B e T , na direção das seis faces do volume de controlo (Figura 3.3). A propriedade do escoamento ϕ no nó P é influenciada pelos nós vizinhos, o que é traduzido algebricamente por uma relação entre o valor da propriedade ϕ nos nós vizinhos, os coeficientes, a_i , relativos à difusão e advecção de ϕ e um termo da fonte b (Patankar, 1980).

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (3.21)$$

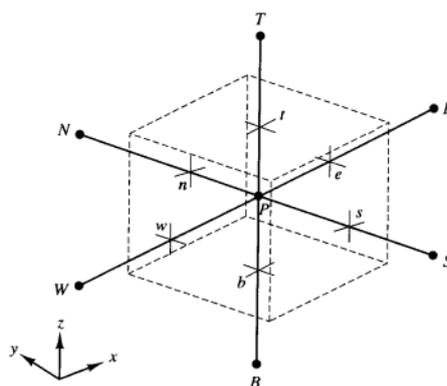


Figura 3.3. Volume de controlo finito hexaédrico com nó central P , faces n , s , e , w , b e t e nós vizinhos N , S , E , W , B e T (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Por sua vez, o termo fonte de uma propriedade S pode variar no tempo, pelo que importa linearizar a sua variação relativamente a ϕ_P . A fonte pode dizer respeito a uma fonte de calor, por exemplo. Neste sentido, a média da fonte \bar{S} toma a forma

$$\bar{S} = S_C + S_P \phi_P \quad (3.22)$$

onde S_C é o termo constante da fonte e S_P é o coeficiente linear de ϕ_P , obrigatoriamente $S_P \leq 0$.

A equação (3.21) deve refletir a integração da equação de transporte de ϕ sobre o volume de controlo finito. Uma vez que a equação de transporte é formada por derivadas parciais, importa determinar a forma como essas derivadas são discretizadas sobre o volume de controlo, isto é, importa estabelecer o esquema numérico de discretização. O esquema utilizado por omissão no OpenFOAM® para discretização do operador divergente é o esquema *upwind* de 2ª ordem ou *linear upwind*.

Veja-se o exemplo da discretização numérica da componente horizontal da velocidade u . A aproximação de u no ponto genérico i resulta da extrapolação linear dos dois valores de u a montante ou a jusante de i (Fortuna, 2000):

$$u_i = \begin{cases} \frac{3}{2}u_{i-1/2} - \frac{1}{2}u_{i-3/2} & \text{se } u_i^e \geq 0 \\ \frac{3}{2}u_{i+1/2} - \frac{1}{2}u_{i+3/2} & \text{se } u_i^e < 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

A equação anterior é esquematizada de acordo com a Figura 3.4.

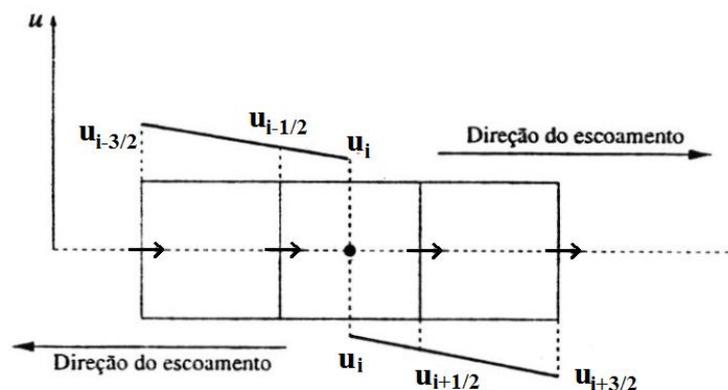


Figura 3.4. Diagrama da discretização de u pelo esquema *upwind*, adaptado de Fortuna (2000).

Os esquemas da família *upwind* eliminam a fragilidade do esquema das diferenças finitas, detetável em escoamentos com forte componente advectiva, o qual considera que o valor de ϕ numa interface é a média aritmética de ϕ nos nós adjacentes.

Os coeficientes a_N , a_S , a_E , a_W , a_T e a_B , sempre positivos, sugerem a influência dos termos advectivo e difusivo da equação de transporte da propriedade ϕ (3.7)

nas seis faces do volume de controlo (n , s , e , w , t e b) em termos do caudal mássico F e da condutância D . O desenvolvimento dos coeficientes a_i em termos de F e D encontra-se descrito no Anexo B.

3.4. Algoritmos para o Cálculo dos Campos de Velocidades e Pressão

O termo advectivo de uma propriedade escalar ϕ depende da intensidade e direção do campo de velocidades (3.7). O esquema numérico de discretização pressupõe o conhecimento do campo de velocidades, no entanto, o campo de velocidades é uma incógnita, assim como as demais quantidades de transporte. As componentes da velocidade u , v e w aparecem consecutivamente em todas as equações de conservação da quantidade de movimento, o que dá origem a um sistema de equações acopladas em conjunto com a equação da continuidade. Não obstante, o termo advectivo contém quantidades não-lineares, por exemplo, ρu^2 (Versteeg e Malalasekera, 1995). Este problema é ultrapassável através de uma estimativa inicial do campo de velocidades que convergirá iterativamente para a solução das equações de conservação (Patankar, 1980).

O maior problema surge, contudo, com o gradiente de pressão das equações de Navier-Stokes que é remetido para o termo fonte da equação geral de transporte de ϕ e, conseqüentemente, do esquema numérico de discretização. Se não existir qualquer informação sobre o gradiente de pressão, solucionar simultaneamente os campos de velocidade e pressão pode parecer impossível (Patankar, 1980).

Se o escoamento for compressível, a equação da continuidade é usada como equação de transporte da densidade ρ . A pressão p está relacionada com a densidade e com a temperatura através da equação de estado (3.6), $p = p(\rho, T)$. No entanto, se o escoamento for incompressível, a densidade é constante e, por isso, não é imediato estabelecer por esta via uma relação entre a velocidade e a pressão (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Interessa, pois, formular um algoritmo direto para o cálculo da pressão, sucessivamente capaz de aproximar o campo de velocidades e respeitar, com isso, a equação da continuidade. Posto isto, é possível determinar as restantes propriedades do escoamento.

Neste contexto, Patankar (1980) sugere que as componentes da velocidade u , v e w sejam calculadas nas interfaces dos volumes de controlo, estas últimas obrigatoriamente equidistantes dos nós vizinhos. Este conceito é observável na Figura 3.5 que mostra as componentes da velocidade u e v calculadas sobre as interfaces, a tracejado, do volume de controlo, a sombreado.

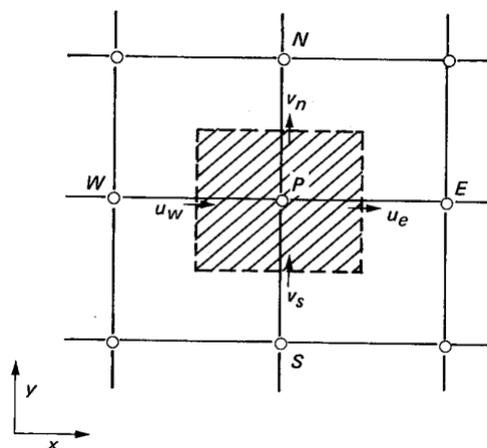


Figura 3.5. Volume de controlo para integração da equação da continuidade (Patankar, 1980).

Este desfasamento relativamente à malha original permite a aproximação de um campo de velocidades e de pressões com variações uniformes e coerentes com a realidade física, uma vez que as componentes da velocidade e a pressão só dependem de dois nós vizinhos. No entanto, coloca alguns obstáculos na programação do algoritmo, nomeadamente na indexação, informação geométrica e interpolações.

O algoritmo SIMPLE, *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*, é um processo iterativo para o cálculo dos campos de velocidades e de pressão, aplicável aos escoamentos incompressíveis em regime permanente, e que segue o princípio da malha desviada. As várias operações do algoritmo SIMPLE são descritas no Anexo C. Adicionalmente são feitas considerações relativamente ao tratamento das fronteiras do domínio pelo algoritmo SIMPLE e é introduzido o conceito de coeficiente de subrelaxação.

O OpenFOAM® oferece uma grande variedade de algoritmos, com destaque para o *rhoSimpleFoam* para escoamentos compressíveis em regime permanente e modelação de turbulência RANS e o *pisoFoam* para escoamentos incompressíveis em regime transiente e modelação de turbulência RANS.

3.5. Resolução das Equações de Discretização Numérica

Até aqui foi discutida a discretização numérica das equações governativas do escoamento, da qual resultam sistemas algébricos de n equações lineares que necessitam ser solucionados. Com efeito, cada discretização numérica de uma propriedade ϕ conduz a uma equação na forma matricial do tipo

$$A\phi = b \quad (3.24)$$

onde a matriz A é composta pelos coeficientes a do esquema numérico de discretização, ϕ é o vetor da propriedade nos nós/interfaces a determinar e b o vetor relativo às fontes.

O método iterativo parte de uma aproximação inicial ϕ^0 que é sucessivamente melhorada. Após n iterações, o vetor ϕ^n não satisfaz completamente a equação (3.24), pelo que é possível identificar um vetor residual ρ^n tal que

$$A\phi^n = b - \rho^n \quad (3.25)$$

O objetivo do método iterativo é reduzir ρ^n a zero. Para tal, as operações iterativas obedecem ao esquema

$$M\phi^{n+1} = N\phi^n - b \quad (3.26)$$

Na convergência, $\phi^{n+1} = \phi^n = \phi$, logo

$$A = M - N \quad (3.27)$$

ou, de forma mais genérica,

$$P A = M - N \quad b = P b \quad (3.28)$$

onde P é a matriz de pré-condicionamento.

Para que o método seja eficiente e rápido na convergência é preciso garantir que $N\phi^n$ e a solução do sistema ϕ^{n+1} sejam facilmente operadas. A primeira operação $N\phi^n$ não apresenta dificuldades, uma vez que a matriz N , à semelhança da matriz A , possui uma grande quantidade de elementos nulos. A facilidade com que se determina ϕ^{n+1} está dependente da natureza da matriz M , já que esta deve ser facilmente invertível, o que na prática significa que M seja diagonal, triangular ou tri-diagonal (Ferziger e Perić, 2002).

A escolha da matriz de pré-condicionamento na equação (3.28) deve assegurar que a convergência do sistema pré-condicionado é mais rápida do que o original. De forma

simplificada, a matriz de pré-condicionamento incita a uma maior rapidez da propagação de informação através do domínio computacional (Behrens, 2009).

Ferziger e Perić (2002) descrevem os métodos iterativos de resolução de sistemas de equações lineares em CFD. O OpenFOAM® emprega, por omissão, o método GAMG (*generalised geometric-algebraic multigrid*) na resolução da pressão e o método Gauss-Seidel, da categoria *smoothSolver*, na resolução das restantes propriedades. Não obstante, oferece outros métodos que podem ser consultados em Behrens (2009).

Métodos como Gauss-Seidel e Factorização Incompleta LU removem rapidamente os erros locais (de maior frequência), mas tendem a eliminar os erros globais a uma taxa inversamente proporcional ao refinamento da malha, o que os torna proibitivos em simulações com um elevado número de volumes de controlo finitos (Ferziger e Perić, 2002).

Os métodos *multigrid*, que incluem o GAMG, permitem realocar os erros globais, usando sucessivamente malhas mais grosseiras. Por conseguinte, estes métodos baseiam-se no princípio de que os erros globais, de menor frequência, existentes em malhas mais refinadas podem ser representados numa malha mais grosseira onde estão também acessíveis os erros locais, de maior frequência. Assim sendo, a propagação das correções globais dá-se com maior eficácia, em virtude de haver menor número global de células (Ferziger e Perić, 2002).

As etapas e os princípios do método GAMG realizados em OpenFOAM® podem ser consultadas no Anexo D.

3.6. CFD em Ventilação Natural

É mais comum encontrar investigações sobre ventilação cruzada com recurso à modelação numérica da dinâmica dos fluidos. Sobre a ventilação *single-sided*, as aplicações em CFD são mais escassas, em virtude de esta depender muito mais das oscilações das propriedades do escoamento do que dos seus valores médios. A caracterização completa das oscilações e a sua intervenção na ventilação obriga a uma discretização espacial e temporal muito elevada, requisitos, esses, apenas cumpríveis pela modelação de turbulência em LES. Ora, em aplicações correntes de projeto e design é impensável mobilizar tamanha capacidade de processamento para determinar caudais de ventilação, por exemplo. Nesse sentido, prevalecem os modelos de turbulência da família

RANS, mais expeditos, mas também mais comprometedores quanto à fiabilidade dos cálculos (Jiang e Chen, 2001).

De seguida, faz-se um apanhado de alguns estudos sobre ventilação *single-sided* e ventilação cruzada que, ou são complementados com a modelação numérica, ou fazem unicamente apreciação sobre a qualidade dos seus resultados. A Tabela 3.3 resume as condições dos estudos referidos ao longo do texto.

Papakonstantinou et al. (2000) avaliam a influência da colocação de persianas e da área de abertura nas distribuições da velocidade e da temperatura no interior do espaço ventilado e retiram uma boa correlação entre as medições experimentais da temperatura e os resultados provenientes do CFD.

Caciolo et al. (2012) comparam o desempenho dos modelos de turbulência LES e RANS nas simulações numéricas de ventilação *single-sided*, em termos da velocidade do ar, turbulência e temperatura na abertura e dos caudais de ventilação. Para o efeito, socorrem-se de medições experimentais realizadas num edifício real. Como se trata de ventilação *single-sided*, a entrada e saída de ar pela abertura ocorrem em simultâneo, pelo que Caciolo et al. (2012), à semelhança de outros autores, determinam o caudal de ventilação a partir da integração da média da componente normal da velocidade sobre a área da abertura, dividindo por dois, isto é:

$$Q = Q_{in} = Q_{out} = \frac{1}{2} \sum_c^{N_{cétulas\ na\ abertura}} |\bar{v}_c \cdot n_c| A_c \quad (3.29)$$

Este facto é de extrema importância, uma vez que será desenvolvida uma abordagem diferente em OpenFOAM®.

Caciolo et al. (2012) observam que o modelo RANS prevê melhor os perfis verticais da velocidade, intensidade de turbulência e temperatura na abertura, no caso em que a abertura se situa na fachada a sotavento. Por outro lado, o modelo LES tem melhor desempenho na determinação dessas mesmas propriedades quando a abertura se situa na fachada a barlavento, para um pequeno ângulo de incidência do vento. Já quando o ângulo de incidência aumenta, nenhum dos modelos consegue fazer previsões em conformidade com as observações experimentais. Quanto aos caudais de ventilação, é o modelo LES que demonstra melhores resultados e independência relativamente a fatores externos.

Também Ai e Mak (2014) e Wang et al. (2015) denotam a superioridade da modelação LES na previsão das diversas propriedades do escoamento em ventilação

single-sided. Bu e Kato (2011) e Wang e Chen (2012) acentuam ainda mais esse facto para o caso particular do cálculo de caudais de ventilação.

Bangalee et al. (2012) notam que a modelação numérica de ventilação cruzada providencia melhores aproximações da distribuição dos coeficientes de pressão sobre a superfície exterior do espaço ventilado e da velocidade no interior do espaço na ventilação cruzada, comparativamente à ventilação *single-sided*.

Caciolo et al. (2013) testam em CFD as correlações empíricas de Phaff et al. (1980) e Warren (1986) e observam que, quando a ventilação se dá pela fachada a barlavento, os caudais de ventilação obtidos em CFD e calculados pelas expressões empíricas são concordantes. Contudo, as trocas de ar na fachada a sotavento introduzem um desvio não negligenciável relativamente à previsão das correlações empíricas. Com isso, Caciolo et al. (2013) propõem uma nova correlação que se adapta melhor a essa condição adversa.

Peren et al. (2015) testam vários modelos de turbulência da família RANS (Tabela 3.3), no caso de ventilação cruzada. Os modelos $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ RNG são os mais concordantes com aos dados experimentais.

Tabela 3.3. Resumo do tipo de ventilação *single-sided* (VSS) ou cruzada (VC), dimensões do modelo e domínio computacional, número de elementos de malha, simplificações e modelo de turbulência usados nos estudos de ventilação natural em CFD.

Autores	VN	Dimensões do modelo/domínio	Malha	Modelação	Mod. de Turbulência
Papakonstantinou et al. (2000)	VSS	$2,76 \times 5,0 \times 2,75$ (m) s/ informação sobre domínio	44K	Incompressível, reg. permanente, c/ transmissão de calor	$k - \varepsilon$ standard
Caciolo et al. (2012)	VSS	$9,0 \times 9,0 \times 7,7$ (m) $16L \times 16W \times 6H$	1.2M	Incompressível, reg. permanente, c/ transmissão de calor	RSM
Bangalee et al. (2012)	VC VSS	$4,5 \times 4,5 \times 3,25$ (m) $9L \times 5W \times 3H$	1.82M	Incompressível, reg. permanente, isotérmico	$k - \varepsilon$ RNG
Caciolo et al. (2013)	VSS	$3,0 \times 3,5 \times 2,5$ (m) $48L \times 41W \times 18H$	1.2M	Incompressível, reg. permanente, c/ transmissão de calor	RSM
Bu e Kato (2011)	VSS	$200 \times 200 \times 300$ (mm) $15L \times 9L \times 5L$	0.72M	Incompressível, reg. permanente, isotérmico	$k - \varepsilon$ RNG

<i>Wang e Chen (2012)</i>	VSS	$2,4 \times 3,6 \times 3,3$ (m) $15L \times 8W \times 4H$	--	Incompressível, reg. permanente, isotérmico	--
---------------------------	-----	--	----	---	----

Stavrakakis et al. (2012) observam que o modelo $k - \varepsilon$ falha na previsão de uma zona secundária de estagnação a montante do edifício, no caso da ventilação cruzada.

Frank et al. (2007) fazem uma revisão dos cuidados a ter na modelação numérica de escoamentos em ambiente urbano, nomeadamente da escolha do modelo de turbulência, do domínio computacional, das condições de fronteira, da malha, dos critérios de convergência e dos esquemas numéricos de discretização. Ramponi e Blocken (2012) estudam o impacto que esses fatores exercem nos resultados das simulações numéricas da ventilação cruzada, tendo por base ensaios aerodinâmicos em túneis de vento. Essa informação pode ser consultada no Anexo E.

Frank et al. (2007) revelam a necessidade de impedir que ocorra entrada de ar nas fronteiras laterais, no topo e na saída. Quanto à condição de fronteira na saída, Frank et al. (2007) revelam que o gradiente nulo das propriedades de transporte e valor fixo da pressão estática podem comprometer a convergência do modelo numérico, se a saída não estiver suficientemente longe do modelo a testar, devido à existência de zonas de recirculação.

É comum encontrar malhas estruturadas não-uniformes na modelação numérica de ventilação natural, como as que estão visíveis na Figura 3.6.

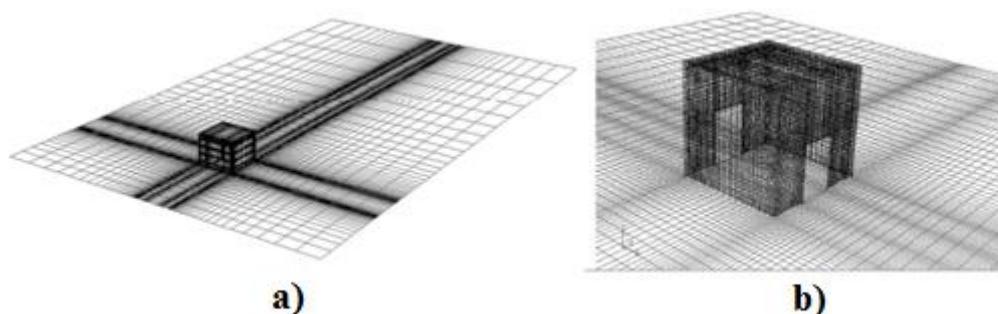


Figura 3.6. Malhas estruturadas não-uniformes, a) de Peren et al. (2015) e b) de Stavrakakis et a. (2012).

4. METODOLOGIA PARA VENTILAÇÃO NATURAL EM OPENFOAM®

O OpenFOAM® (*Open source Field Operation And Manipulation*) é uma ferramenta computacional, escrita em linguagem C++, destinada ao desenvolvimento de algoritmos personalizáveis, com funcionalidades de pré e pós processamento, capaz de solucionar numericamente problemas da mecânica de meios contínuos, com incidência muito especial na simulação dinâmica dos fluidos.

Como vantagens, destaca-se o princípio de distribuição livre e gratuita, em contraste com as avultadas licenças de utilização dos *softwares* comerciais, e a programação em código aberto que permite consultar e modificar todos os procedimentos que estão por detrás do seu funcionamento. A maior desvantagem é, contudo, a utilização pouco intuitiva, desde logo pela ausência de interface gráfica. As várias instruções e parâmetros estão distribuídos por vários dicionários, pelo que é necessário não só dominar o processo subjacente à modelação numérica da dinâmica dos fluidos, mas também identificar a informação contida nos vários dicionários e compreender o seu significado. Por fim, o guia de utilização não providencia informações detalhadas. Esta última desvantagem é contornada pela existência de uma comunidade científica muito ativa que questiona e fornece respostas em vários fóruns especializados.

Este capítulo tem como objetivo fazer um levantamento geral do funcionamento do OpenFOAM® e descrever a metodologia idealizada para a simulação da ventilação natural, nomeadamente para o cálculo de caudais de ventilação, aplicação, essa, nunca documentada em artigos científicos ou sítios da internet.

4.1. Estrutura, capacidades e organização do OpenFOAM®

O OpenFOAM® é executado preferencialmente nos sistemas operativos Linux. No presente caso, é usada a versão 2.3.1 de OpenFOAM® no sistema operativo Ubuntu.

A estrutura do OpenFOAM® baseia-se numa livreria composta por ficheiros que guardam informação sobre funções executáveis e outros que as implementam dentro de um procedimento expectável. De entre essas funções destacam-se as operações com campos de vetores e tensores, discretização de equações diferenciais, resolução de sistemas de equações lineares, resolução de equações diferenciais ordinárias, paralelização automática de algoritmos, malhas dinâmicas, modelos de turbulência e modelos termodinâmicos.

As funções anteriores abrem caminho para a execução de diversos algoritmos no contexto da simulação dinâmica dos fluidos. As capacidades do OpenFOAM® cobrem o espectro das simulações de escoamentos compressíveis e incompressíveis, em regime permanente e transiente, com transmissão de calor e isotérmicos, e modelação da turbulência do tipo RANS, LES e DNS, entre outras.

Não obstante, o OpenFOAM® oferece ferramentas para criação e refinamento de malhas, pré-processamento, funções e visualização no pós-processamento (através do ParaView) e a capacidade para simular em paralelo.

Do ponto de vista da utilização corrente, cada caso está organizado numa pasta que contém subdiretorias com finalidades diferentes. Nas subdiretorias é possível encontrar os parâmetros de entrada, os dicionários de controlo das simulações e as soluções aproximadas das propriedades do escoamento, tal como é ilustrado na Figura 4.1.

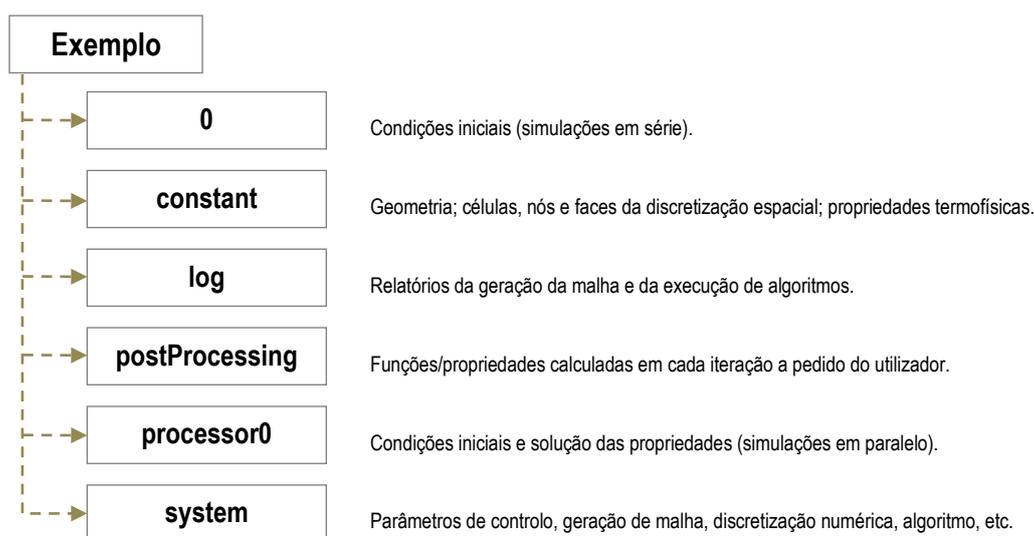


Figura 4.1. Organização de um caso em OpenFOAM®.

A subdiretoria a que deve ser dedicada maior atenção é a */system*. É lá que estão os dicionários que regulam a modelação numérica. A Tabela 4.1 resume os dicionários com importância para a modelação da ventilação natural.

Tabela 4.1. Dicionários contidos na subdiretoria */system* relevantes para a modelação de ventilação natural.

Dicionário	Parâmetros Regulados
<i>blockMeshDict</i>	Domínio computacional e malha base
<i>controlDict</i>	Nº de iterações/incremento temporal; início e fim da simulação; periodicidade da gravação da solução aproximada; funções de pós-processamento
<i>decomposeParDict</i>	Decomposição do domínio para processamento em paralelo
<i>fvOptions</i>	Fontes internas de calor.
<i>fvSchemes</i>	Esquemas numéricos de discretização
<i>fvSolution</i>	Método(s) para a resolução do sistema de equações do esquema numérico de discretização; critério de paragem; coeficientes de relaxação
<i>runDict</i>	Algoritmo
<i>sampleDict</i>	Interpolação das propriedades do escoamento em pontos e linhas do domínio, para a última iteração
<i>setFieldsDict</i>	Condições de fronteira não uniformes e/ou não constantes; condições de fronteira interior ao domínio.
<i>snappyHexMeshDict</i>	Refinamento volumétrico e superficial; controlo da qualidade da malha
<i>surfaceFeatureExtractDict</i>	Arestas do modelo geométrico onde a malha deve aderir
<i>topoSetDict</i>	Criação de uma superfície através do isolamento das faces contíguas de um conjunto de células

Cabe ao utilizador fazer as alterações necessárias nos vários dicionários contidos nas subdiretorias para, de seguida, dar instrução no terminal de comandos sobre aquilo que pretende fazer (Figura 4.2). Em alternativa, o utilizador pode optar por recorrer à ferramenta Helyx-OS que disponibiliza uma interface gráfica para o OpenFOAM® e que vem substituir grande parte das ações que deveriam ser feitas localmente nos dicionários e na linha de comandos (Figura 4.3).

```

almerindo@Almerindo-Lab: ~/areadetrabalho/CHU/chu_incompressivel/chu1b_cruz
oSet)
  in file sets/faceZoneSources/setsToFaceZone/setsToFaceZone.C at line 167
  One of owner or neighbour of internal face 3258365 should be in cellSet cLeft
  t to be able to determine orientation.
Face:3258365 own:1074214 OwnInCellSet:0 nei:1184337 NeiInCellSet:0
--> FOAM Warning :
  From function setsToFaceZone::applyToSet(const topoSetSource::setAction, topo
oSet)
  in file sets/faceZoneSources/setsToFaceZone/setsToFaceZone.C at line 167
  One of owner or neighbour of internal face 3465213 should be in cellSet cLeft
  t to be able to determine orientation.
Face:3465213 own:1138421 OwnInCellSet:0 nei:1267061 NeiInCellSet:0
--> FOAM Warning :
  From function setsToFaceZone::applyToSet(const topoSetSource::setAction, topo
oSet)
  in file sets/faceZoneSources/setsToFaceZone/setsToFaceZone.C at line 167
  One of owner or neighbour of internal face 3162111 should be in cellSet cLeft
  t to be able to determine orientation.
Face:3162111 own:1048116 OwnInCellSet:0 nei:1048117 NeiInCellSet:0
faceZoneSet leftExtrusionFaces now size 1024

End
almerindo@Almerindo-Lab:~/areadetrabalho/CHU/chu_incompressivel/chu1b_cruz$

```

Figura 4.2. Linha de comandos do sistema operativo Ubuntu.

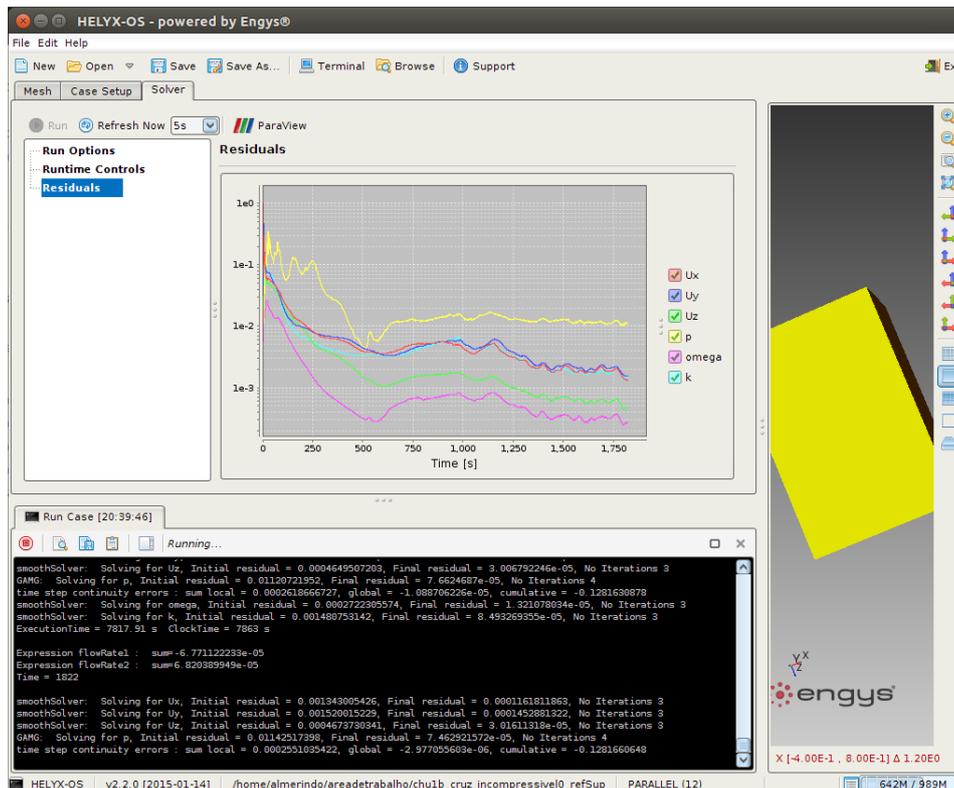


Figura 4.3. Interface gráfica Helyx-OS.

4.1.1. Malha base e refinamento

O OpenFOAM® permite importar geometrias em formato .STL que estabelecem as fronteiras sólidas existentes no domínio. A malha base é criada através da indicação das coordenadas do domínio que é posteriormente dividido em volumes de controlo finitos (hexaédricos por omissão) a que se dão o nome de células base. A Figura

4.4 exemplifica um caso de refinamento da célula base de nível 0 em níveis crescentes de refinamento. É possível realizar refinamento do tipo superficial ou volumétrico, se se pretender refinar uma superfície sólida ou um volume definido de células base, respetivamente (Figura 4.5).

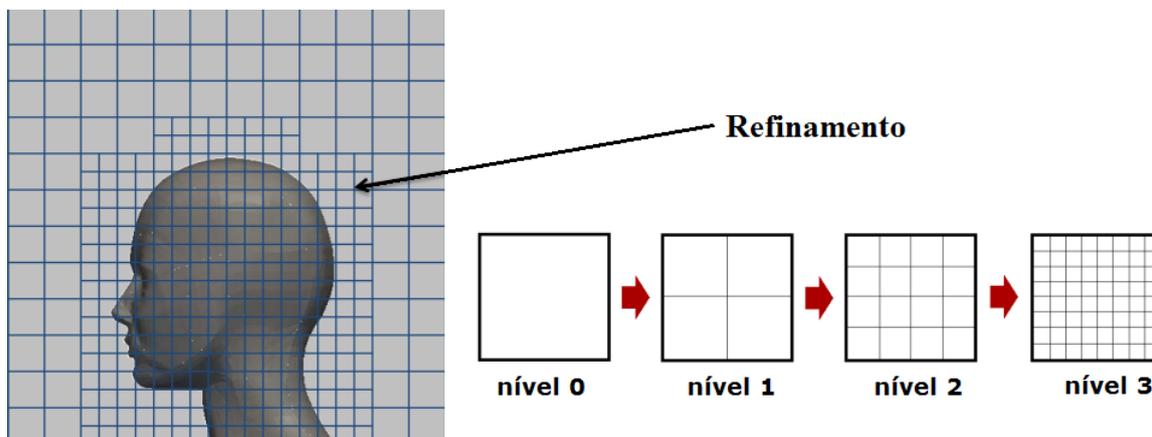


Figura 4.4. Refinamento por níveis no OpenFOAM®, adaptado de (Jackson, 2012).

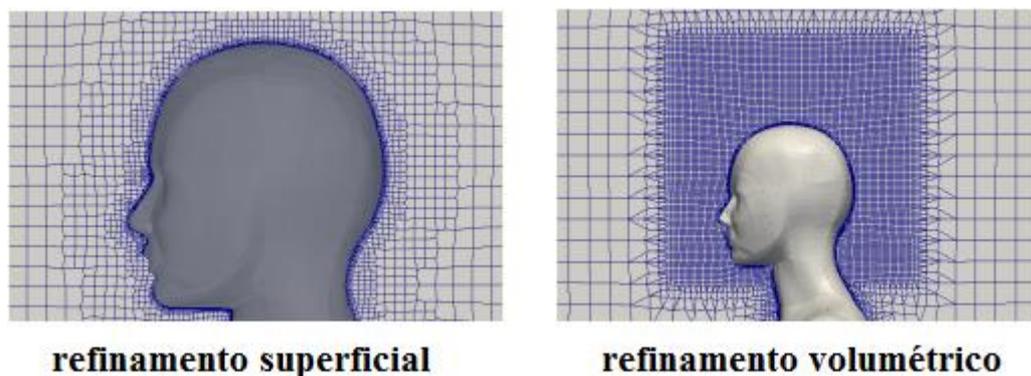


Figura 4.5. Exemplo de refinamento superficial e de refinamento volumétrico, adaptado de (Jackson, 2012).

4.2. Metodologia para ventilação natural

O procedimento em OpenFOAM® deve ser capaz de facultar as variáveis com interesse para a ventilação natural. Assim sendo, é imperioso dar resposta às seguintes questões:

- Como isolar o plano da abertura para aí determinar os caudais de ventilação?
- Como programar o cálculo dos caudais de ventilação nesse plano?

É nestas duas perguntas que reside a peculiaridade da metodologia para ventilação natural. Não é possível isolar um plano em OpenFOAM® de forma direta para aí

determinar os caudais de ventilação. Para além disso, ainda que esse esse plano fosse convenientemente isolado, só seria possível obter os caudais de ventilação se se programasse diretamente no código fonte do OpenFOAM®, algo que só está ao alcance dos utilizadores mais avançados.

A solução encontrada para a definição do plano de abertura foi a utilização do dicionário *topoSet* que tem, entre outras aplicações, a função de delimitar conjuntos de nós, faces e células através de geometrias conhecidas, que ficam compilados como *pointSets*, *faceSets* e *cellSets*, respetivamente. Neste caso, interessa isolar o conjunto de faces de células que compõe o plano na abertura. Para o efeito, devem cumprir-se os seguintes passos:

1. Delimitar as faces das células onde se pretende calcular os caudais de ventilação dentro de uma caixa fictícia o mais estreita possível, registando as coordenadas dessa caixa na fonte *boxToFace* (a verde na Figura 4.6).
2. Delimitar as células adjacentes às células que contêm as faces já isoladas, recorrendo também a uma caixa fictícia, registando as coordenadas dessa caixa na fonte *boxToCell* (a roxo na Figura 4.6).
3. Utilizar a fonte *setsToFaceZone* que irá separar a superfície criada em (1) das células delimitadas em (2), originando assim uma zona composta por faces de células – *faceZone* - de onde é possível retirar informação.

Este procedimento deve ter em conta dois aspetos. Em primeiro lugar, só se pode aplicar na região da abertura o refinamento volumétrico. Qualquer outro tipo de refinamento dificulta ou impede o isolamento da zona de faces, devido à distorção que ocorre junto das paredes. Em segundo lugar, as coordenadas das caixas fictícias devem ser observadas com auxílio da ferramenta de pós-processamento ParaView, através de um corte na zona da abertura, introduzindo um sistema de eixos conveniente para a observação.

Importa, assim, delinear a estratégia para o cálculo dos caudais de ventilação. Uma forma de contornar a necessidade de programar no código fonte passa por recorrer à biblioteca *swak4Foam* que é composta por expressões que envolvem os campos vetoriais e escalares das propriedades e que registam a sua evolução ao longo das iterações. É necessário instalar este utilitário, já que não faz parte do OpenFOAM®.

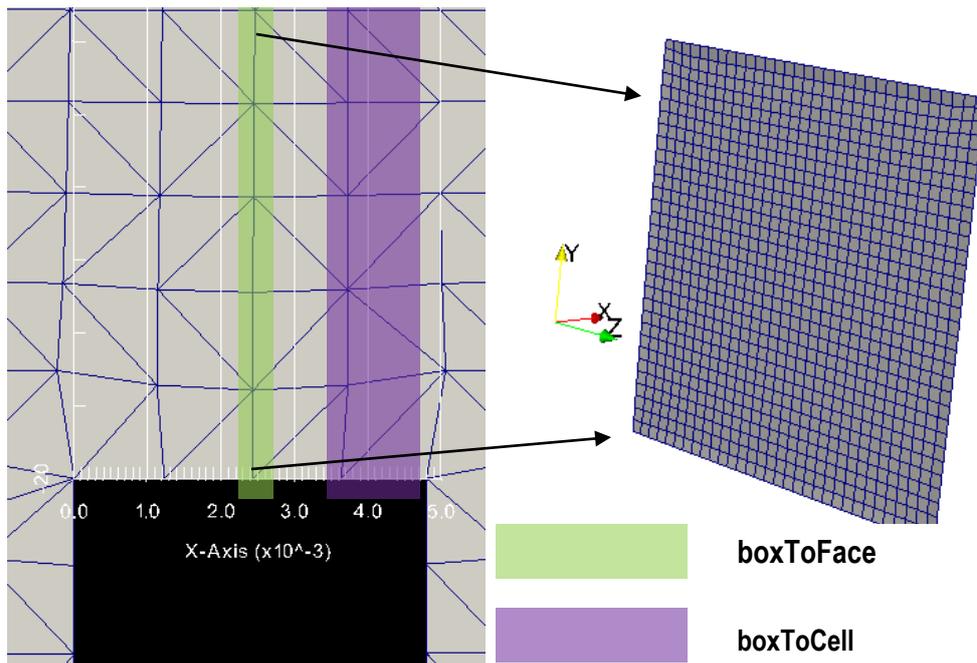


Figura 4.6. Isolamento das faces das células que compõem um plano na abertura.

As funções *swak4Foam* devem ser alojadas no dicionário *system/ControlDict*. Assim sendo, a expressão para o cálculo dos caudais de ventilação determina que, a cada iteração (*timeStep*), deve ser feito o cálculo do somatório (*sum*) do caudal *phi* que atravessa a *faceZone* denominada por *leftExtrusionFaces*:

```

functions
(
  flowRate1
  {
    type swakExpression;
    valueType faceZone;
    zoneName leftExtrusionFaces;
    verbose true;
    expression "(phi < 0) ? phi : 0";
    accumulations ( sum );
    outputControlMode timeStep;
  }
);

```

O código do termo *expression* foi modificado propositalmente para suprir uma conveniência da ventilação *single-sided*. Uma vez que na mesma abertura há entrada e saída de ar, existe também um caudal de ar positivo e um caudal de ar negativo em simultâneo. A forma da expressão $(\phi < 0) ? \phi : 0$ reflete uma condição lógica em linguagem C++, aplicadas em cada face destacada pelo dicionário *topoSet* que é traduzida

como “O caudal de ventilação é negativo? Se sim, soma o caudal; se não, a contribuição do caudal é nula”. Com isto, é possível estabelecer duas funções distintas para o cálculo do caudal de ventilação que entra e do caudal de ventilação que sai. Este procedimento representa um avanço face à estratégia apresentada por outros autores que calculam o caudal de ventilação dividindo por dois a média do caudal que atravessa o plano, tal como indicado na equação (3.29).

A Figura 4.7 esquematiza a metodologia em OpenFOAM® para o cálculo de caudais de ventilação. A amarelo são assinaladas as ações que podem ser realizadas na interface gráfica Helyx-OS, a azul são apontados os passos apenas realizáveis na linha de comandos.

Os caudais de ventilação ficam armazenados na subdiretoria *postProcessing/swakExpression*.

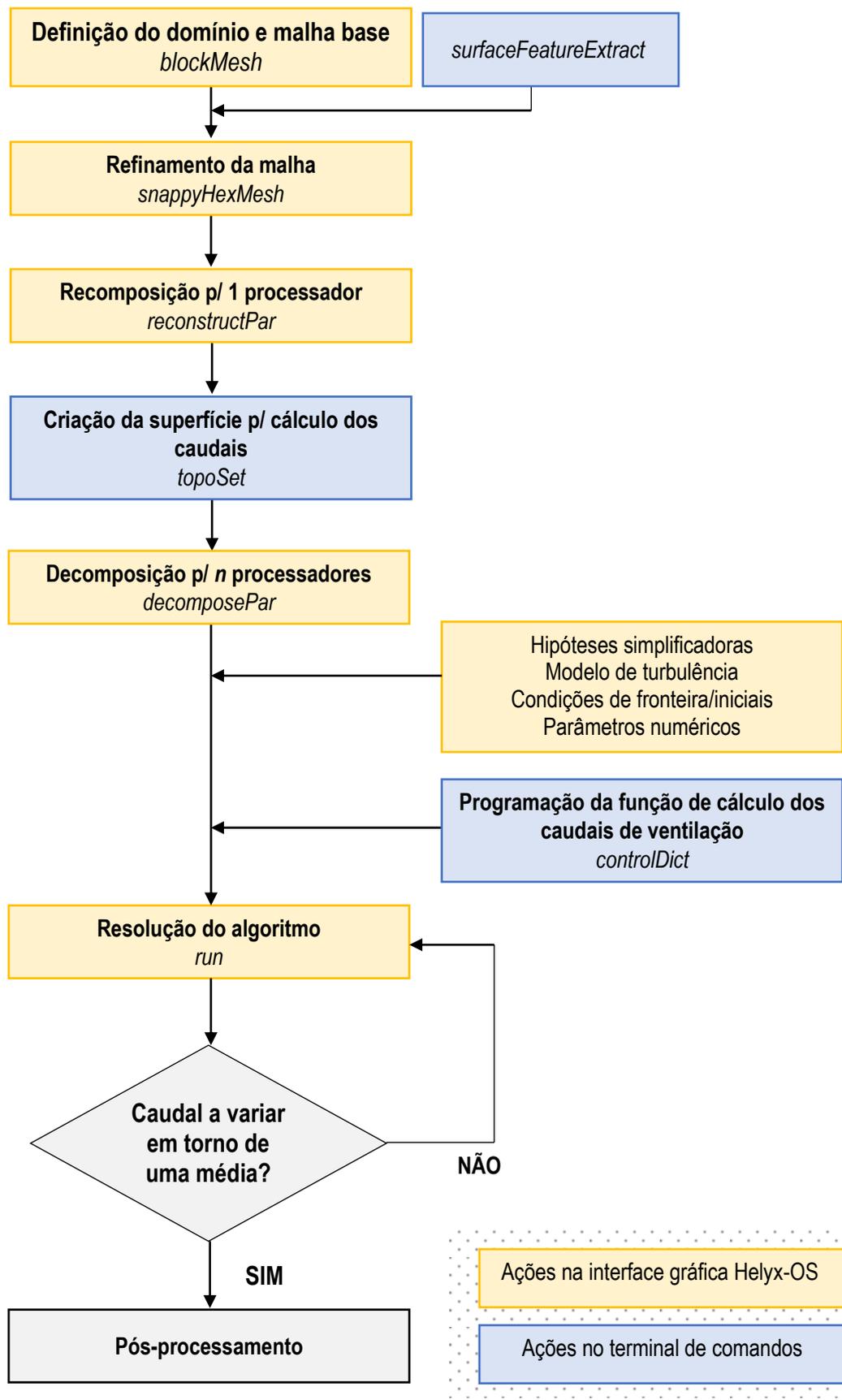


Figura 4.7. Diagrama do método para o cálculo dos caudais de ventilação em OpenFOAM®.

5. CASOS DE ESTUDO

O desempenho do OpenFOAM® nos estudos de ventilação natural é avaliado a partir da replicação numérica de ensaios experimentais com a posterior validação dos resultados. Com efeito, foram selecionados três estudos experimentais sobre ventilação natural sob a ação do vento (*wind-driven*) que ensaiaram modelos à escala e protótipos em túneis de vento, com o propósito de aferir a influência de alguns parâmetros nos caudais de ventilação (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Resumo dos estudos experimentais objeto de modelação numérica no presente trabalho.

Autores	Tipo de Ventilação	Dimensão relativa	Parâmetros
<i>Kato et al. (2006)</i>	<i>Single-sided</i>	Modelo à escala	Área da abertura Existência de alhetas fixas na abertura (posição relativa e profundidade)
<i>Chu et al. (2011)</i>	<i>Single-sided</i>	Modelo à escala	Velocidade de aproximação Ângulo de incidência Área da abertura.
<i>Larsen (2006)</i>	<i>Single-sided</i>	Protótipo	Velocidade de aproximação

Este capítulo descreve as condições experimentais dos estudos supra referidos, os procedimentos que antecederam as simulações numéricas, o conjunto de testes conduzidos em OpenFOAM® e a discussão dos resultados numéricos obtidos.

5.1. Caso de Kato et al. (2006)

Kato et al. (2006) montam uma placa horizontal para o desenvolvimento da camada limite, à mesma altura da abertura do modelo a testar, num túnel de vento. O modelo da cavidade é cúbico, tem dimensões internas de $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}$ e espessura das paredes de 2 mm . O esquema de montagem apresenta-se na Figura 5.1. A abertura simples, centrada na face superior do modelo, tem a forma de um quadrado. A velocidade de aproximação é $1,41 \text{ m/s}$, tal como ilustra a Figura 5.2.

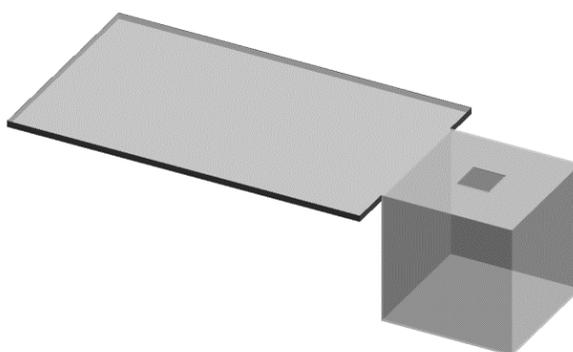


Figura 5.1. Montagem experimental de Kato et al. (2006)

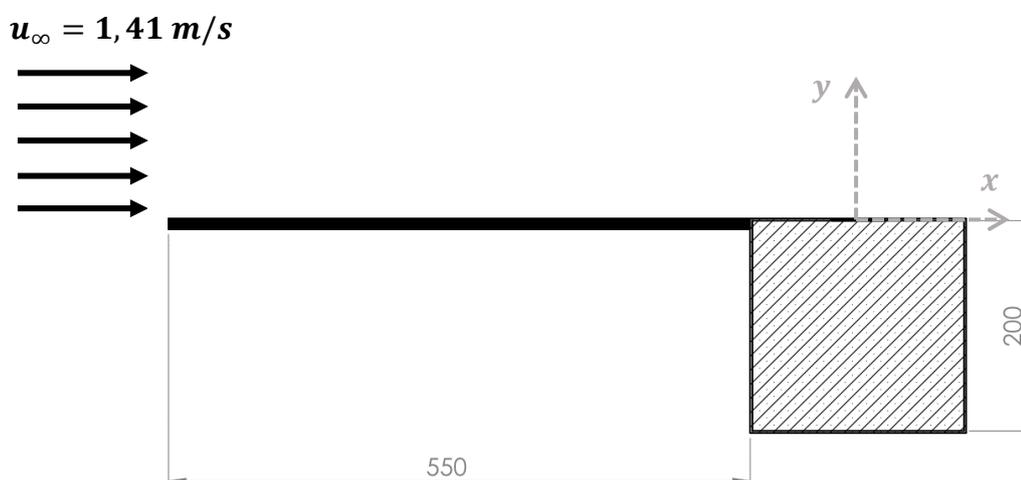


Figura 5.2. Dimensões da placa e do modelo cúbico em milímetros, de Kato et al. (2006).

Kato et al. (2006) determinaram que a intensidade de turbulência do escoamento potencial é $2,8 \%$. O número de Reynolds, para uma dimensão característica igual à dimensão da abertura, equivale a 4700.

Os ensaios experimentais fizeram variar o número e a dimensão das aberturas e, em alguns casos, incluem uma alheta fixa na abertura, disposta de várias formas, conforme retrata a Figura 5.3.

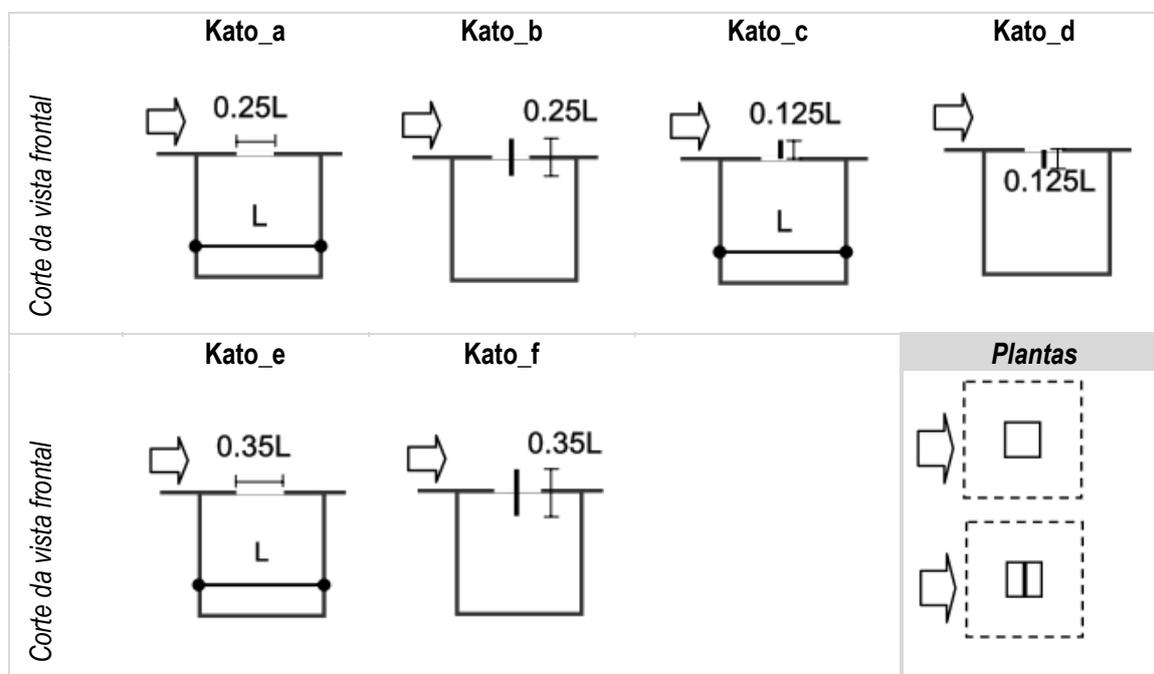


Figura 5.3. Vistas frontais e plantas dos modelos experimentais de Kato et al.(2006) com $L = 0,2$ m.

5.1.1. Domínio computacional

De acordo com a descrição experimental, a extensão do domínio computacional consagra duas zonas distintas, o modelo cúbico em si, que corresponde ao espaço ventilado, e a zona superior a este, delimitada por uma placa horizontal onde o ar é escoado. Neste contexto, sabe-se que a distância entre o bocal do túnel de vento e o centro da abertura é $0,65$ m e também que a uma distância de $0,2$ m do centro da abertura, medida na vertical, o escoamento é livre, logo $H = 0,2$ m na Figura 5.4. Resta determinar o comprimento a jusante da abertura, L , e a largura, W , da zona superior do domínio, de modo a evitar zonas de recirculação nas fronteiras do domínio de cálculo.

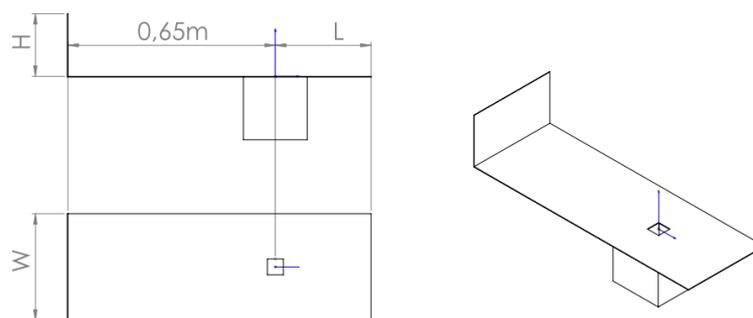


Figura 5.4. Dimensões características do domínio de Kato et al. (2006).

São conduzidos testes no caso Kato_a que fazem variar as dimensões do domínio com o objectivo de avaliar o impacto destas na convergência e no cálculo dos caudais de ventilação, para a mesma malha e refinamento.

A Tabela 5.2 resume os testes efetuados e os critérios de seleção do domínio, tais como o erro do cálculo do caudal de ar que entra e sai do modelo cúbico, Q^+ e Q^- , respetivamente, e o resíduo da equação da pressão na última iteração efetuada. Sobre o cálculo dos caudais, verifica-se uma relativa estabilidade do erro de medição, num intervalo entre 44 e 52%, mas simultaneamente um desvio muito elevado de Q^- relativamente ao caudal experimental, no domínio 1). A diferença entre o domínio 2) e o domínio 3) revela-se no resíduo final da equação da pressão. Enquanto no domínio 2) há convergência e a equação da continuidade é plenamente satisfeita (resíduo da equação da pressão inferior a 0,0001), no domínio 3) a convergência só é assegurada pela estabilidade das propriedades ao longo das iterações, mantendo-se com resíduos relativamente altos. Por este motivo, o domínio preferido é o domínio 2).

Tabela 5.2. Teste sobre influência das dimensões do domínio na qualidade e convergência dos resultados em Kato et al. (2006).

Domínio	L (m)	W (m)	Erro médio de Q^+ (%)	Erro médio de Q^- (%)	Resíduo p
1)	0,10	0,20	48	98	0,27
2)	0,30	0,34	52	48	<i>Convergiu</i>
3)	0,65	0,34	44	52	0,26

5.1.2. Malha e refinamento

Os estudos de ventilação natural em CFD usam, na maioria das vezes, malhas estruturadas não uniformes como as que são apresentadas na Figura 3.6. O OpenFOAM® possibilita a construção deste tipo de malhas através do dicionário *blockMeshDict* mediante a declaração de vários blocos e da razão de expansão para cada um deles. Este procedimento é, contudo, muito exigente e moroso, inviabilizando a abordagem expedita que se espera do cálculo dos caudais de ventilação. Assim, a alternativa consiste em criar uma malha base uniforme e refinar o volume que circunda a abertura. Adicionalmente, podem refinar-se as superfícies sólidas e outros volumes do domínio onde se registam importantes gradientes de pressão e velocidade.

A necessidade de refinar o volume que circunda a abertura está associada à metodologia criada para a medição dos caudais de ventilação. Essa prevê que sejam isoladas as faces das células contíguas num plano que contém a abertura. Para isso, é pertinente refinar o mais possível a zona da abertura de forma uniforme, ou como o OpenFOAM® classifica, *mode inside - volumetric refinement*.

Esta metodologia para a geração da malha tem, contudo, um problema. Existirão sempre razões elevadas de alongamento/compressão da malha na fronteira desses refinamentos volumétricos, o que pode afetar a convergência de alguma forma.

Ainda como nota final, o modelo de turbulência adotado, $k - \omega$ SST, fornece funções de parede de tratamento automático (Secção 3.2.2) que só exigem que $y^+ \leq 300$, ou seja, os nós mais próximos das superfícies sólidas podem pertencer tanto à subcamada viscosa como à região logarítmica.

A escolha e validação da malha e do refinamento tem como ponto de partida o domínio selecionado na secção anterior e é exemplarmente apresentada para o caso Kato_a. A Figura 5.5 desvenda a configuração das quatro malhas testadas. Quanto maior for a densidade do azul, maior é a densidade do refinamento nessa área. A Tabela 5.3 resume as características das correntes malhas, quer ao nível do nível de refinamento, quer ao nível do número de células.

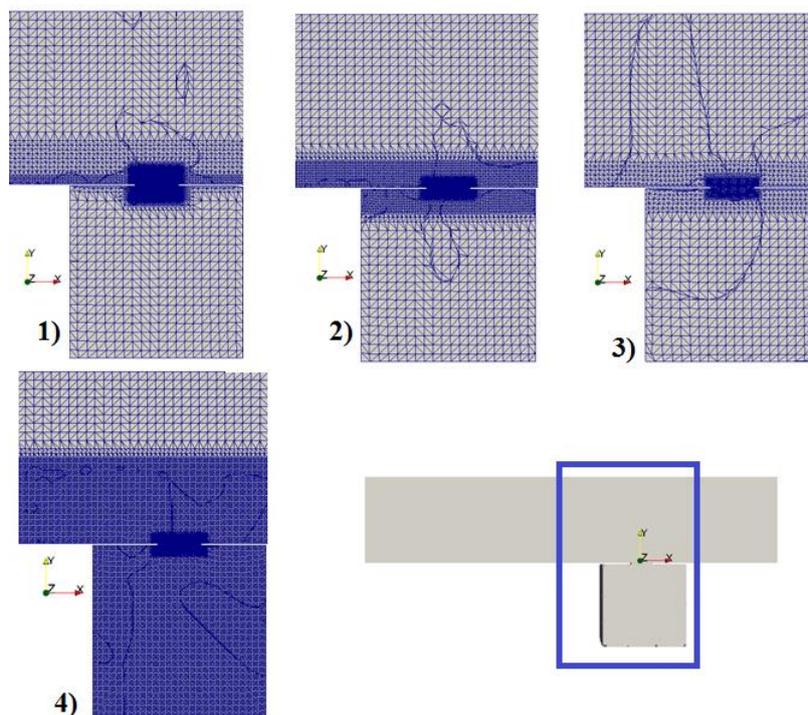


Figura 5.5. Refinamentos volumétricos no teste de independência de malha para o caso Kato_a.

Os resultados obtidos segundo o critério do erro associado ao cálculo dos caudais de ventilação e da convergência seguem na Tabela 5.4. A única simulação que converge acontece para a malha 4), onde o resíduo da equação da pressão é inferior a 0,0001. Não obstante, as restantes malhas apresentam valores finais dos resíduos da equação da pressão muito aceitáveis. Não há diferenças vinculativas sobre o erro do cálculo dos caudais entre a malha 1), 2) e 4). No entanto, a malha 3) destaca-se pela negativa neste aspeto. Adicionalmente, na malha 3), a solução estabiliza, mas com grandes oscilações em torno de uma média. A gênese deste problema está no facto de a malha 3) ser a mais grosseira de todas, com menor número de células e níveis de refinamento mais baixos. Por último, para todas as malhas verifica-se que $y^+ < 300$, logo não há necessidade de refinar localmente. A malha 4) é a que mostra melhor desempenho e, por isso, será adotada para na modelação numérica dos casos seguintes.

Tabela 5.3. Informações sobre a malha base, os níveis de refinamento volumétrico e o número de células para cada malha testada no caso Kato_a.

Malha base	<i>Hexaedros regulares com 1 cm de lado</i>			
Refinamento	<i>Volumétrico</i>			
	Malha 1)	Malha 2)	Malha 3)	Malha 4)
Níveis de refinamento 1 = 0,5 cm 2 = 0,25 cm 3 = 0,125 cm 4 = 0,0625 cm	4	4		4
			3	
	2	2		2
	1		1	
Número de células	801532	773936	140850	1916278

Tabela 5.4. Resultados do teste de independência de malha para o caso Kato_a.

Malha	Erro médio de Q^+ (%)	Erro médio de Q^- (%)	Resíduo p	Convergência (iteração)	y^+ max
1)	52	48	$1,65 \times 10^{-5}$	1500	31,3
2)	51	47	$3,70 \times 10^{-4}$	1500	31,6
3)	67	67	$6,13 \times 10^{-4}$	1500	29,2
4)	51	47	<i>Convergiu</i>	5700	31,3

5.1.3. Condições iniciais e de fronteira

O túnel de vento é aberto, pelo que as únicas fronteiras sólidas a considerar são a placa horizontal sobre a qual escoamento se desenvolve e as paredes do modelo cúbico. As restantes fronteiras dizem respeito aos limites do domínio que se encontra acima da placa horizontal e estão divididas pela entrada, saída, laterais e superior. As condições de fronteiras encontram-se registadas na Tabela 5.5 e na Tabela 5.6 com a terminologia original do OpenFOAM®.

Tabela 5.5. Condições de fronteira da entrada, saída, superior e laterais na modelação numérica de Kato et al.(2006).

	Entrada	Saída	Superior	Laterais
Tipo de fronteira	<i>Patch</i>			
$V (U)$	<i>fixedValue</i> <i>uniform (1,41 0 0)</i>		<i>inletOutlet</i> <i>inletValue (0 0 0)</i>	
p	<i>zeroGradient</i>		<i>fixedValue</i> <i>uniform 0</i>	
k	<i>turbulentIntensityKineticEnergyInlet</i> <i>intensity 0,028</i>		<i>zeroGradient</i>	
ω (<i>omega</i>)	<i>turbulentMixingLengthFrequencyInlet</i> <i>mixingLength 0,01</i>		<i>zeroGradient</i>	
μ_t (<i>nut</i>)	<i>zeroGradient</i>		<i>zeroGradient</i>	

Tabela 5.6. Condições de fronteira das superfícies sólidas de Kato et al.(2006).

	Placa horizontal + paredes do modelo cúbico
Tipo de fronteira	<i>Wall</i>
$V (U)$	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
p	<i>zeroGradient</i>
k	<i>kqRWallFunction</i>
ω (<i>omega</i>)	<i>omegaWallFunction</i>
μ_t (<i>nut</i>)	<i>nutUSpaldingWallFunction</i>

A condição *fixedValue* refere-se a um valor fixo prescrito na fronteira que tanto pode ser um vetor, no caso da velocidade, como um escalar, no caso da pressão. A condição *zeroGradient* alude a um gradiente nulo da propriedade segundo a normal à fronteira. A condição *inletOutlet* funciona como gradiente nulo quando o escoamento sai do domínio e como um valor fixo quando o escoamento entra no domínio. Neste caso, assume-se que esse valor fixo é o vetor (0 0 0), pelo que qualquer entrada de fluido no domínio que se dê pelas fronteiras de saída, laterais e superior é igualada a zero pelo algoritmo. Esta condição é extremamente vantajosa, já que elimina a necessidade de utilizar a condição de simetria responsável pela criação de fortes gradientes de velocidade nos domínios que replicam as condições experimentais de túneis de vento. É um fator de

diferenciação relativamente a todos os estudos sobre ventilação natural em CFD. Na entrada, é utilizada a intensidade de turbulência para definição de k (de acordo com ensaio experimental) e o comprimento de mistura para ω (valor por omissão).

Sobre as condições de fronteira nas superfícies sólidas, sobressaem as funções de parede de k e ω cuja formulação já foi referida na Secção 3.2.2. Para μ_t é usada uma função de parede que obedece à lei da parede de Spalding (NEXT foam, 2014).

Usam-se as condições iniciais que estão atribuídas por omissão às várias propriedades. Os campos internos de V , p , k , ω e μ_t assumem os valores iniciais e uniformes (0 0 0); 0; 0,1; 0,1 e 0,001, respetivamente.

5.1.4. Algoritmo e esquemas numéricos de discretização

A ventilação em Kato et al. (2006) é modelada como um escoamento incompressível, em regime permanente e isotérmico. À luz destas considerações o algoritmo selecionado é o SIMPLE, o esquema de discretização numérica do operador gradiente é o *Gauss Linear 1* e o esquema para o operador divergente é o *linearUpwind* (esquema upwind de 2ª ordem), para todas as propriedades. Na resolução dos sistemas de equações, utiliza-se o método GAMG para o sistema da pressão e o método de Gauss-Seidel para as restantes propriedades. O coeficiente de relaxação é 0,3 para a pressão e 0,7 para as restantes propriedades.

5.1.5. Resultados e discussão

As modelações numéricas de todos os casos experimentais de Kato et al. (2006) seguem as estratégias documentadas nas secções anteriores, apenas com uma ligeira diferença quanto à malha utilizada. Os casos Kato_a, Kato_b, Kato_c e Kato_d são simulados com a malha selecionada na Secção 5.1.2 (Malha A). Contudo, devido à maior exposição da área de abertura e dimensão da obstrução nos casos Kato_e e Kato_f e consequente aumento do número de células do refinamento volumétrico, essa malha é reestruturada nas fronteiras laterais e superior com o intuito de aí diminuir o refinamento, compensando o acréscimo de células na zona da abertura. A essa nova discretização dá-se o nome de malha B que é simultaneamente usada em todos os casos.

Os resultados da modelação numérica para a malha A e para a malha B estão descritos na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8, em termos da comparação do caudal de ventilação

medido no ensaio experimental em renovações de ar por hora (rph) com o caudal de ventilação médio que entra e sai do modelo cúbico, Q^+ e Q^- , bem como o erro associado.

Tabela 5.7. Resultados da modelação numérica de Kato_a, Kato_b, Kato_c e Kato_d para a malha A.

	Q_{real} [rph]	Q^+ [rph]	Q^- [rph]	Erro (+) (%)	Erro (-) (%)
<i>Kato_a</i>	4,76	2,12	2,14	-55	-55
<i>Kato_b</i>	56,79	55,36	51,39	-3	-10
<i>Kato_c</i>	20,30	41,63	38,49	+105	+90
<i>Kato_d</i>	4,12	4,94	5,16	+20	+25

Tabela 5.8. Resultados da modelação numérica de Kato_a, Kato_b, Kato_c, Kato_d, Kato_e e Kato_f para a malha B.

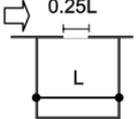
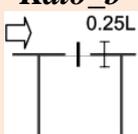
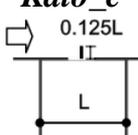
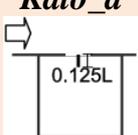
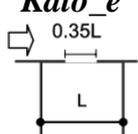
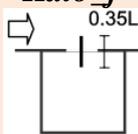
	Q_{real} [rph]	Q^+ [rph]	Q^- [rph]	Erro (+) (%)	Erro (-) (%)
<i>Kato_a</i>	4,76	1,89	2,16	-60	-55
<i>Kato_b</i>	56,79	53,42	53,50	-6	-6
<i>Kato_c</i>	20,30	36,61	43,49	+80	+114
<i>Kato_d</i>	4,12	5,22	4,94	+27	+20
<i>Kato_e</i>	12,44	4,87	3,13	-61	-75
<i>Kato_f</i>	121,87	101,53	112,71	-17	-8

Tabela 5.9 detalha o resíduo final da equação da pressão, o y^+ máximo verificado, o número da iteração para o qual se dá a convergência, o número de células da discretização espacial e o erro médio associado aos resultados numéricos.

Numa primeira análise dos resultados, pode dizer-se que as malhas selecionadas não têm impacto significativo nos resultados de Kato_a, Kato_b, Kato_c e Kato_d, o que valida a utilização da malha B, mais grosseira nas fronteiras do domínio, em todos os casos em estudo. Apenas os casos Kato_b, Kato_d e Kato_f, que têm elementos obstrutivos na abertura que estimulam o redireccionamento do ar exterior para o interior do espaço, apresentam caudais de ventilação em concordância com os resultados experimentais. Todos os outros revelam erros consideráveis.

Na convergência, nota-se uma relação de causalidade entre os níveis de refinamento da malha e o resíduo final da equação da pressão, nos casos Kato_a, Kato_b e Kato_c. A um menor nível de refinamento nas fronteiras e, conseqüentemente, a um menor número de células, associa-se um maior cumprimento da equação da continuidade. No entanto, este benefício não se traduz num ganho de qualidade dos resultados numéricos. Todas as simulações respeitam a condição $y^+ \leq 300$.

Tabela 5.9. Resíduo final da pressão, y^+ máximo, número de iterações para a convergência e número de células das simulações numéricas para as malha A e B.

	Malha	Resíduo p	y^+ max	Convergência	Nº de células	Erro médio (%)
Kato_a 	A	1,7E-3	18,1	2000	1.4M	55,0
	B	9,9E-6	31,3	2000	1.2M	57,5
Kato_b 	A	2,0E-2	18,1	2500	1.5M	6,5
	B	2,6E-2	31,3	2000	1.2M	6,0
Kato_c 	A	1,3E-2	18,1	2000	1.5M	97,5
	B	6,3E-3	31,3	3000	1.0M	97,0
Kato_d 	A	[8,0E-3 – 2,2E-2]	18,1	4000	1.5M	22,5
	B	[8,0E-3 – 2,2E-2]	31,2	3500	1.0M	23,5
Kato_e 	B	2,2E-4	31,2	2100	1.9M	68,0
Kato_f 	B	1,1E-2	31,2	2500	2.5M	12,5

A Figura 5.6 mostra a evolução de $Q_{OpenFOAM}/Q_{experimental}$ ao longo das iterações para a malha B. A parte superior do gráfico diz respeito aos caudais de ventilação positivos e a parte inferior aos caudais negativos. A simulação de Kato_d verifica grande oscilação da solução, já em fase convergente, o que é atestado pelo largo intervalo de resíduos da equação da pressão e pela evolução de $Q_{OpenFOAM}/Q_{experimental}$ na Figura 5.6. Todos os outros casos são consistentes na convergência, isto é, as propriedades mantêm-se constantes ao longo das iterações.

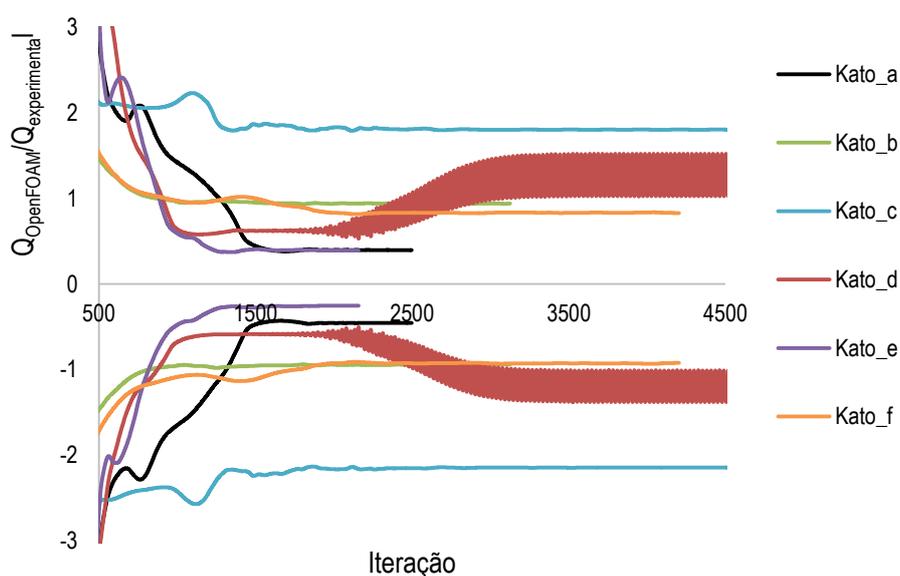


Figura 5.6. Evolução da razão entre os caudais de ventilação calculados pelo OpenFOAM, $Q_{OpenFOAM}$, e o caudal de ventilação experimental, $Q_{experimental}$, ao longo das iterações (malha B).

Os caudais de ventilação determinados em OpenFOAM® não são consistentes com os resultados experimentais para os casos em que a abertura não tem elemento obstrutivo e em que, a haver esse elemento, ele está confinado ao interior do modelo cúbico. Para melhor entender a origem deste erro, analisam-se de seguida as linhas de corrente nas proximidades da abertura.

A Figura 5.7 e a Figura 5.8 ilustram as linhas de corrente do escoamento perto da abertura, nos planos que a delimitam superior e inferiormente, para o caso Kato_a. No plano superior à abertura, onde se desenvolve o escoamento exterior, não se regista nenhum desvio significativo da trajetória do fluido, a não ser nos vértices da abertura a jusante do modelo. O mesmo se passa no plano que delimita inferiormente a abertura. De facto, é notório que o ar contido na abertura adquire a velocidade do escoamento exterior

pela condição de não-escorregamento. Esse movimento é comunicado às camadas de fluido mais interiores da abertura, cada uma arrastando a que lhe é imediatamente adjacente. Neste sentido, pode afirmar-se, com alguma segurança, que a modelação numérica da ventilação *single-sided*, resultante de um escoamento uniforme sobre o plano com uma abertura simples, prevê a ventilação como o resultado das tensões tangenciais que atuam entre o escoamento exterior e o ar contido na abertura com conseqüente indução da circulação do ar interior. Assim, os caudais de ventilação determinados numericamente não reproduzem a entrada e saída de ar novo no espaço, esse sim indicativo dos caudais de ventilação experimentais. As faces das células onde o OpenFOAM® calcula os caudais positivo e negativo registam a passagem das mesmas linhas de corrente, o que compromete a qualidade da informação extraída.

Observação semelhante é feita para o caso Kato_d, cujas linhas de corrente nas proximidades da abertura são visíveis na Figura 5.9 e na Figura 5.10. O plano mais inferior da abertura contém linhas de corrente que correspondem ao arrastamento do fluido na abertura pelo escoamento exterior. No entanto, é mais notória a entrada de ar novo na Figura 5.9 onde as linhas de corrente penetram no interior do modelo cúbico.

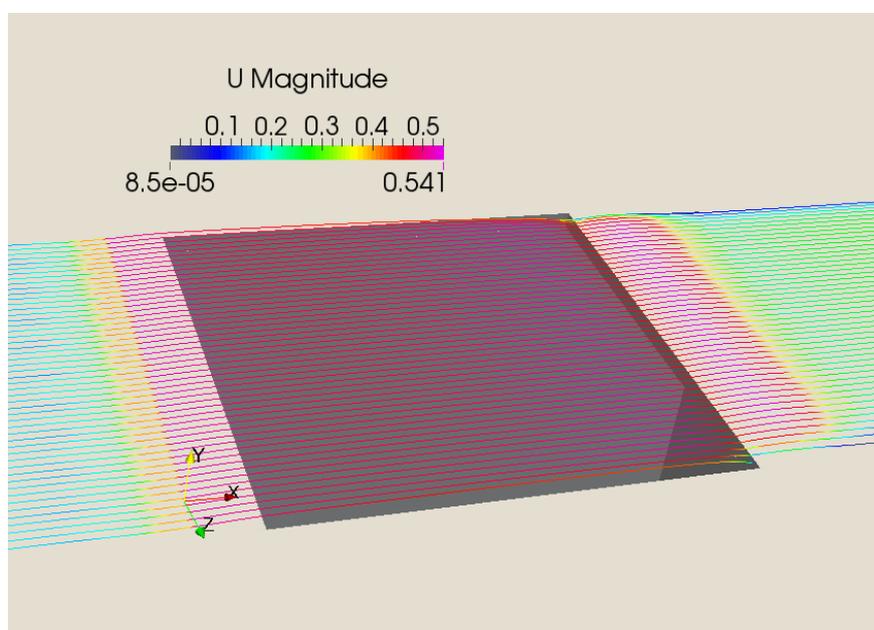


Figura 5.7. Linhas de corrente no plano imediatamente superior à abertura ($y = 0,001$ mm) em Kato_a.

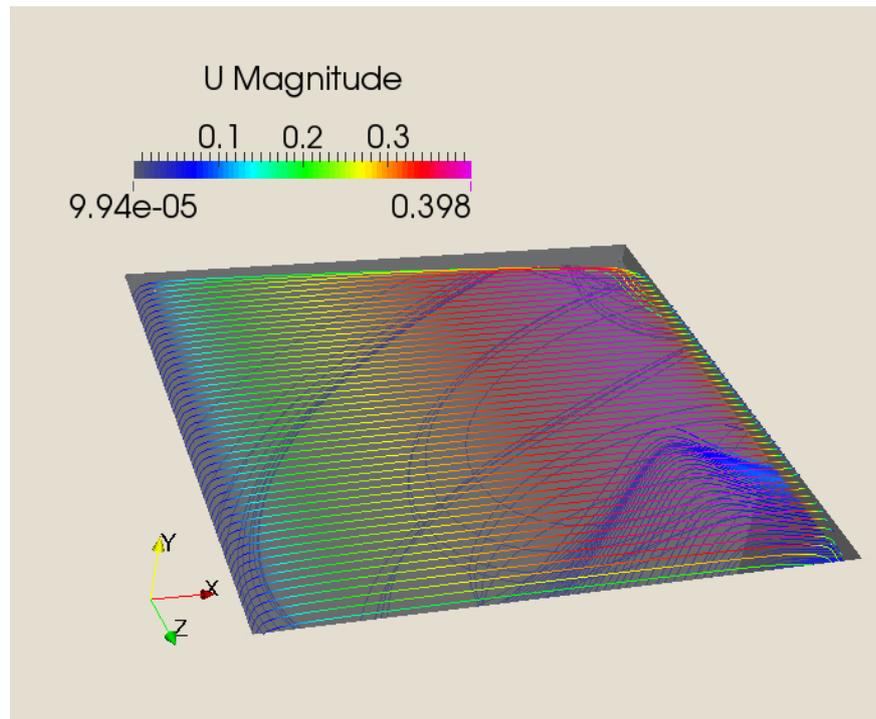


Figura 5.8. Linhas de corrente no plano imediatamente inferior à abertura ($y = -0,002$ mm) em Kato_a.

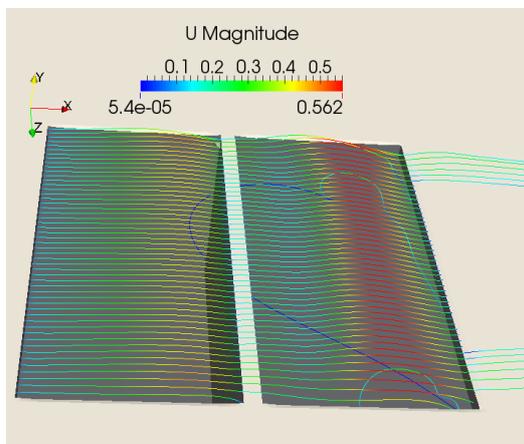


Figura 5.9. Linhas de corrente no plano imediatamente superior à abertura ($y = 0,001$ mm) em Kato_d.

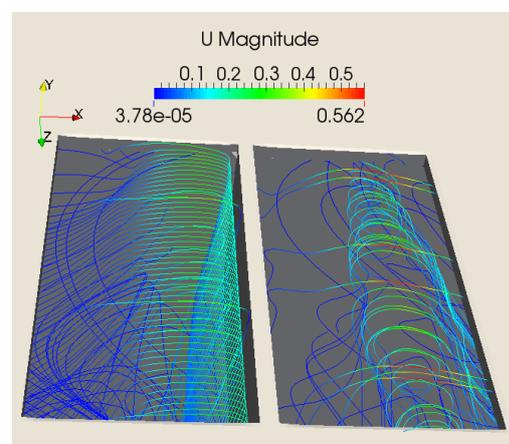


Figura 5.10. Linhas de corrente no plano imediatamente inferior à abertura ($y = -0,002$ mm) em Kato_d.

A Figura 5.11 mostra as linhas de corrente do escoamento que é direcionado para o interior do espaço ventilado em Kato_c. De facto, o caudal de ventilação determinado pelo OpenFOAM® é largamente sobredimensionado com um erro médio de 97%. O valor em excesso do caudal determinado numericamente deve-se ao fenómeno ilustrado na Figura 5.11. Parte do escoamento que atravessa a abertura e contribui para o caudal de entrada, Q^+ , é logo extraído e registado como caudal de saída, Q^- , sem sequer se

misturar com o ar contido no interior do modelo, não contribuindo assim para a ventilação do espaço.

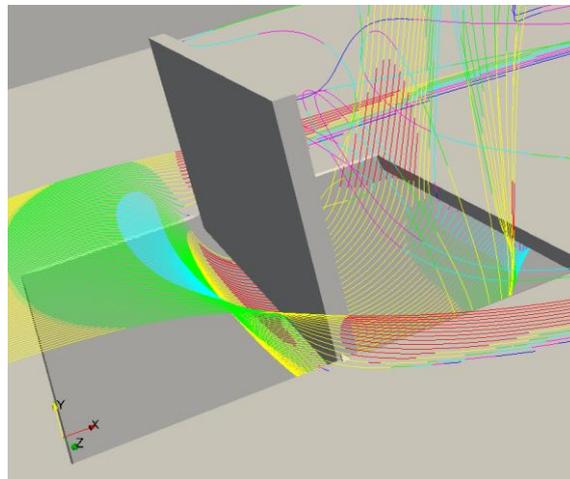


Figura 5.11. Linhas de corrente na abertura em Kato_c.

O campo de velocidades dos casos Kato_b e Kato_f onde se registam as melhores previsões dos caudais de ventilação observam-se na Figura 5.12 e na Figura 5.13.

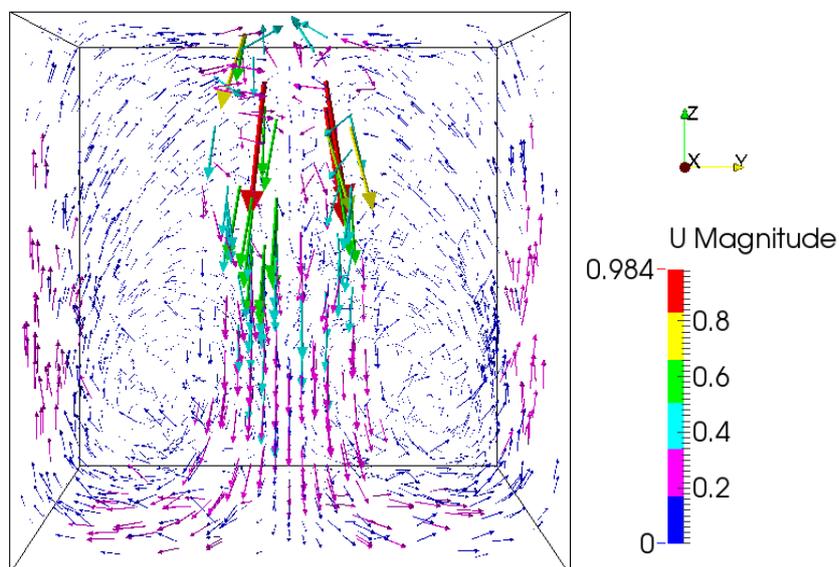


Figura 5.12. Campo de velocidades tridimensional no modelo cúbico ventilado em Kato_b.

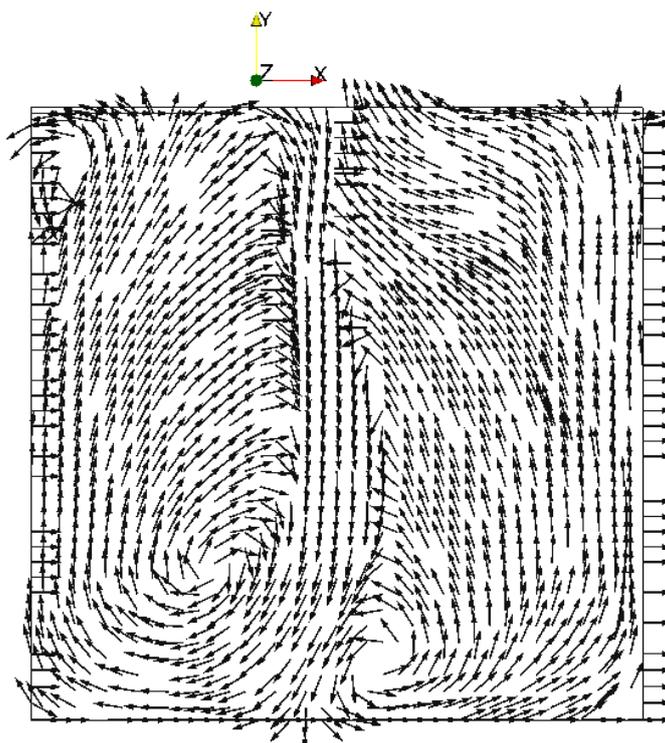


Figura 5.13. Campo de velocidades bidimensional no plano xOy do modelo cúbico em Kato_f.

Relativamente à distribuição da velocidade nas fronteiras do domínio, os casos Kato_a, Kato_d e Kato_e apresentam uma distribuição uniforme da velocidade, indicativa de inexistência de zonas de recirculação, conforme se pode ver na Figura 5.14. No entanto, o mesmo não se pode dizer dos casos Kato_b, Kato_e e Kato_f que evidenciam variações da velocidade nas fronteiras do domínio, tal como mostra a Figura 5.15. Esta última inconformidade é menos nociva para a simulação do que poderia ser noutro *software*, isto porque a aplicação da condição de fronteira *inletOutlet* impede a entrada de escoamento nas fronteiras do domínio. O algoritmo, ao conjurar a entrada de escoamento nas fronteiras, reduz imediatamente o valor da velocidade nos volumes de controlo afetados a zero. Aqui reside a grande vantagem face à tradicional condição de fronteira de gradiente nulo.

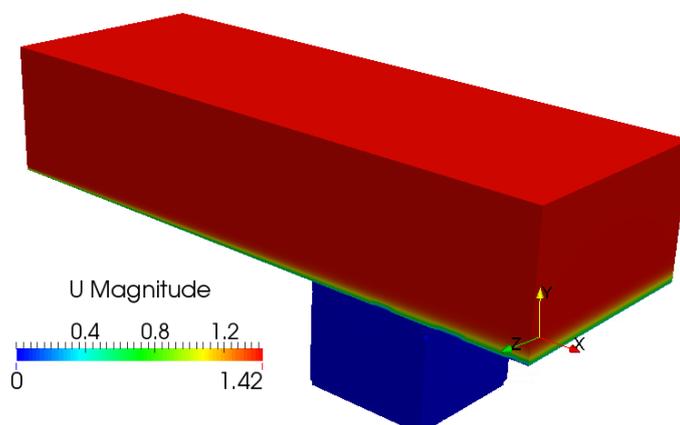


Figura 5.14. Distribuição da velocidade nas fronteiras do domínio em Kato_a, Kato_d e Kato_e.

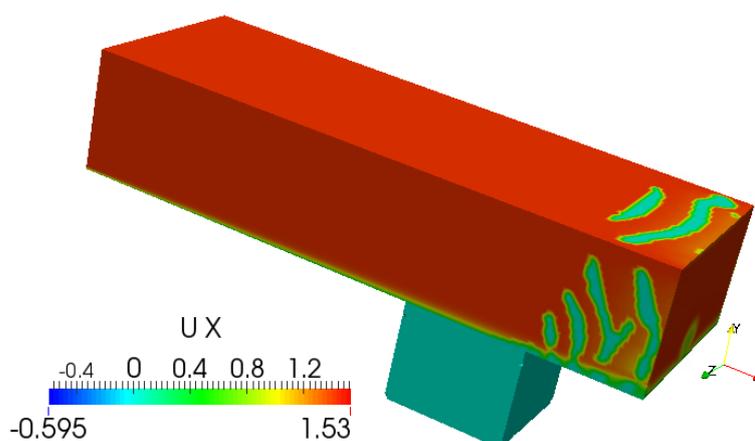


Figura 5.15. Distribuição da velocidade nas fronteiras do domínio em Kato_b.

Na tentativa de minimizar este efeito indesejável, procede-se ao aumento do domínio computacional nas direções z^+ , z^- , x^+ e y^+ , mantendo-se a configuração da malha B, para os casos Kato_b e Kato_d. A comparação dos resultados obtidos para o domínio original e para o novo domínio com maiores dimensões faz-se na Tabela 5.10.

O caso Kato_b regista melhorias na convergência, devido ao menor resíduo da equação da pressão, o que é atestado pela eliminação das zonas de instabilidade nas fronteiras. Neste caso, o aumento do domínio favorece a acurácia das propriedades nas fronteiras, mas tal não se reflete na diminuição do erro da previsão dos caudais de ventilação.

Por sua vez, o aumento do domínio no caso Kato_d prejudica significativamente tanto o erro de medição de Q^+ e Q^- como o cumprimento da equação

da continuidade, pelo aumento do resíduo final da equação da pressão. De facto, as instabilidades nas fronteiras aumentam e as oscilações das propriedades na convergência permanecem.

Tabela 5.10. Influência do aumento da extensão do domínio no erro de previsão dos caudais de ventilação e resíduo final da pressão em Kato_b e Kato_c.

	Domínio	Erro (+) (%)	Erro(-) (%)	Resíduo p
<i>Kato_b</i>	Original	6	6	2,6E-2
	Aumentado	5	6	1,3E-3
<i>Kato_d</i>	Original	27	20	[8,0E-3 – 2,2E-2]
	Aumentado	41	42	[2,7E-1 -6,2E-1]

5.2. Caso de Chu et al. (2011)

Chu et al. (2011) ensaiam um modelo cúbico de dimensões $0,40 \times 0,40 \times 0,40$ m, com paredes de espessura de $4,8$ mm (Figura 5.16). O modelo está posicionado no centro da secção de teste, que é aberta para o exterior e tem $1,8$ m de comprimento, $1,2$ m de largura e $1,2$ m de altura (Figura 5.17).

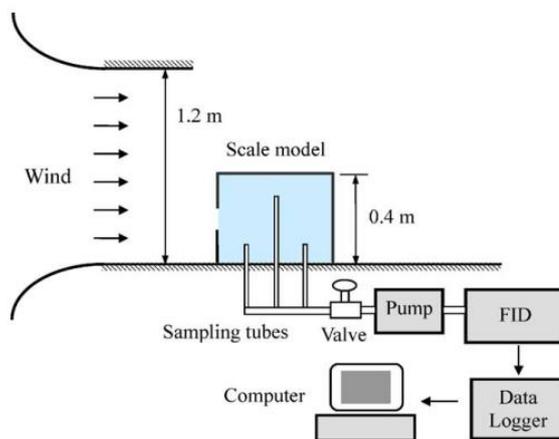


Figura 5.16. Esquema de montagem experimental de Chu et al. (2011).

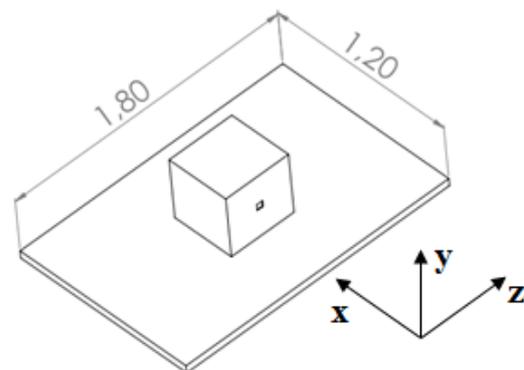


Figura 5.17. Modelo cúbico posicionado na secção de teste em Chu et al. (2011)

Os testes conduzidos avaliam o impacto que a área da abertura, a velocidade do escoamento de aproximação e o ângulo de incidência do escoamento exercem nos caudais de ventilação adimensionais, Q^* . A Tabela 5.11 sintetiza as condições de cada teste que serve de guia para as simulações numéricas.

Tabela 5.11. Resumo das condições dos ensaios experimentais de Chu et al. (2011).

Teste	Nº de Aberturas	Lado da abertura (m)	Velocidade (m/s)	Ângulo de incidência
<i>Chu_a</i>	1	0,02 0,04 0,06 0,1	4,2	90°
<i>Chu_b</i>	1	0,04	2,0 4,2 6,8	90°
<i>Chu_c</i>	1	0,04	4,2	0° 22,5° 45,0° 67,5° 90,0° 112,5° 135° 157,5° 180,0°

5.2.1. Nova estratégia para o cálculo dos caudais de ventilação *single-sided*

As modelações numéricas dos casos experimentais de Chu et al. (2011) produzem erros não negligenciáveis, quaisquer que sejam as condições impostas. Como foi clarificado na Secção 3.6, vários autores comprovam haver uma má correlação entre a componente experimental e a modelação numérica de ventilação *single-sided*, nos casos em que a turbulência do escoamento é aproximada pelos modelos do tipo RANS. Um autor de Chu et al. (2011) chegou mesmo a aconselhar a não realizar modelação numérica de ventilação *single-sided*.

Perante isto, são encetadas algumas tentativas com uma abordagem diferente daquela que é adotada amplamente na bibliografia. Os resultados que se seguem provam que é possível determinar computacionalmente os caudais de ventilação *single-sided* com um erro associado negligenciável.

5.2.2. Modelação numérica de Chu_a pela estratégia convencional

O ponto de partida é o caso Chu_a que faz variar a área de abertura, mantendo um escoamento incidente de 90° com uma velocidade constante de $4,2 \text{ m/s}$ (Figura 5.18).

A denominação das fronteiras do domínio de cálculo e respetiva localização encontra-se esquematizada na Figura 5.19. O domínio corresponde ao espaço ocupado pela secção de teste, logo $1,2 \times 1,2 \times 1,8 \text{ m}$ nas direções x , y e z .

O algoritmo selecionado é o SIMPLE e os esquemas numéricos de discretização são em tudo iguais aos descritos para Kato et al. (2006) na Secção 5.1.4. O modelo de turbulência continua a ser o $k - \omega$ SST.

As condições de fronteira estão sumariadas na Tabela 5.12 e na Tabela 5.13. Arbitrou-se que a intensidade de turbulência do escoamento na secção de teste do túnel de vento é 3%.

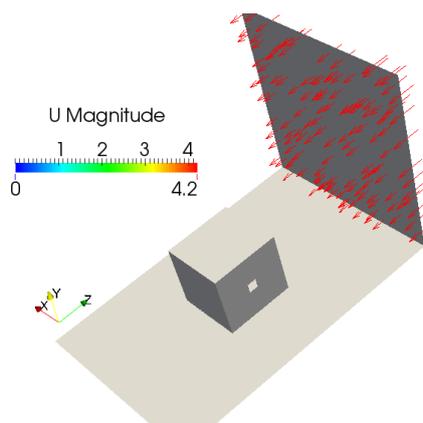


Figura 5.18. Esquema geral de Chu et al. (2011) para um escoamento incidente de 90° .

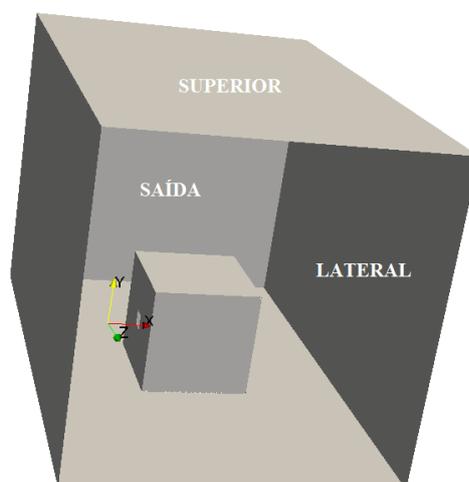


Figura 5.19. Fronteiras laterais de saída e superior do domínio em Chu et al. (2011).

Tabela 5.12. Condições de fronteira da entrada, saída, superior e laterais na modelação numérica de Kato et al.(2006).

	Entrada	Saída	Superior	Laterais
Tipo de fronteira	<i>Patch</i>			
$V (U)$	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 -4,2)</i>		<i>inletOutlet</i> <i>inletValue (0 0 0)</i>	
p	<i>zeroGradient</i>		<i>fixedValue</i> <i>uniform 0</i>	
k	<i>turbulentIntensityKineticEnergyInlet</i> <i>intensity 0,03</i>		<i>zeroGradient</i>	
ω (<i>omega</i>)	<i>turbulentMixingLengthFrequencyInlet</i> <i>mixingLength 0,01</i>		<i>zeroGradient</i>	
μ_t (<i>nut</i>)	<i>zeroGradient</i>		<i>zeroGradient</i>	

Tabela 5.13. Condições de fronteira das superfícies sólidas de Kato et al.(2006).

	Superfícies sólidas (modelo cúbico + chão da secção de teste)
Tipo de fronteira	<i>Wall</i>
$V (U)$	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
p	<i>zeroGradient</i>
k	<i>kqRWallFunction</i>
ω (<i>omega</i>)	<i>omegaWallFunction</i>
μ_t (<i>nut</i>)	<i>nutUSpaldingWallFunction</i>

São realizados vários testes de independência de malha que fazem variar o volume de refinamento aplicado na envoltória abertura e noutras zonas do domínio. A malha base é composta por células hexaédricas de 2 cm e o refinamento volumétrico na abertura é de nível 4 (células de 1 mm). Consistentemente com essa verificação, os resultados finais das simulações estão registados na Figura 5.20 em termos dos caudais adimensionais Q^* . Constata-se que para qualquer dimensão da abertura existe um desvio muito elevado dos caudais determinados em OpenFOAM® relativamente aos valores experimentais. Estes resultados têm por base a metodologia convencional que assume o escoamento como incompressível, fronteiras laterais, superior e de saída com pressão estática nula e gradiente nulo das restantes propriedades (*inletOutlet* para a velocidade,

neste caso). Os erros associados à previsão dos caudais de ventilação médios para aberturas com dimensão lateral de 2, 4, 6 e 10 cm são 66, 51, 58 e 44 % respetivamente.

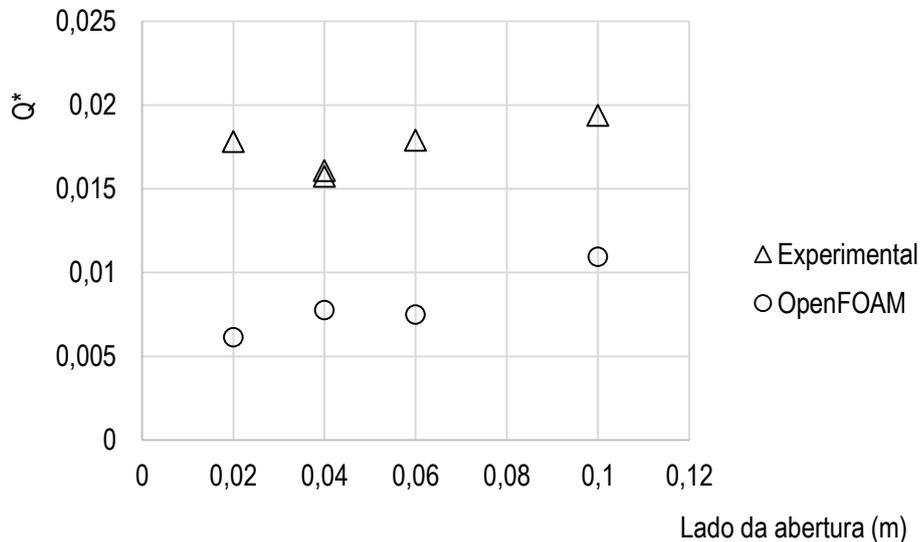


Figura 5.20. Caudais adimensionais determinados experimental e pelo OpenFOAM® em função do lado da abertura no caso Chu_a – metodologia convencional.

5.2.3. Modelação numérica de Chu_a pela estratégia do gradiente de pressão favorável

Perante os erros persistentes e elevados dos caudais de ventilação *single-sided* determinados numericamente, testa-se uma nova estratégia que consiste em impor um gradiente de pressão favorável às trocas de ar na abertura. Para o efeito, atribui-se um valor à pressão estática na fronteira de saída, p_{out} , que é igual à diferença entre a pressão estática das fronteiras laterais e superior, p_e , e a pressão dinâmica referente à velocidade média do escoamento, p_d :

$$p_{out} = p_e - p_d \quad (5.1)$$

Admitindo que o escoamento é incompressível e que a pressão estática é nula nas fronteiras laterais e superior, $p_e = 0$, a pressão estática na saída, p_{out} resume-se a:

$$p_{out} = -p_d = -\frac{1}{2}\rho v^2 \quad (5.2)$$

A origem da equação (5.2) remete para uma consideração espontânea e intuitiva, inicialmente desprovida de sentido lógico.

O caso Chu_a desenvolve-se com uma velocidade média de 4,2 m/s, sendo assim a pressão estática na fronteira de saída fica:

$$p_{out} = -\frac{1}{2} \times 1,205 \times 4,2^2 = -10,37 \text{ Pa} \quad (5.3)$$

No fundo, trata-se de criar uma depressão a jusante do modelo, relativamente à distribuição uniforme da pressão estática nas restantes fronteiras. A Figura 5.21 ilustra as condições de fronteira para a pressão estática na saída, seguindo a estratégia convencional que atribui $p = 0$ às fronteiras laterais, de saída e superior, e seguindo a estratégia defendida na presente tese que fixa o valor da pressão, na fronteira de saída, em $p_{out} = -p_{din}$.

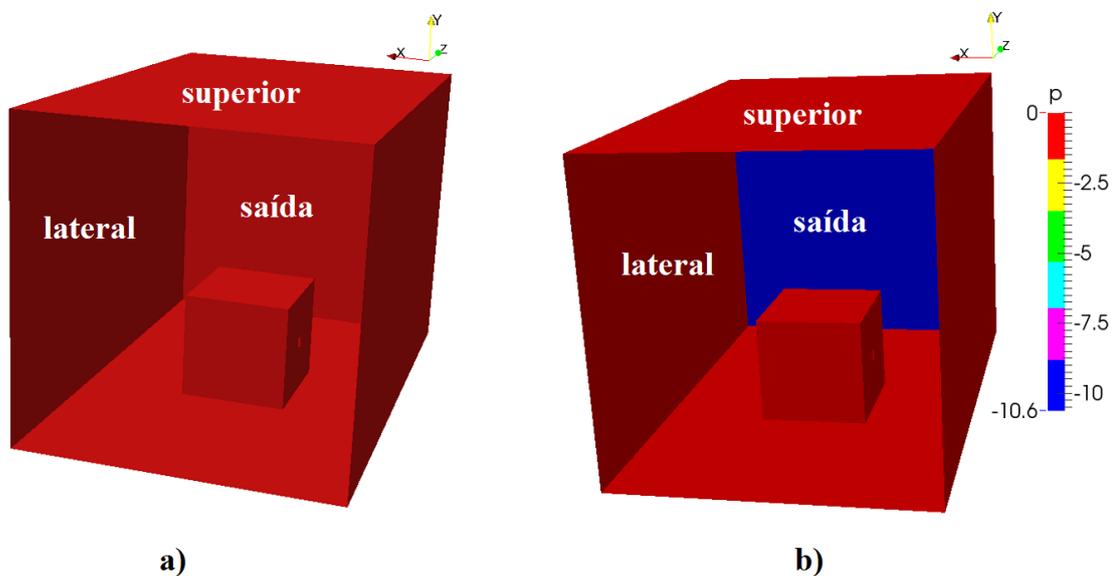


Figura 5.21. Condições de fronteira para a pressão estática na saída, laterais e superior pela estratégia convencional (a) e pela estratégia do gradiente de pressão favorável (b), em Chu_a.

Os resultados da modelação numérica para os caudais de ventilação adimensionais, Q^* , em função do lado da abertura, L , segundo a nova estratégia do gradiente de pressão favorável constam na Figura 5.22. Há, sem dúvida, uma melhoria considerável da correlação dos resultados numéricos com os experimentais, seguindo a nova estratégia. O erro associado à medição do caudal de ventilação que sai (-) e do caudal de ventilação que entra (+) no modelo cúbico, bem como a média dos valores absolutos desses caudais estão presentes na Tabela 5.14. Observa-se um ganho qualitativo na previsão dos caudais de ventilação, quando aplicada a estratégia do gradiente de pressão favorável. Os erros médios que eram de 66, 51, 58 e 44% são agora reduzidos para 18, 2, 2 e 16%, respetivamente, existindo uma boa concordância entre o caudal que entra e o caudal que sai.

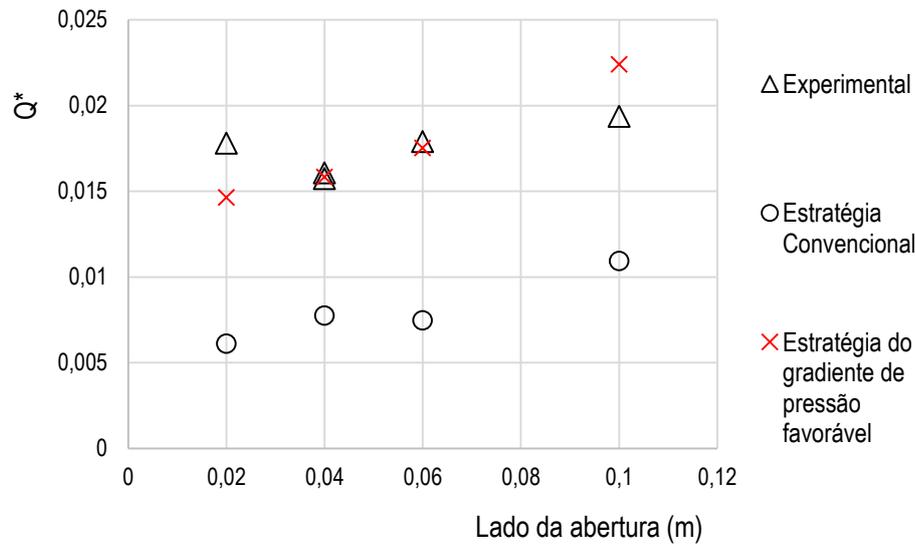


Figura 5.22. Resultados de Chu_a para a estratégia convencional e para a estratégia do gradiente de pressão favorável.

Tabela 5.14. Erro associado à medição dos caudais de ventilação em Chu_a em percentagem (%).

<i>L (m)</i>	<i>Estratégia Convencional</i>			<i>Estratégia do Gradiente de Pressão Favorável</i>		
	Erro (-)	Erro(+)	Erro médio	Erro (-)	Erro(+)	Erro médio
0,02	68	64	66	18	18	18
0,04	51	50	51	2	1	2
0,06	57	59	58	2	2	2
0,1	43	45	44	15	16	16

Uma vez reconhecido o potencial da estratégia do gradiente de pressão favorável no cálculo dos caudais de ventilação, subsiste a discussão sobre o seu efeito no escoamento em torno do modelo cúbico.

A Figura 5.23 e a Figura 5.24 são representativas das linhas de corrente em torno do modelo cúbico, para o caso Chu_a com $L = 0,04 m$, resultantes da modelação numérica pela estratégia convencional e pela estratégia do gradiente de pressão favorável, respetivamente.

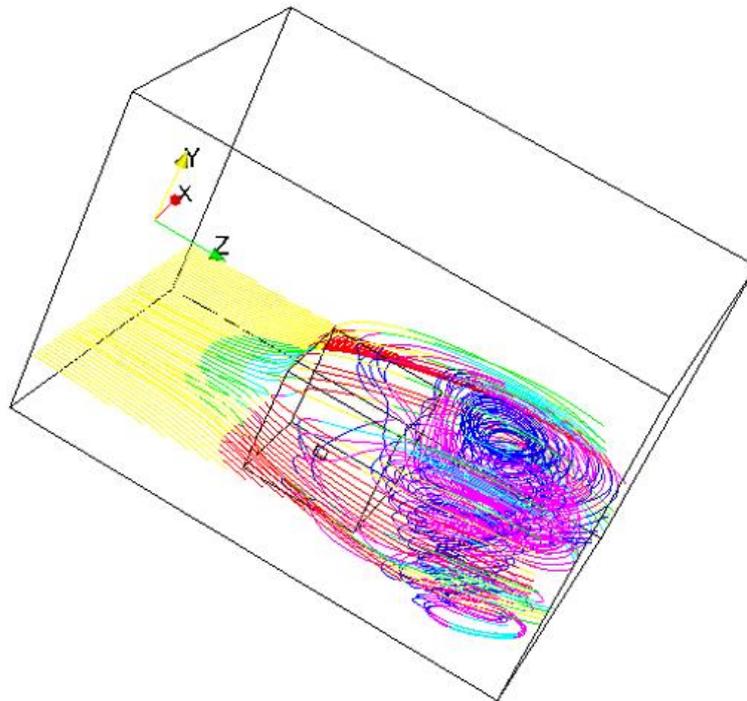


Figura 5.23. Escoamento em torno do modelo cúbico resultante da modelação numérica convencional (caso Chu_a com $L = 0,04 m$).

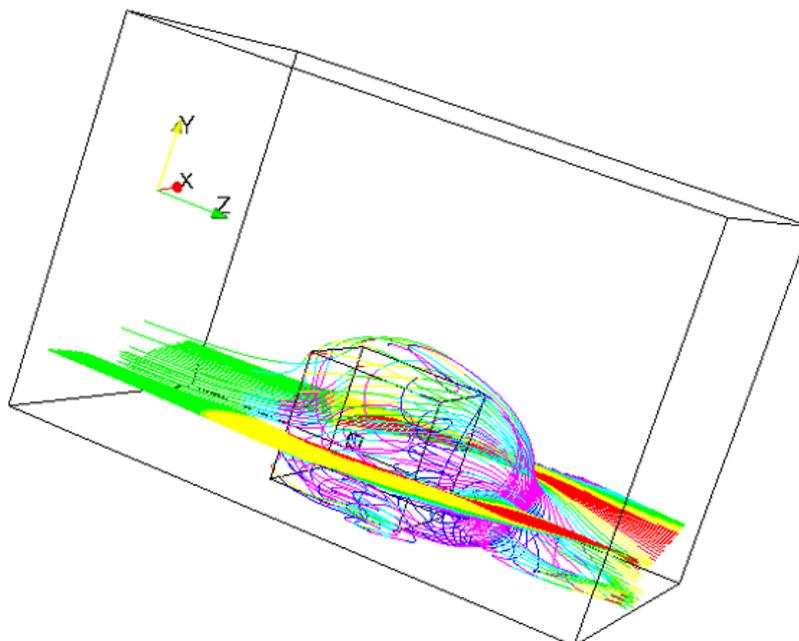


Figura 5.24. Escoamento em torno do modelo cúbico resultado da estratégia do gradiente de pressão favorável (caso Chu_a com $L = 0,04 m$).

As linhas de corrente da Figura 5.24 são consistentes com as zonas típicas do escoamento em torno de um modelo cúbico assinaladas por Peterka et al. (1985) na Figura 2.2. A cavidade está bem demarcada, ao passo que, na Figura 5.23, o escoamento a jusante do modelo não tipifica nenhuma das zonas definidas por Peterka et al. (1985). Esta ideia é reforçada pela observação dos campos bidimensionais de velocidade, na Figura 5.25 e Figura 5.26. A modelação numérica que segue a estratégia convencional leva à criação de uma zona de forte recirculação a jusante do modelo cúbico, composta por dois grandes vórtices com influência junto da fronteira (Figura 5.25), o que leva necessariamente à obrigatoriedade de estender o domínio computacional na direção de z . Por sua vez, a estratégia do gradiente de pressão favorável elimina as zonas de recirculação próximo da fronteira e também aí induz mais uniformidade das propriedades (Figura 5.26).

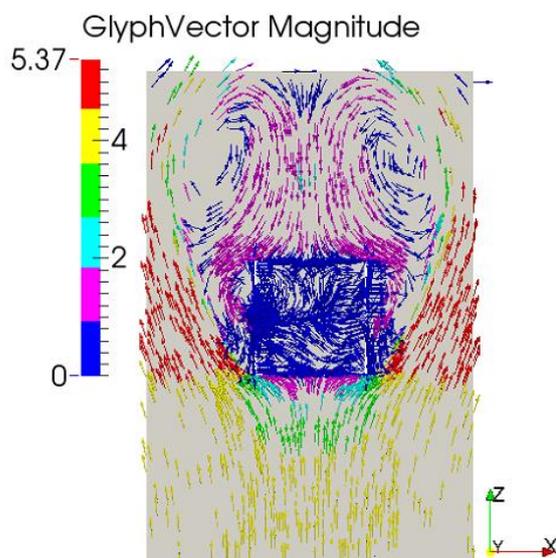


Figura 5.25. Campo bidimensional de velocidades no plano xOz que intercepta a abertura segundo a estratégia convencional (caso Chu_a com $L = 0,04 m$).

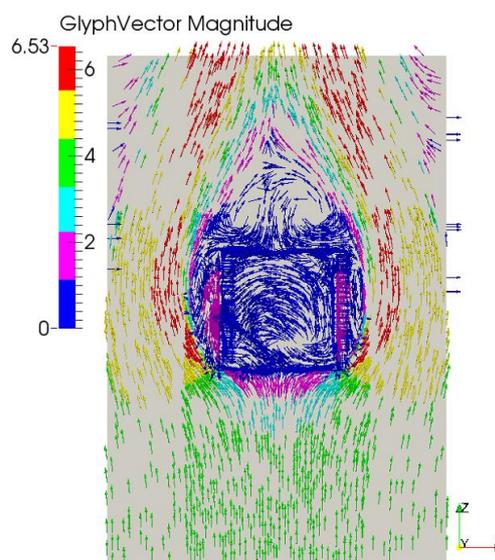


Figura 5.26. Campo bidimensional de velocidades no plano xOz que intercepta a abertura segundo a estratégia do gradiente de pressão favorável (caso Chu_a com $L = 0,04 m$).

5.2.4. Modelação numérica de Chu_b pela estratégia do gradiente de pressão favorável

O conjunto de ensaios experimentais Chu_b pressupõe a variação da velocidade do escoamento de aproximação, mantendo o mesmo lado de abertura, $L = 0,04 m$, e o mesmo ângulo de incidência, 90° . A modelação numérica destes testes servirá

para provar a estratégia do gradiente de pressão favorável no âmbito da determinação dos caudais de ventilação *single-sided*, uma vez que a variação da velocidade faz variar a pressão dinâmica e, conseqüentemente, a pressão estática na fronteira de saída, p_{out} .

O domínio computacional, o algoritmo, esquemas de discretização e as condições de fronteira (exceto pressão estática na saída) são mantidas conforme descrição na Secção 5.2.2. São também efetuados testes de independência de malha e verificação de $y^+ \leq 300$.

Com efeito, a Tabela 5.15 sumaria a pressão estática especificada na fronteira de saída, p_{out} , para as diferentes velocidades do escoamento de aproximação.

Tabela 5.15. Pressão estática na fronteira de saída em função da velocidade do escoamento de aproximação em Chu_b.

L (m)	V (m/s)	$p_{out} = p_e - p_d$ (Pa)
0,04	2,0	$p_{out} = 0 - \frac{1}{2} \times 1,205 \times 2,0^2 = -2,41$
	4,2	$p_{out} = 0 - \frac{1}{2} \times 1,205 \times 4,2^2 = -10,63$
	6,8	$p_{out} = 0 - \frac{1}{2} \times 1,205 \times 6,8^2 = -27,86$

A Figura 5.27 revela os caudais de ventilação adimensionais obtidos experimental e numericamente no conjunto de testes Chu_b e a Tabela 5.16 o erro associado às medições numéricas. Novamente se percebe que a aplicação da estratégia do gradiente de pressão favorável melhora a correlação entre os caudais adimensionais experimentais e numéricos, arrematando uma redução substancial do erro de cálculo, de 78 para 19%, de 51 para 2% e de 76 para 3%, nas três velocidades do ensaio.

A estratégia do gradiente de pressão favorável funciona igualmente bem para variações da área de abertura e para variações da velocidade, nas condições dos ensaios de Chu et al. (2011). No entanto, os testes anteriores foram todos conduzidos para um ângulo de incidência de 90°. Será possível avaliar a influência do ângulo de incidência na nova estratégia? É o que se vê a seguir.

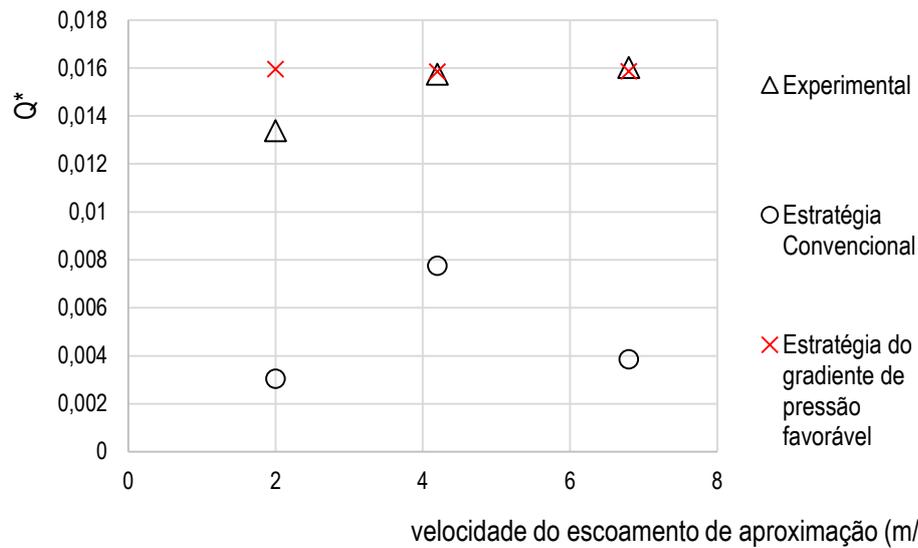


Figura 5.27. Caudais de ventilação adimensionais obtidos experimental e numericamente em função da velocidade do escoamento de aproximação, em Chu_b.

Tabela 5.16. Erro associado à medição dos caudais de ventilação em Chu_b em percentagem (%).

<i>V (m/s)</i>	<i>Estratégia Convencional</i>			<i>Estratégia do Gradiente de Pressão Favorável</i>		
	Erro (-)	Erro(+)	Erro médio	Erro (-)	Erro(+)	Erro médio
2,0	77	78	78	21	17	19
4,2	51	50	51	2	1	2
6,8	76	76	76	2	4	3

5.2.5. Modelação numérica de Chu_c pela estratégia do gradiente de pressão favorável

O conjunto de testes Chu_c faz variar o ângulo de incidência do escoamento de aproximação, para uma velocidade constante de 4,2 m/s e lado da abertura 0,04 m. Seguindo a estratégia do gradiente de pressão favorável como até aqui foi definida, bastaria atribuir o valor $p_{out} = -\frac{1}{2}\rho v^2$ na fronteira de saída, definir a geometria fazendo incluir o ângulo de incidência e esperar que os caudais de ventilação fossem determinados. No entanto, surge um problema que tem que ver com a discretização espacial.

A metodologia proposta no Capítulo 4 obriga à realização de um refinamento volumétrico na abertura para delimitação das faces das células onde se intenta medir o caudal. Se, por um lado, a malha base for composta por volumes de controlo que estão

alinhados com a direção do escoamento principal, em z , o refinamento volumétrico na abertura faz aparecer um conjunto de células cujas faces não estão alinhadas com a normal à abertura, logo impossíveis de isolar para determinar os caudais (Figura 5.28). Se, por outro lado, se se definir a malha base com os volumes de controlo alinhados com a normal da superfície do modelo cúbico, ocorre um desalinhamento relativamente à direção principal do escoamento (indesejável na modelação numérica) e torna-se muito difícil delimitar o domínio computacional devido ao novo sistema de eixos. Estes constrangimentos poderiam ser ultrapassados através das ferramentas da manipulação de malha, contudo essas operações desviam-se da finalidade da presente tese que passa por facilitar as aplicações de ventilação natural em OpenFOAM®. Assim sendo, exclui-se este conjunto de testes da presente tese.

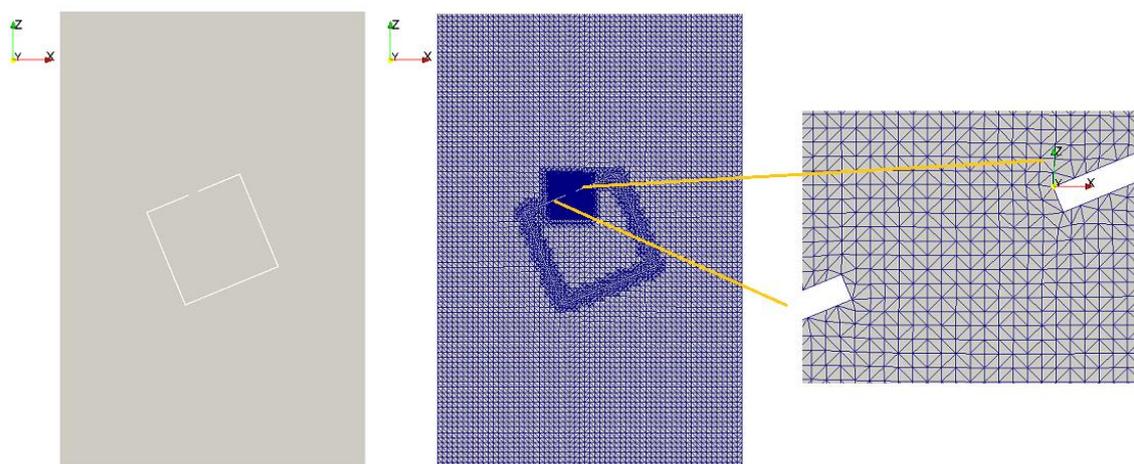


Figura 5.28. Discretização espacial de um escoamento com $\theta = 22,5^\circ$ coerente com a direção principal do escoamento.

5.2.6. Influência da dimensão do domínio na estratégia do gradiente de pressão favorável

A estratégia do gradiente favorável provou conseguir produzir bons resultados para diferentes áreas de abertura e velocidades médias do escoamento. No entanto, esta estratégia poderá ter sido positivamente influenciada pelas dimensões do domínio computacional equivalentes à secção de teste do túnel de vento. Se se variarem as dimensões do domínio computacional, obtêm-se resultados igualmente bons?

A Tabela 5.17 resume as condições dos domínios computacionais testados, partindo das dimensões originais, W , H e L . O aumento do domínio na direção de x e y cria uma zona excedente na envolvente da entrada do ar, à qual é necessário prescrever

uma condição de fronteira, como acontece nos casos 3), 4) e 5). Pode-se simplesmente arbitrar que a zona excedente é também ela uma entrada de ar ($upWind = n/A$), que essa zona é uma superfície sólida ($upWind = wall$) ou que essa zona é fronteira aberta ($upWind = patch$).

O erro associado à medição dos caudais de ventilação aumenta significativamente com o aumento da extensão do domínio, se se mantiver a mesma pressão estática de saída. O erro só é aceitável quando se duplica a pressão estática na saída, ao mesmo tempo que se duplica a distância entre as superfícies do modelo cúbico e as fronteiras originais (caso 5).

Constata-se, assim, que a extensão do domínio tem influência na qualidade dos resultados obtidos pela estratégia do gradiente de pressão favorável.

Tabela 5.17. Testes de verificação da influência do domínio para o caso de referência $v = 4,2 \text{ m/s}$ e $L = 0,04 \text{ m}$ (valores em metros).

	original	1)	2)	3)	4)	5)
Δx	W	W	$W + 0,8$	$W + 0,8$	$W + 0,8$	$W + 0,8$
Δy	H	H	H	H	H	$H + 1,0$
Δz	L	$L + 0,9$				
$upWind$	n/A	n/A	n/A	wall	patch	patch
$p_{out} \text{ (Pa)}$	-10,63	-10,63	-10,63	-10,63	-10,63	-21,26
Erro (%)	2	18	26	34	31	5

5.2.7. Hipótese de compressibilidade

Como foi visto, Cockroft e Robertson (1976) e Haghghat et al. (1991) incluem o efeito de compressibilidade nos modelos empíricos teóricos de previsão dos caudais de ventilação *single-sided*. Também Maas et al. (1991) comprovam o contributo da compressibilidade para a ventilação *single-sided*. De facto, é a capacidade de contração do fluido que permite a entrada de ar novo no espaço, por diminuição do volume de ar contido originalmente.

Não há indicações na bibliografia de alguma vez terem sido realizadas modelações numéricas de ventilação natural que incluíssem a hipótese de compressibilidade. O OpenFOAM® disponibiliza o algoritmo *rhoSimple* que tem por base

o esquema do algoritmo SIMPLE, mas que faz incluir o efeito da variação da densidade e uma quinta equação de conservação da energia.

O caso de referência de Chu et al. (2011) com $v = 4,2 \text{ m/s}$, $\theta = 90^\circ$ e $L = 0,04 \text{ m}$ é utilizado aqui para comparação do desempenho dos dois algoritmos. A Figura 5.29 mostra a malha utilizada onde é possível identificar os vários níveis de refinamento volumétrico e superficial. A Tabela 5.18 faz um apanhado das condições da malha, dos parâmetros que permitem avaliar o desempenho das modelações numéricas, e os erros associados, assumindo um escoamento incompressível e compressível. A pressão estática na saída para escoamento compressível é $p_{out} = 100\,000 - 10,63 = 99989,37 \text{ Pa}$, de acordo com a equação (5.1). As restantes fronteiras assumem a pressão estática com um valor de $100\,000 \text{ Pa}$. Notar que, ao contrário do que acontece na modelação numérica de escoamentos incompressíveis, na modelação de escoamentos compressíveis a pressão não se ocupa apenas de valores relativos da pressão, mas sim de valores absolutos. Daí a necessidade de seleccionar o valor absoluto correspondente à pressão atmosférica.

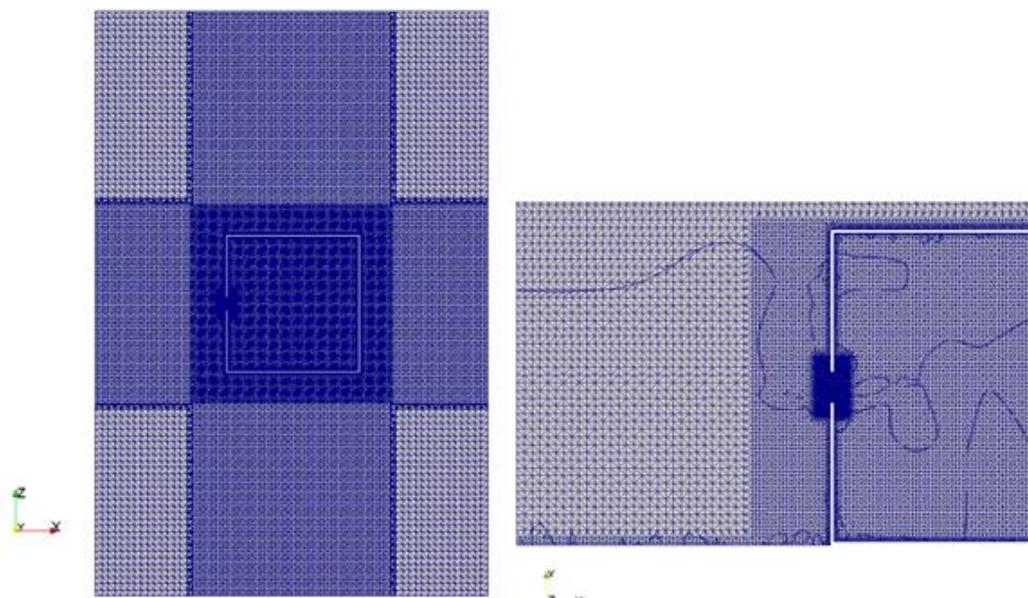


Figura 5.29. Malha com refinamento volumétrico e superficial para o caso de referência de Chu et al. (2011).

Os resultados refletem um erro ligeiramente menor para o escoamento compressível e uma convergência mais rápida para escoamento incompressível. O resíduo final da pressão mantém-se relativamente igual.

A Figura 5.30 apresenta a evolução do caudal de ventilação positivo, Q^+ , ao longo das iterações, já em processo convergente. A frequência de oscilação do escoamento compressível é maior do que a do escoamento incompressível.

Tabela 5.18. Parâmetros de comparação do desempenho dos algoritmos Simple e rhoSimple.

	Incompressível	Compressível
<i>Malha</i>	2.9M células, malha base com 2 cm, refinamento volumétrico de nível 4 na abertura, de nível 2 em redor do modelo cúbico e de nível 1 no prolongamento (cruz), refinamento superficial nas superfícies do cubo de nível 3 e nas restantes superfícies de nível 2.	
<i>Algoritmo</i>	Simple	rhoSimple
<i>Nº de iteração na convergência</i>	1500	2500
<i>Resíduo de p</i>	0,0098	0,009
<i>y⁺ max</i>	56,5	62,0
<i>p_{out} (Pa)</i>	-10,63	99989.37
<i>Erro (+) (%)</i>	10	10
<i>Erro (-) (%)</i>	6	3

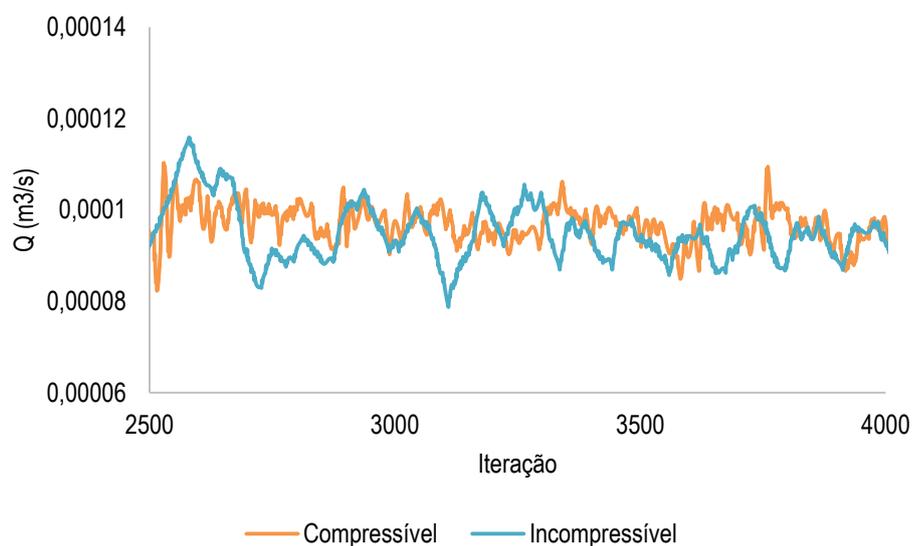


Figura 5.30. Convergência de Q^+ ao longo das iterações para modelação numérica para escoamento incompressível e compressível.

5.2.8. Influência da intensidade de turbulência

Chu et al. (2011) não dão pistas sobre a intensidade de turbulência do escoamento de aproximação, pelo que se utiliza um valor arbitrário de intensidade de

turbulência de 3%, na fronteira de entrada. Resta averiguar se a variação da intensidade de turbulência influencia os resultados obtidos, já que foi apontada como um dos fatores que afeta os caudais de ventilação (Secção 2.4.2). A Figura 5.31 expõe a variação dos caudais de ventilação médios determinados pelo OpenFOAM® dos vários casos apresentados até aqui (Chu_a e Chu_b). Verifica-se um ligeiro aumento do caudal com o aumento da intensidade de turbulência, o qual não tem grande expressão no erro associado à medição.

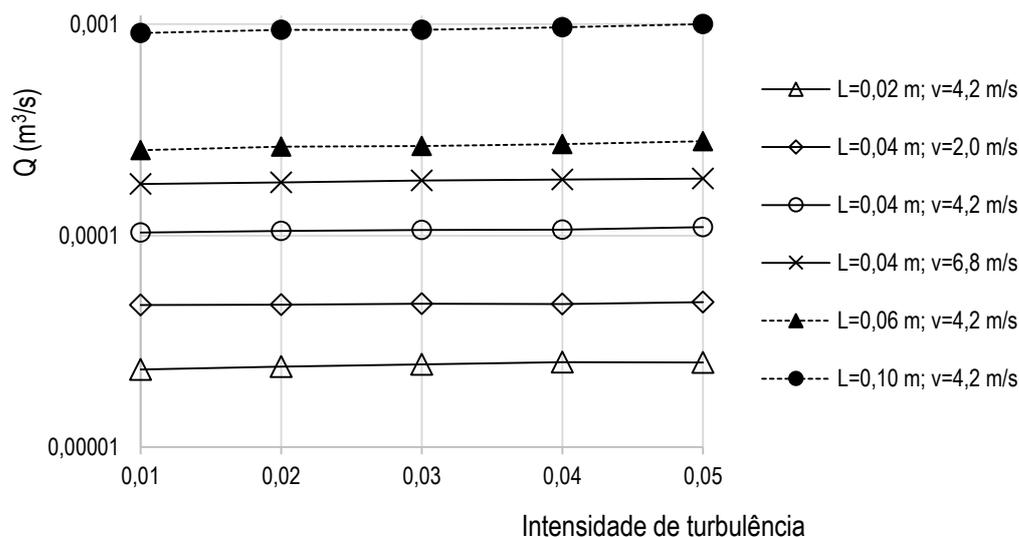


Figura 5.31. Influência da intensidade de turbulência nos caudais de ventilação determinados numericamente pela estratégia do gradiente de pressão favorável.

5.3. Caso de Larsen (2006)

Larsen (2006) ensaia o protótipo de um espaço ventilado num túnel de vento fechado com uma secção de teste de 16,1 m de comprimento, 15,5 m de largura e 9 m de altura e um bocal de entrada do ar com 9,5 m de largura e 5 m de altura (Figura 5.32). O protótipo tem 5,56 m de comprimento, 5,56 m largura e 3 m de altura. A espessura das paredes é igual a 0,1 m. A abertura de dimensão 0,86 × 1,4 m não está colocada sobre o eixo de simetria do protótipo, como se pode observar na Figura 5.33. A velocidade do ar pode variar entre 1 a 5 m/s. A intensidade de turbulência não é superior a 5%.

A Tabela 5.19 expõe as condições dos testes experimentais realizados por Larsen (2006) com interesse para a presente tese.

As diferenças entre as condições experimentais de Larsen (2006) e Chu et al.(2006) são assinaláveis. Em primeiro lugar, o modelo de Chu et al. (2011) tem

dimensões à escala reduzida, enquanto o modelo de Larsen (2006) tem dimensões reais. A geometria do modelo é cúbica em Chu et al. (2011) e paralelepípedica em Larsen (2006). A abertura está centrada na face do cubo e tem a forma de um quadrado em Chu et al. (2011), mas em Larsen (2006) está posicionada assimetricamente e tem a forma de um retângulo. Por fim, a secção de teste é aberta em Chu et al. (2011) e em Larsen (2006) é fechada. Estas diferenças abrem caminho para testar a estratégia do gradiente de pressão favorável, julgando se a sua natureza é fortuita ou persistente.

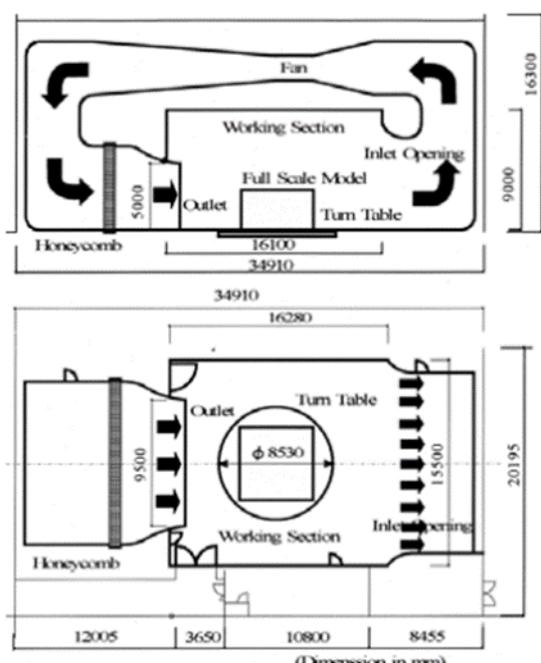


Figura 5.32. Esquema de montagem experimental de Larsen (2006).

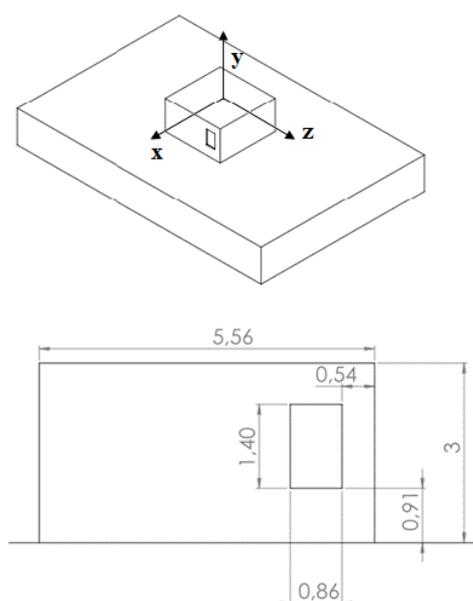
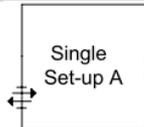


Figura 5.33. Geometria e dimensões do protótipo de Larsen (2006).

Tabela 5.19. Resumo das condições dos ensaios experimentais de Larsen (2006).

Teste	Volume	Velocidade (m/s)	Ângulo de incidência
Larsen	 Single Set-up A	3 5	90°

Os testes de independência de malha indicam que Larsen (2006) é mais sensível à malha base do que Chu et al. (2011), em virtude do domínio ser da ordem das dezenas de metros. A célula ótima atinge a dimensão de 10 cm. A malha independente tem cerca de $4,8 \times 10^6$ de células, refinamento volumétrico na abertura de nível 3 e

refinamento por camadas (*layers*) nas paredes. A opção pelo refinamento por camadas prende-se com facto de a malha base ser por si só muito densa, pelo que qualquer refinamento superficial fará surgir um número de células não comportável. A Figura 5.34 ilustra o corte da malha utilizada na zona do protótipo.

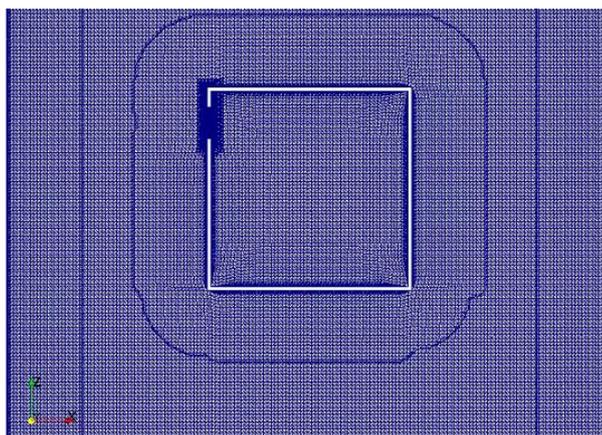


Figura 5.34. Zoom da malha na zona do protótipo de Larsen (2006).

Foi visto que a dimensão do domínio interfere na estratégia do gradiente de pressão favorável. Em Chu et al. (2011) os resultados ótimos acontecem para um domínio equivalente à secção de teste. Nesse sentido, são principiadas duas tentativas que integram a estratégia do gradiente favorável, mas que diferem no domínio utilizado. A Tabela 5.20 revela o domínio real, referente à secção de teste, e o domínio aqui designado como “adimensional”, que tem por base a razão entre a dimensão do domínio de Chu et al. (2011) e a dimensão do modelo de Chu et al. (2011) na mesma direção. A denominação de domínio “adimensional” justifica-se pelo estabelecimento de uma razão entre dimensões que é independente das dimensões da secção de teste real. Assim, sabe-se que o modelo cúbico de Chu et al. (2011) tem uma dimensão lateral de $0,4\text{ m}$, o que faz com que as razões entre a dimensão lateral e dimensão do domínio sejam $1,2/0,4 = 3$ em x , $1,2/0,4 = 3$ em y e $1,8/0,4 = 4,5$ em z . Dado que as dimensões do protótipo de Larsen (2006) são $5,56 \times 3 \times 5,56$ nas direções x , y e z , então as dimensões do domínio adimensional são $5,56 \times 3 = 16,7$, $3 \times 3 = 9$ e $5,56 \times 4,5 = 25,0\text{ (m)}$.

Tabela 5.20. Domínio real e domínio adimensional das modelações numéricas de Larsen (2006).

Domínio	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)
<i>Real</i>	15,5	9,0	16,1
<i>Adimensional</i>	16,7	9,0	25,0

A Figura 5.35 representa o domínio computacional com a fronteira de entrada assinalada. A entrada corresponde exatamente às dimensões descritas no esquema experimental para o bocal do túnel de vento. A restante área circundante é modelado como uma parede. As fronteiras laterais e superior são também modeladas como paredes.

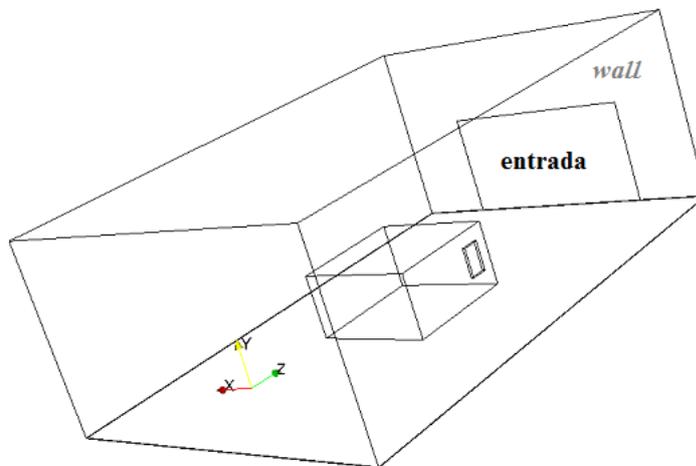
As condições de fronteira na entrada são *fixedValue uniform* (0 0 -3) para \vec{V} , *zeroGradient* para a p e μ_t , *turbulentIntensityKineticEnergyInlet intensity* 0,05 para k e *turbulentMixingLengthFrequencyInlet mixingLength* 0,01 para ω . Na saída, *inletOutlet inletValue* (0 0 0) para a velocidade e *zeroGradient* para k , ω e μ_t .

A pressão estática na saída, de acordo com a estratégia do gradiente de pressão favorável e para um escoamento incompressível é:

$$p_{out} = 0 - \frac{1}{2} \times 1,205 \times 3^2 = -5,42 Pa \quad (5.4)$$

Se o escoamento for compressível, então:

$$p_{out} = 100\,000 - \frac{1}{2} \times 1,205 \times 3^2 = 99994,58 Pa \quad (5.5)$$

**Figura 5.35.** Domínio computacional de Larsen (2006).

A Tabela 5.21 revela os erros associados às modelações numéricas que seguem a estratégia do gradiente de pressão favorável. A consideração de um domínio real com as dimensões correspondentes à secção de teste introduz um erro de 100% no cálculo numérico do caudal de ventilação. Por sua vez, a modelação numérica que assenta no domínio adimensional manifesta erros muito reduzidos dos caudais de ventilação numéricos face aos dados experimentais. Os algoritmos para regime compressível e incompressível produzem resultados semelhantes, no entanto a convergência é mais rápida para o compressível.

Tabela 5.21. Erro associado ao cálculo dos caudais de ventilação *single-sided* de Larsen (2006) para $v = 3 \text{ m/s}$.

	Domínio Real	Domínio Adimensional	
	<i>Incompressível</i>	<i>Incompressível</i>	<i>Compressível</i>
<i>Erro (-) (%)</i>	100	9	4
<i>Erro (+) (%)</i>	99	3	10
<i>Resíduo p</i>	-	0,09	0,08
<i>Convergência</i>		4000	2000

A modelação numérica do mesmo ensaio, mas para $v = 5 \text{ m/s}$, conta com uma pressão estática à saída de:

$$p_{out} = 100\,000 - \frac{1}{2} \times 1,205 \times 5^2 = 99984,94 \text{ Pa} \quad (5.6)$$

para um escoamento compressível.

O erro associado ao cálculo do caudal negativo e positivo é 9 e 15%, seguindo a estratégia do gradiente de pressão favorável para um domínio adimensional.

6. CONCLUSÕES

Esta tese definiu como objetivos principais a avaliação do desempenho do OpenFOAM® em estudos de ventilação natural por comparação com resultados documentados na bibliografia. O parâmetro alvo de apreciação foi o caudal de ventilação *single-sided* que mostrou ser conivente com as necessidades da fase de projeto de um edifício. Para isso, foi necessário delinear e implementar uma estratégia capaz de medir os caudais de ventilação na abertura em OpenFOAM®. Adicionalmente, foi proposta uma nova estratégia para a modelação numérica de ventilação *single-sided*.

Os objetivos traçados foram integralmente cumpridos. Em primeiro lugar, mostrou-se que a determinação dos caudais de ventilação é possível recorrendo a uma ferramenta adicional ao OpenFOAM®, o *swak4Foam*. As expressões *swak4Foam*, em linguagem C++, permitem calcular o caudal de entrada e saída na abertura. A delimitação de um plano na abertura para o cálculo do caudal deve ser feita através do isolamento das faces das células no dicionário *topoSet*, o que só é conseguido se não existirem distorções da malha na zona de abertura e se as células forem suficientemente refinadas.

A obrigatoriedade do refinamento volumétrico na abertura introduz células com dimensão muito reduzida, cujo nó pertence à subcamada viscosa. Por esse motivo, só é aconselhável utilizar o modelo de turbulência $k - \omega SST$, já que disponibiliza o tratamento automático da função de parede na subcamada viscosa e na região logarítmica.

A geração da malha é, contudo, o ponto mais débil desta tese. Os vários autores que se ocupam da simulação numérica de ventilação utilizam malhas estruturadas não uniformes, ao passo que aqui todas as simulações decorrem de malhas uniformes com refinamentos volumétricos locais e refinamentos superficiais. Esta opção, embora mais simples e mais expedita, acarreta razões de compressão/alongamento da malha desfavoráveis na regiões de transição do refinamento que, em zonas de atuação de fortes gradientes de velocidade e pressão, podem afetar a convergência e a qualidade da simulação numérica.

A modelação numérica de ventilação *single-sided* fruto de um escoamento uniforme sobre uma abertura revelou apenas bons resultados quando foram colocados

sistemas pivotantes na abertura que forcem o escoamento a entrar no espaço ventilado. Quando o sistema pivotante não era suficientemente profundo, os caudais de ventilação determinados numericamente contemplaram ar que atravessava a abertura, mas que não contribuía para a ventilação do local, uma vez que era imediatamente extraído para o exterior. Foram as linhas de corrente a dar esta indicação de desfasamento que fez com que os erros de previsão fossem menores do que na realidade são.

Ainda sobre a ventilação *single-sided* fruto de um escoamento uniforme sobre a abertura, só foi atingida a convergência (resíduo da equação de $p < 1 \times 10^{-4}$) nos casos em que não existiam sistemas pivotantes na abertura. Nos restantes casos, na solução final constatou-se a oscilação das propriedades em torno de uma média.

Os caudais de ventilação resultantes de um escoamento em torno de um modelo com uma abertura para o exterior contêm erros significativos, quando obtidos pela modelação numérica que segue os procedimentos convencionais da bibliografia: modelos da família RANS e pressão estática nula nas fronteiras abertas. Para fazer frente a isso, propõe-se uma nova estratégia que contempla a ideia de um gradiente de pressão favorável estabelecido entre as fronteiras abertas do domínio.

A formulação final da estratégia do gradiente de pressão favorável é a seguinte:

A modelação numérica de um escoamento em torno de um modelo com uma abertura para o exterior com consequente reprodução dos caudais de ventilação na abertura deve respeitar as seguintes regras:

- 1. O domínio computacional deve ter dimensões aproximadamente equivalentes a 4,5 vezes o comprimento, 3 vezes a largura e 3 vezes a altura do modelo.*
- 2. Manter as dimensões originais da entrada do ar no domínio.*
- 3. As condições de fronteira devem ser consistentes com o ensaio experimental. Fronteiras sólidas, se a secção de teste for fechada, ou fronteiras abertas, se a secção de teste for aberta.*
- 4. As fronteiras abertas devem conter a condição inletOutlet para a velocidade, disponível em OpenFOAM®.*

O efeito que um escoamento com um ângulo de incidência de 90° exerce no caudal de ventilação single-sided é reproduzido pela imposição de uma pressão estática na saída que é equivalente a:

$$p_{out} = p_e - p_d$$

onde p_e é a pressão estática nas fronteiras abertas e p_d é a pressão dinâmica do escoamento médio.

Se o escoamento for simulado como incompressível, $p_e = 0$, a pressão estática de saída fica simplesmente

$$p_{out} = -\frac{1}{2}\rho v^2$$

A estratégia do gradiente de pressão favorável mostra um excelente desempenho para diferentes velocidades do escoamento de aproximação, área, localização e geometria da abertura, tanto em modelos à escala como em protótipos ensaiados em túneis de vento, na maioria das vezes com erros inferiores a 10% face aos caudais experimentais.

Quando $\theta = 90^\circ$, há uma relação direta entre a pressão estática na saída e a pressão dinâmica do escoamento médio.

Esta estratégia consegue captar melhor o escoamento a jusante do modelo, nomeadamente com a formação de uma cavidade turbulenta reconhecida na bibliografia.

Muitos autores advogam o efeito da compressibilidade na ventilação *single-sided*. No entanto, na modelação numérica não se identificam vantagens ou diferenças significativas entre a adoção de algoritmos para escoamento incompressível e para escoamento compressível.

A estratégia do gradiente de pressão favorável deve ser objeto de testes adicionais, nomeadamente sobre a sua relação com o ângulo de incidência, o seu desempenho em malhas estruturadas não uniformes, a influência do modelo de turbulência e do domínio computacional.

O OpenFOAM® é, sem dúvida, uma ferramenta computacional com elevado potencial e mostra estar à altura da modelação numérica de ventilação natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ai, Z. e Mak, C. (2014), “Analysis of fluctuating characteristics of wind-induced airflow through a single opening using LES modeling and the tracer gas”, *Building and Environment*, Vol. 80, pp. 249-258.
- Allard, F. e Ghiaus, C. (2005), “Natural Ventilation in the Urban Environment – Assessment and Design”, 1ª Ed., Earthscan.
- Backer, L., Laverge, J., Janssens, A. e Paepe, M. (2014), “The use of a zonal model to calculate the stratification in a large building”, 35th AIVC Conference "Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance", Poznań, Poland, 24-25 September 2014
- Bangalee, M., Lin, S. e Miao, J. (2011), “Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building: A computational approach”, *Energy and Buildings*, Vol. 45, pp. 317-325.
- Behrens, T. (2009), “OpenFOAM’s basic solvers for linear systems of equations – solvers, preconditioners, smoothers”. Acedido a 15 de Dezembro de 2015, em http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2008/TimBehrens/tibeh-report-fin.pdf.
- Bu, Z. e Kato, S. (2011), “Wind-induced ventilation performances and airflow characteristics in an areaway-attached basement with a single-sided opening”, *Energy and Buildings*, Vol. 46, pp. 911-921.
- Caciolo, M., Stabat, P. e Marchi, D. (2012), “Numerical simulation of single-sided ventilation using RANS and LES and comparison with full-scale experiments”, *Building and Environment*, Vol. 59, pp. 202-213.
- Caciolo, M., Cui, S., Stabat, P. e Marchio, D. (2013), “Development of a new correlation for single-sided ventilation adapted to leeward conditions”, *Energy and Buildings*, Vol. 60, pp. 372-382.
- Chu, C., Chen, R. e Chen, J. (2011), “A laboratory experiment of shear-induced natural ventilation”, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 2631-2637.
- Cockroft, J. e Robertson, P. (1976), “Ventilation of an Enclosure Through a Single Opening”, *Building and Environment*, Vol. 11, pp. 29-35.
- Crommelin, R. e Vrins, E. (1987), “Ventilation Through a Single Opening in a Scale Model”, TNO Division of Technology for Society, Delft, Publication No P871048, 9th September 1987.
- Dascalaki, E., Santamouris, M. et al. (1996), “On the combination of air velocity and flow measurements in single sided natural ventilation configurations”, *Energy and Buildings*, Vol. 24, pp. 155-165.
- Ferziger, J. e Perić, M. (2002), “Computational Methods for Fluid Dynamics”, Springer,

3º Ed.

- Fortuna, A. (2000), “Técnicas Computacionais para a Dinâmica dos Fluidos”, Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 1ª Ed.
- Frank, J., Hellsten, A., Schlunzen, H. e Carissimo, B. (2010), “Best Practice Guideline For The CFD Simulation os Flows In The Urban Environment”, Cost Office.
- Gomes, M., Rodrigues, A. e Mendes, P. (2003), “Wind Effects on and Around L- and U-Shaped Buildings”, 5th International Conference on Urban Climate, Lodz, Polónia, Janeiro de 2003.
- Guerrero, J. (2015), “Introductory OpenFOAM® Course: A crash introduction to turbulence modeling in OpenFOAM®”. Acedido a 12 de Agosto de 2015, em http://www.dicat.unige.it/guerrero/oftraining/8_IOF_advanced_modeling_turbulence.pdf.
- Gusten, J. (1989), “Wind pressures on low-rise buildings an air infiltration analysis”, 10th AIVC Conference, Dipoli, Finland, 25-28 September 1989.
- Haghighat, F., Rao, J. e Fazio, P. (1991), “The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates – a Modelling Approach”, Building and Environment, Vol. 26, No.2, pp. 95-109.
- Hayashi, T. e Urano, Y. et al. (1987) “Prediction o fair distribution in multiroom buildings”. Em: Proceedings Roomvent ‘87, Stockholm, Sweden, 10-12, June 1987.
- Hill, J. e Kusuda, T. (1975), “Dynamic characteristics of air infiltration”, ASHRAE transactions 1975, vol. 81, part 1, pp. 168-185.
- Jackson, A. (2012), “A Comprehensive Tour of snappyHexMesh”. Acedido a 8 de Junho de 2015, em <https://openfoamwiki.net/images/f/f0/Final-AndrewJacksonSlidesOFW7.pdf>
- Jiang, Y. e Chen, Q. (2001), “Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 89, pp. 1155-1178.
- Jiru, T. e Bitsuamlak, G. (2010), “Application of CFD in Modelling Wind-Induced Natural Ventilation of Buildings – a Review”, International Journal of Ventilation, Vol. 9, No. 2.”
- Kato, S., Kono, R. et al. (2006), “A Wind Tunnel Experimental Analysis of the Ventilation Characteristics of a Room with Single-Sided Opening in Uniform Flow”, International Journal of Ventilation, Vo.5, No.1.
- Kotani, H., Sato, R. e Yamanaka, T. (1998), “Zonal model for natural ventilation of light well in high-rise apartment building”. Em: Proceedings of Roomvent ’86, 6thInternational Conference on Air Distribution in Rooms, Stockholm, Sweden, 14-17 June 1998.
- Larsen, T. (2006), “Natural Ventilation Driven by Wind and Temperature Difference”. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Larsen, T. e Heiselberg, P. (2008), “Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference”, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 1031-

- 1040.
- Maas, J., Bienfait, D., Vandaele, L. e Walker, R. (1991), “Single Sided Ventilation”, 12th AIVC Conference, Ottawa, Canada, 24-27 September 1991.
- Malinowski, H. (1971), “Wind effect on the air movement inside buildings”. Em: Proceedings 3rd International Conference "Wind effects on buildings and Structures", Tokyo, 6-9 September 1971. pp. 125-134.
- Menter, F. (1993), “Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamics Flows”, 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, 6-9 July 1993.
- Nantka, M. e Majerski, S. (1981), “A numerical method for air-change rate of buildings calculated”. Em: Recordings of the 5th International Conference on HVAC, Czechoslovakia, 24-26, November, 1981, pp. 91-101.
- Narasaki, M., Yamanaka, T. e Higuchi, M. (1987), “The influence of turbulent wind on ventilation”. Em: Indoor Air '87, Proceedings of 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Berlin (West), 17-21 August 1987, Vol. 3.
- NEXT foam, (2014), “Boundary Conditions – OpenFOAM – 2.3.0”. Acedido a 24 de Janeiro de 2016, em <http://www.nextfoam.co.kr/lib/download.php?idx=135033&sid=40f68c078862b4e72ae52667fee05f40>.
- Oliveira, L. e Lopes, A. (2010), “Mecânica dos Fluidos”, Lidel – edições técnicas, lda., 3^a Ed.
- Papakonstantinou, K., Kiranoudis, C. e Markatos, N. (2000), “Numerical simulation of air flow field in single-sided ventilated buildings”, Energy and Buildings, Vol. 33, pp. 41-48.
- Patankar, S. (1980), “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Corporation, 1^a Ed.
- Phaff, J., Gids, W. et al. (1980), “The ventilation of buildings: investigation of the consequences of opening one window on the internal climate of a room”, TNO Institute for Environment Hygiene and Health Technology IMG – TNO Report C448.
- Peren, J., Hooff, T., Leite, B. e Blocken B. (2015), “CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location”, Building and Environment, Vol. 85, pp. 263-276.
- Peterka, J., Meroney, R. e Kothari, K. (1985), “Wind Flow Patterns About Buildings”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 21, pp. 21-38.
- Portaria nº353-A/2013 de 4 de Dezembro. “Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior”. Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. Lisboa.
- Potter, I. (1979), “Effect of fluctuating wind pressures on natural ventilation”, ASHRAE transactions, vol. 85, part 2. pp. 2445-457.
- Ramponi, R. e Blocken, B. (2012), “CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: impact of computational parameters”. Building and

- Environment, Vol. 53, pp. 34-48.
- Stavrakakis, G., Tomazinakis, N. e Markatos, N. (2012), “Modified ‘closure’ constants of the standard k- ϵ turbulence model for the prediction of wind-induced natural ventilation”, Building Service Engineering Research and Technology, Vol. 33, part. 3, pp. 241-261.
- Versteeg, H. e Malalasekera, W. (1995), “An introduction to computational fluid Dynamics – The finite volume method”, Longman Scientific & Technical, 1ª Edição.
- Vieser, W., Esch, T. e Menter, F. (2002), “Heat Transfer Predictions using Advanced two-Equations Turbulence Models”, CFX Technical Memorandum: CFX-VAL10/0602.
- Wang, H. e Chen, Q. (2012), “A new empirical model for predicting single-sided, wind-driven ventilation in buildings”, Energy and Buildings, Vol. 54, pp.386-394.
- Wang, H. Karava, P. e Chen, Q. (2015), “Development of simple semiempirical models for calculating airflow through hopper, awning, and casement windows for single-sided natural ventilation”, Energy and Buildings, Vol. 96, pp. 373-384.
- Warren, P. (1977), “Ventilation through openings on one wall only”, Unesco International Seminar, Heat Transfer in Buildings, Dubrovnik 1977.
- Warren, P. (1986), “The analysis of single-sided ventilation measurements”, Air Infiltration Review, Vol. 7, No.2, pp.3-5.
- Wilcox, D. (1994), “Turbulence Modeling for CFD”, DWC Industries, Inc., 2ª Ed.

ANEXO A – FORMULAÇÃO DO MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ SST

As equações de transporte do modelo $k - \omega$ SST, em notação indicial, são as seguintes:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{A.2})$$

com

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \tilde{P}_k = \min(P_k; c_1 \varepsilon)$$

$$\beta^* = 0,09 \quad c_1 = 10$$

Os coeficientes do modelo, definidos genericamente por φ , são função de F_1 , respeitando a condição $\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2$. Neste contexto, φ representa as constantes σ_k , σ_ω , γ e β , pelo que φ_1 e φ_2 assumem os seguintes valores:

$$\begin{array}{llll} \sigma_{k1} = 2,0 & \sigma_{\omega 1} = 2,0 & \gamma_1 = 0,5532 & \beta_1 = 0,075 \\ \sigma_{k2} = 1,0 & \sigma_{\omega 2} = 1,168 & \gamma_2 = 0,4403 & \beta_2 = 0,0828 \end{array}$$

A função F_1 é constituída com base nos seguintes critérios:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (\text{A.3})$$

$$\arg_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \quad (\text{A.4})$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 1,0e^{-10} \right) \quad (\text{A.5})$$

A viscosidade turbulenta μ_t toma a forma:

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \sqrt{2} S F_2)} \quad (\text{A.6})$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (\text{A.7})$$

$$\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right) \quad (\text{A.8})$$

onde $a_1 = 0,31$ e $S = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$ é valor absoluto do tensor das deformações do campo médio de velocidades.

As diferenças assinaláveis deste modelo residem na existência de um termo adicional na equação de transporte de ω , $(1 - F_1)2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$, designado por termo de difusão cruzada que depende da distância à superfície sólida, em virtude da função F_1 tomar um valor diferente consoante o ponto se encontre na camada limite ou em escoamento livre. Por sua vez, a definição de viscosidade turbulenta é alterada por forma a acomodar o efeito do transporte das tensões viscosas, equação, de onde resultada a denominação *shear stress transport*.

ANEXO B – COEFICIENTES DE DISCRETIZAÇÃO NUMÉRICA

Os coeficientes a_N , a_S , a_E , a_W , a_T e a_B descritos na equação (3.21) são traduzidos em função da condutância D e do caudal mássico F , tal que:

$$a_N = D_n A(|P_n|) + \max[-F_n, 0] \quad (\text{B.1})$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + \max[F_s, 0] \quad (\text{B.2})$$

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \max[-F_e, 0] \quad (\text{B.3})$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + \max[F_w, 0] \quad (\text{B.4})$$

$$a_T = D_t A(|P_t|) + \max[-F_t, 0] \quad (\text{B.5})$$

$$a_B = D_b A(|P_b|) + \max[F_b, 0] \quad (\text{B.6})$$

Para esquema *upwind*, $A(|P_n|) = 1$, logo a condutância D e o caudal mássico F , nas faces do volume de controlo, ficam:

$$F_n = (\rho v)_n \Delta z \Delta x \quad D_n = \frac{\Gamma_n \Delta z \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (\text{B.7})$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta z \Delta x \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta z \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (\text{B.8})$$

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \Delta x \quad D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e} \quad (\text{B.9})$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \Delta z \quad D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y \Delta z}{(\delta x)_w} \quad (\text{B.10})$$

$$F_t = (\rho w)_t \Delta x \Delta y \quad D_t = \frac{\Gamma_t \Delta x \Delta y}{(\delta z)_t} \quad (\text{B.11})$$

$$F_b = (\rho w)_b \Delta x \Delta y \quad D_b = \frac{\Gamma_b \Delta x \Delta y}{(\delta z)_b} \quad (\text{B.12})$$

Por fim, o coeficiente a_P e o termo da fonte b da equação (3.21) tomam a forma

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + a_T + a_B + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{B.13})$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y \Delta z + a_P^0 \phi_P^0 \quad (\text{B.14})$$

onde a_P^0 é o coeficiente da propriedade ϕ no instante t e nó P ,

$$a_P^0 = \frac{\rho_0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (\text{B.15})$$

ANEXO C – ALGORITMO SIMPLE

O algoritmo SIMPLE, *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*, é um processo iterativo para o cálculo dos campos de velocidades e de pressão, aplicável aos escoamentos incompressíveis em regime permanente, e que segue o princípio da malha desfasada.

As várias operações do algoritmo SIMPLE são descritas de seguida.

1. Estimativa inicial do campo de pressões p^* .

2. Determinação das componentes aproximadas da velocidade, u^* , v^* e w^* , baseada em p^* .

Considerando a nomenclatura da Figura 3.3, a discretização numérica de u^* , v^* e w^* fica:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_P^* - p_E^*) A_e + b \quad (\text{C.1})$$

$$a_n u_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_P^* - p_N^*) A_n + b \quad (\text{C.2})$$

$$a_t w_t^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + (p_P^* - p_T^*) A_t + b \quad (\text{C.3})$$

onde a_{nb} diz respeito à influência da difusão e advecção nas interfaces dos volumes de controlo vizinhos. Para um domínio tridimensional, cada somatório $\sum a_{nb} u_{nb}^*$, $\sum a_{nb} v_{nb}^*$ e $\sum a_{nb} w_{nb}^*$ terá seis termos, cada um representativo do transporte da velocidade nas interfaces do volume de controlo. A_e , A_n e A_t representam a área da interface onde o gradiente de pressão atua, pelo que o produto $(p_P^* - p_{nb}^*) A_{nb}$ traduz a força de pressão. Ao contrário da equação (B.13), esta formulação exclui a intervenção da pressão no termo da fonte b , que mantém o significado da equação (B.14).

3. Cálculo da pressão corrigida p' .

A pressão p e as componentes da velocidade u , v e w são agora o resultado da soma do seu valor aproximado em 1) e 2) com um novo valor corrigido pela equação da continuidade:

$$p = p^* + p' \quad (C.4)$$

$$u = u^* + u'; \quad v = v^* + v'; \quad w = w^* + w' \quad (C.5)$$

Desta vez, a discretização numérica para as quantidades corrigidas fica:

$$a_e u'_e = \sum a_{nb} u'_{nb} + (p'_P - p'_E) A_e \quad (C.6)$$

$$a_e v'_n = \sum a_{nb} v'_{nb} + (p'_P - p'_N) A_n \quad (C.7)$$

$$a_e w'_t = \sum a_{nb} w'_{nb} + (p'_P - p'_T) A_t \quad (C.8)$$

Substituindo as equações (C.6), (C.7) e (C.8) em (C.5), as novas componentes da velocidade e da pressão expressam-se como:

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E) \quad (C.9)$$

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_P - p'_N) \quad (C.10)$$

$$w_t = w_t^* + d_t (p'_P - p'_T) \quad (C.11)$$

com $d_e = A_e/a_e$, $d_n = A_n/a_n$ e $d_t = A_t/a_t$.

A equação da continuidade, (3.1), integrada sobre o volume de controlo, (C.12), dá lugar a nova discretização numérica, desta vez de p' em função das restantes variáveis já conhecidas.

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y \Delta z + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta z \Delta x + [(\rho w)_t - (\rho w)_b] \Delta x \Delta y = 0 \quad (C.12)$$

onde ρ_P^0 e ρ_P são a densidade no instante t e $t+\Delta t$, respectivamente.

Substituindo as equações (C.9), (C.10) e (C.11) em (C.12), vem, por fim, a discretização numérica da pressão corrigida p' :

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + a_T p'_T + a_B p'_B + b \quad (C.13)$$

onde

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z; \quad a_W = \rho_w d_w \Delta y \Delta z; \quad a_N = \rho_N d_N \Delta z \Delta x \quad (C.14)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta z \Delta x; \quad a_T = \rho_t d_t \Delta x \Delta y; \quad a_B = \rho_b d_b \Delta x \Delta y$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B \quad (C.15)$$

$$b = \frac{(\rho_p^0 - \rho_p)\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e]\Delta y \Delta z + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n]\Delta z \Delta x + [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t]\Delta x \Delta y \quad (C.16)$$

4. **Determinação de p , pela adição de p^* com p' pela equação (C.4).**
5. **Determinação de u , v e w , pelas equações (C.5).**
6. **Resolução das equações gerais de discretização numérica (3.21) para outras propriedades do escoamento, (quantidades turbulentas, temperatura), tendo em atenção os termos fonte para cada uma delas e usando as componentes de velocidades calculadas em 5).**
7. **Tratamento da pressão p , calculada em 4), como nova estimativa p^* , retornando ao ponto 2).**

Quanto ao tratamento das condições de fronteira, distinguem-se duas situações típicas:

- a) Se a pressão for conhecida e a velocidade for incógnita, então $p^* = p_{cf}$ e $p' = 0$, na fronteira.
- b) Se a normal da velocidade na fronteira for conhecida e a pressão for incógnita, como mostra a Figura C.1, a equação de discretização de p' , (C.13), não deve ser expressa em termos de u_e^* , mas sim em termos de u_e , eliminando o procedimento de correção da velocidade. Pelas equações (C.9), (C.10) e (C.11), $u_e = u_e^*$ e p'_E não existe, logo $a_e = 0$.

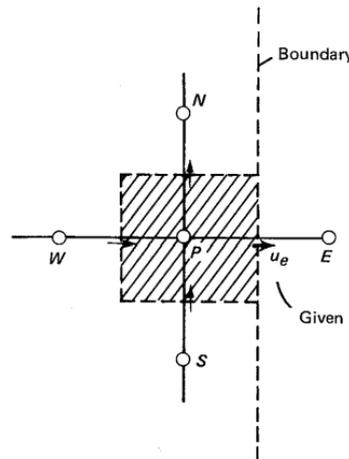


Figura C.1. Fronteira do domínio coincidente com a face e do volume de controle (Patankar, 1980).

No caso em que o escoamento é incompressível e estacionário e em que se conhece a normal da velocidade nas fronteiras, o tratamento da condição de fronteira determina, como foi visto anteriormente, que os coeficientes nas interfaces de fronteira, tais como a_E , serão nulos. Com isto, a equação de p' , (C.13), dependerá apenas dos coeficientes das interfaces interiores ao domínio, não restando informação sobre a pressão absoluta. Assim, tanto p' , como $p' + constante$ são soluções para a equação. Daqui se infere, que o algoritmo SIMPLE se ocupa apenas de valores relativos da pressão, isto é, de variações relativamente a um valor, normalmente igual a zero.

A convergência do cálculo do campo de velocidades é atestada pela verificação da equação da continuidade. O termo fonte b descrito pela equação (C.16) corresponde à discretização numérica da equação da continuidade, para as componentes aproximadas da velocidade u^* , v^* e w^* . Quando $b = 0$, a equação da continuidade é cumprida e a solução para o campo de velocidades é encontrada. De facto, b é o indicador da convergência, é desejável que o seu valor seja progressivamente menor, à medida que aumentam o número de iterações. Na prática é entendido como o resíduo da iteração.

Por fim, é aconselhável aplicar um coeficiente de sub-relaxação nas equações de correção da pressão e da velocidade, a fim de evitar divergência do algoritmo. Por conseguinte, as equações são substituídas por:

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (C.17)$$

$$u = \alpha_u u^* + (1 - \alpha_u) u'; \quad v = \alpha_v v^* + (1 - \alpha_v) v'; \quad w = \alpha_w w^* + (1 - \alpha_w) w' \quad (C.18)$$

ANEXO D – MÉTODO GAMG

O OpenFOAM® corre o método GAMG segundo um ciclo do tipo V (Figura D.1). Segundo Behrens (2009), as várias etapas iterativas podem ser assim sumariadas:

1. É efetuado um número limitado de iterações do método Gauss-Seidel ao nível da malha original, por forma a serem suavizados os erros locais (ilustrado pelo círculo).
2. Dá-se a restrição do problema, na qual a fusão de células da malha fina dá lugar a uma malha mais grossa, com menor número de células (ilustrado pelas linhas com declive negativo). O primeiro e segundo passos podem repetir-se, caso seja do interesse engrossar ainda mais a malha.
3. As correções dos erros globais são realizadas ao nível da malha mais grosseira, através de um ciclo *multigrid* (ilustrado por um quadrado).
4. As correções da etapa 3) são interpoladas, por forma a serem transmitidas a uma malha mais refinada e incluídas na solução de ϕ nesse estágio (ilustrado pela linha com declive positivo).
5. O ciclo *multigrid* introduz erros locais que devem ser eliminados quando a malha retorna ao seu estado mais refinado, num processo que se diz de pós-relaxação (ilustrado pelo triângulo).

A Figura D.2 ilustra um exemplo do processo de aglomeração geométrica dos volumes de controlo finitos. A partir de uma malha dividida em seis células com diferentes dimensões, o algoritmo GAMG procede, por etapas, à aglomeração de células vizinhas, duas a duas, priorizando os conjuntos de duas células com maior peso na malha, um critério que se diz geométrico.

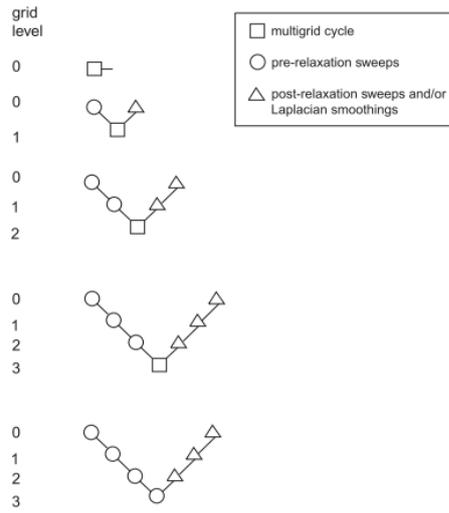


Figure 25.6.1: V-Cycle Multigrid

Figura D.1. Ciclo em V do método GAMG dividido em ciclo do método *multigrid* (quadrado), iterações de suavização (círculo) e equações de pós-relaxação (triângulo) por (Behrens, 2009).

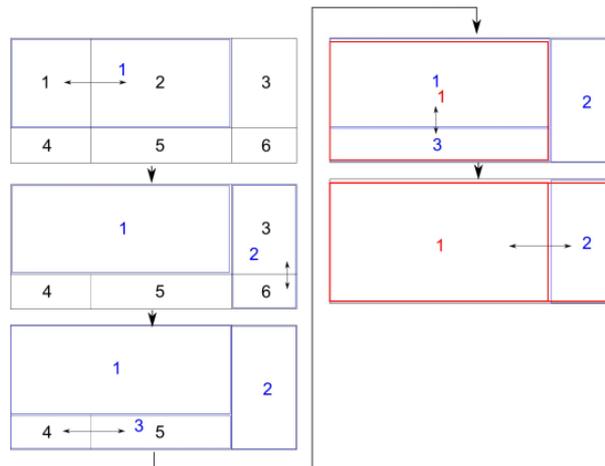


Figura D.2. Aglomeração geométrica dos volumes de controlo no método GAMG por (Behrens, 2009).

ANEXO E – RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA A MODELAÇÃO NUMÉRICA DE VENTILAÇÃO NATURAL

Parâmetros	Frank et al. (2007)	Ramponi e Blocken (2012)
<i>Domínio computacional</i>		
<i>Extensão Vertical</i> H_D	$H_D \geq 5H_M$ ou, pelo critério do efeito de bloqueio aerodinâmico, $H_D \geq 4H_M$ para pequenas razões de bloqueio e $H_D \geq 10H_M$ para elevadas razões de bloqueio. Se a simulação replicar os ensaios experimentais em túneis de vento, H_D deve ser igual à altura da secção de teste.	A diminuição da secção transversal do domínio computacional, $W_D \times H_D$, faz aumentar irrealisticamente a velocidade no interior do espaço ventilado, bem como os caudais de ventilação. Existe uma boa correlação com as observações experimentais quando $W_D = H_D \geq 3H$
<i>Extensão Transversal</i> W_D	$W_D/H_D \approx W_M/H_H$ Se a simulação replicar os ensaios experimentais em túneis de vento, W_D deve ser igual à largura da secção de teste.	
<i>Extensão Longitudinal</i> $L_{in \rightarrow D}$ e $L_{D \rightarrow out}$	$L_{in \rightarrow D} \geq 5H_M$ se forem conhecidos os perfis de velocidade de aproximação, $L_{in \rightarrow D} \geq 8H_M$ se esses não forem conhecidos. $L_{in \rightarrow out} \geq 15H_M$	
<i>Discretização Espacial (malha)</i>	Evitar compressão/alongamento da malha em regiões que registam elevados gradientes. Razão de expansão $\leq 1,2$. A normal da face de uma célula deve ser paralela à linha que une os nós de duas células vizinhas. Células hexaédricas preferencialmente.	Um número insuficiente de células prejudica a acurácia da distribuição de velocidade no interior do espaço ventilado e os caudais de ventilação.
<i>Condições de fronteira</i>		
<i>Entrada</i>	Prescrever um perfil logarítmico de velocidades e restantes propriedades de turbulência (k , ε e ω) em	

		concordância com esse perfil. Gradiente de pressão nulo. Exemplo: $u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right)$	
<i>Laterais Superior</i>	<i>e</i>	Condição de escorregamento, velocidade e intensidade de turbulência fixas ou condição de simetria, garantindo neste último caso que a fronteira superior está fora da camada limite. Se a simulação replicar os ensaios experimentais em túneis de vento e se a seção for fechada por paredes sólidas, as laterais e parte superior devem ser tratadas como superfícies sólidas sem escorregamento.	
<i>Saída</i>		Pressão estática constante e restantes variáveis com gradiente nulo.	
<i>Superfícies sólidas</i>		Se $30 \leq y^+ \leq 300$, usar funções de parede. Se $y^+ \leq 5$, usar o método <i>low-Reynolds-number</i>	
<i>Modelo de Turbulência</i>			<i>k</i> – ω SST e <i>k</i> – ε RNG com desempenho muito superior relativamente a <i>k</i> – ε standard, <i>k</i> – ε realizable e RMS, no cálculo da velocidade no interior do espaço e dos caudais de ventilação. <i>k</i> – ω SST com excelente correlação com os dados experimentais.
<i>Esquema de discretização numérica</i>	<i>de</i>	Preferência por esquemas de discretização de segunda ordem.	
<i>Critério de convergência</i>	<i>de</i>	Resíduos $\leq 1 \times 10^{-3}$ e oscilação das propriedades em torno de um valor médio.	Resíduos $\leq 1 \times 10^{-3}$

