



Maria João da Costa Branco

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

**Simulação Numérica de Camada Limite
Atmosférica no Estudo da Interação
Aerodinâmica pela Ação do Vento em Edifícios**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof. Doutora Diana Filipa da Conceição Vieira,
Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de
Lisboa

Júri

Presidente: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias
Arguente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril, 2020

Simulação Numérica de Camada Limite Atmosférica no Estudo da Interação Aerodinâmica pela Ação do Vento em Edifícios

Copyright © Maria João da Costa Branco, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não seria possível sem o apoio, das mais variadas formas, de muita gente.

Primeiro gostaria de agradecer à minha orientadora Professora Doutora Diana Vieira pelo carinho, paciência, calma nos momentos de pânico e pela partilha de conhecimentos, sem tudo isto teria sido impossível realizar este trabalho.

Gostaria também de agradecer à minha família pelo apoio incondicional em todas as fases desta dissertação.

Aos meus colegas, amigos e segunda família que encontrei nesta faculdade, com quem passei estes últimos cinco anos lado a lado.

Aos meus amigos que, mesmo a quem eu não consiga explicar esta dissertação, fizeram questão de me apoiar.

Done is the new perfect.

RESUMO

A rugosidade aerodinâmica, quer seja ela de origem humana, como por exemplo edifícios, ou de origem natural como árvores, tem uma influência no vento e cria assim a Camada Limite Atmosférica (CLA).

Nesta dissertação apresenta-se um estudo numérico para a interação entre a CLA gerada e um cubo, por forma a representar um edifício. Para a criação da CLA utilizam-se tanto os perfis de velocidade como os parâmetros da rugosidade aerodinâmica disponível no Eurocódigo 1 (EC1). Serão realizados dois casos de estudo, terreno do tipo I e II.

A simulação numérica é realizada no *software* comercial ANSYS Fluent 16.0 e são analisados os resultados de três modelos de turbulência, modelo $k - \varepsilon$ *standard*, $k - \varepsilon$ *realizable* e $k - \omega$ SST.

Antes de se realizar as simulações dos dois casos de estudo com os três modelos de turbulência escolhidos, primeiro foram realizadas as simulações em domínio vazio e analisou-se a estabilidade de vários parâmetros ao longo do domínio computacional.

Após a conclusão do estudo verificou-se que apesar dos resultados serem satisfatórios quando comparados com os documentados na bibliografia, o ANSYS Fluent apresenta algumas limitações na simulação deste tipo de escoamento. Nomeadamente na capacidade de estabilidade das condições impostas na entrada do domínio computacional, e passando por não reproduzir corretamente a flutuabilidade periódica da esteira do edifício.

Palavras-chave: Simulação numérica, ANSYS Fluent, Camada limite atmosférica (CLA), Ação do vento em edifícios

ABSTRACT

Aerodynamic roughness, whether of human origin, such as buildings, or of natural origin such as trees, has an influence on the wind and thus creates the Atmospheric Boundary Layer (ABL).

This dissertation presents a numerical study for the interaction between the generated ABL and a cube, in order to represent a building. For the creation of the ABL, both the velocity profiles and the aerodynamic roughness parameters available in Eurocode 1 (EC1) are used. Two case studies will be carried out, terrain type I and II.

The numerical simulation is carried out in the commercial software ANSYS Fluent 16.0 and the results of three turbulence models are analyzed, model $k - \varepsilon$ standard, $k - \varepsilon$ realizable and $k - \omega$ SST.

Before simulating the two case studies with the three chosen turbulence models, simulations were first carried out in an empty domain and the stability of several parameters was analyzed throughout the computational domain.

After the conclusion of the study, it was found that despite the results being satisfactory when compared to those documented in the bibliography, ANSYS Fluent has some limitations in the simulation of this type of flow. Namely in the capacity of stability of the conditions imposed in the entrance of the computational domain, and passing for not correctly reproducing the periodic buoyancy of the building's wake.

Keywords: Numerical simulation, ANSYS Fluent, Atmospheric Boundary Layer (ABL), Wind action on buildings

ÍNDICE

| | |
|--|--------------|
| Lista de Figuras | xvii |
| Lista de Tabelas | xxi |
| Listagens | xxiii |
| Siglas | xxv |
| Símbolos | xxvii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Contextualização | 1 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Descrição Geral da Dissertação | 2 |
| 2 Camada Limite Atmosférica | 3 |
| 2.1 Caracterização Geral | 3 |
| 2.2 Estabilidade de Camada Limite | 4 |
| 2.3 Equações da Aplicação na Camada Limite Atmosférica | 6 |
| 2.4 Perfil de Velocidades e Rugosidade Aerodinâmica | 8 |
| 2.5 Turbulência | 10 |
| 3 Escoamento em Torno de Edifícios | 13 |
| 3.1 Caracterização Geral | 13 |
| 3.2 Coeficientes de Pressão | 16 |
| 4 Eurocódigo 1 | 17 |
| 4.1 Introdução | 17 |
| 4.2 Perfil de Velocidade Médio | 17 |
| 4.2.1 Coeficiente de Orografia | 18 |
| 4.2.2 Velocidade de Referência do Vento | 18 |
| 4.2.3 Coeficiente de Rugosidade | 18 |
| 4.3 Turbulência do Vento | 20 |
| 4.4 Coeficientes de Pressão | 20 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.4.1 | Paredes Verticais de Edifícios de Planta Rectangular | 21 |
| 4.4.2 | Coberturas em Terraço | 24 |
| 5 | Modelo Computacional | 27 |
| 5.1 | Metodologia | 27 |
| 5.2 | Geometria | 28 |
| 5.3 | Malha | 30 |
| 5.3.1 | Tipos de Malha | 30 |
| 5.3.2 | Qualidade de Malha | 31 |
| 5.3.3 | Tratamento da Malha Perto de Paredes | 33 |
| 5.4 | Modelos de Turbulência | 37 |
| 5.4.1 | Introdução | 37 |
| 5.4.2 | RANS | 37 |
| 5.4.3 | LES | 44 |
| 5.4.4 | DES | 46 |
| 5.5 | Condições de fronteira | 47 |
| 5.6 | <i>Solver</i> | 49 |
| 6 | Caso de Estudo | 51 |
| 6.1 | Introdução | 51 |
| 6.2 | Domínio Computacional | 51 |
| 6.3 | Malha | 52 |
| 6.4 | <i>Setup</i> | 56 |
| 6.5 | Casos a Analisar | 58 |
| 7 | Resultados e Discussão | 59 |
| 7.1 | Introdução | 59 |
| 7.2 | Terreno tipo I | 59 |
| 7.2.1 | Estabilidade da Camada Limite Atmosférica (CLA) | 59 |
| 7.2.2 | Verificação de y^+ | 64 |
| 7.2.3 | Campo de Velocidades | 68 |
| 7.2.4 | Comprimentos de Recirculação | 70 |
| 7.2.5 | Coefficientes Pressão | 74 |
| 7.3 | Terreno tipo II | 80 |
| 7.3.1 | Estabilidade da CLA | 80 |
| 7.3.2 | Verificação de y^+ | 84 |
| 7.3.3 | Campo de Velocidades | 88 |
| 7.3.4 | Comprimentos de Recirculação | 90 |
| 7.3.5 | Coefficientes Pressão | 93 |
| 8 | Conclusões e Recomendações | 97 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| Bibliografía | 99 |
| Anexos | 105 |
| I UDF - Terreno tipo I e II | 105 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Regiões da Camada Limite Atmosférica (adaptado de [42]) | 4 |
| 2.2 | Razão altura/temperatura na estabilidade da CLA (adaptado de [12]) | 5 |
| 2.3 | Intensidade de movimento da massa de ar na estabilidades da CLA (adaptado de [12]) | 5 |
| 2.4 | Ordens de grandeza no espaço e tempo para os diferentes tipos de movimento na atmosfera [12] | 6 |
| 2.5 | Altura máxima da CLA | 8 |
| 2.6 | Efeito da rugosidade aerodinâmica no perfil de velocidade do vento [42] | 9 |
| 2.7 | Exemplo de uma medição de velocidade num escoamento turbulento [58] | 11 |
| 3.1 | Escoamento laminar em torno de uma placa plana com arestas vivas com variação de Re [49] | 13 |
| 3.2 | Escoamento em torno de um paralelepípedo com $b/h = 0,4$ e $Re = 200$ [37] | 14 |
| 3.3 | Representação do efeito do St na zona de recirculação [3] | 14 |
| 3.4 | Escoamento em trono de um paralelepípedo [49] | 15 |
| 3.5 | Comportamento do escoamento com vários perfis incidentes num cubo [10] | 15 |
| 3.6 | Variação do Coeficiente de Pressão (CP) na face frontal com diferentes perfis incidentes num cubo [2] | 16 |
| 4.1 | Perfil de velocidade para cada categoria de terreno com $\bar{U}_b = 10[m s^{-1}]$ e $c_o = 1$ (adaptado de [27]) | 19 |
| 4.2 | Planta de um edifício rectangular e paredes verticais | 21 |
| 4.3 | Representação gráfica do cálculo de c_{pe} segundo o Eurocódigo 1: Ações em estruturas - Ações do vento (EC1) [13] | 21 |
| 4.4 | Uniformização de perfil de pressões aplicadas em edifícios [13] | 22 |
| 4.5 | Designação das zonas em paredes verticais [13] | 23 |
| 4.6 | Bordo de uma cobertura em terraço [13] | 24 |
| 4.7 | Designação das zonas em coberturas em terraço [13] | 24 |
| 5.1 | Geometria genérica do domínio computacional com modelo cúbico de lado L | 29 |
| 5.2 | Geometrias primitivas | 30 |
| 5.3 | Malhas estruturadas e não estruturadas | 30 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.4 | Ângulos internos de um triângulo e quadrado para o parâmetro adimensional distorção (<i>skewness</i>) e o seu range | 31 |
| 5.5 | Ortogonalidade (<i>orthogonality</i>) | 32 |
| 5.6 | Alongamento (<i>aspect ratio</i>) | 32 |
| 5.7 | Gradiente de velocidade perto de paredes | 33 |
| 5.8 | Capacidade das funções de parede (<i>wall functions</i>) | 33 |
| 5.9 | Divisão do escoamento perto da parede [63] | 34 |
| 5.10 | Gráfico das funções de parede (<i>wall functions</i>) | 34 |
| 5.11 | Lei de Parede para superfícies lisas e grão de areia (<i>sand-grain</i>) com a variação de K_S^+ [5] | 35 |
| 5.12 | Relação entre a altura do centróide da primeira célula, y_p , e a altura da rugosidade aerodinâmica, k_S | 36 |
| 5.13 | Ilustração da instabilidade no desenvolvimento da CLA [4] | 37 |
| 5.14 | Tipos de <i>eddys</i> presentes num escoamento turbulento (adaptado de [14]) | 45 |
| 5.15 | Ilustração do modelo de turbulência DES (adaptado de [42]) | 46 |
| 5.16 | Faces do domínio computacional | 47 |
| 6.1 | Domínio computacional | 52 |
| 6.2 | Geometria Malha 1 | 54 |
| 6.3 | Geometria Malha 2 | 54 |
| 6.4 | Malha 2 | 54 |
| 6.5 | Malha 2 - Crescimento das células junto ao cubo | 55 |
| 6.6 | Qualidade da malha 2 | 56 |
| 6.7 | Condições de fronteira nas faces do domínio computacional | 56 |
| 7.1 | Planos utilizados para os testes de estabilidade | 60 |
| 7.2 | Plano $X=28L$ - variação da energia cinética turbulenta na faixa $1 < Z/L < 3$ | 61 |
| 7.3 | Representação gráfica | 64 |
| 7.4 | y^+ - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 65 |
| 7.5 | y^+ - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 66 |
| 7.6 | y^+ - Modelo $k - \omega$ SST | 67 |
| 7.7 | Planos intermédios do cubo | 68 |
| 7.8 | Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 70 |
| 7.9 | Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 71 |
| 7.10 | Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 71 |
| 7.11 | Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 72 |

| | |
|---|----|
| 7.12 Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo I - Modelo $k - \omega$ SST | 72 |
| 7.13 Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo I - Modelo $k - \omega$ SST | 73 |
| 7.14 Planificação do cubo | 74 |
| 7.15 C_p - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 76 |
| 7.16 C_p - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 77 |
| 7.17 C_p - Terreno Tipo I - Modelo $k - \omega$ SST | 78 |
| 7.18 Coeficientes de pressão [46] | 79 |
| 7.19 y^+ - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 85 |
| 7.20 y^+ - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 86 |
| 7.21 y^+ - Modelo $k - \omega$ SST | 87 |
| 7.22 Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo II - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 90 |
| 7.23 Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo II - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 91 |
| 7.24 Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo II - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 91 |
| 7.25 Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo II - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 92 |
| 7.26 Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo II - Modelo $k - \omega$ SST | 92 |
| 7.27 Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo II - Modelo $k - \omega$ SST | 93 |
| 7.28 C_p - Terreno Tipo II - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> | 94 |
| 7.29 C_p - Terreno Tipo II - Modelo $k - \varepsilon$ <i>Realizable</i> | 95 |
| 7.30 C_p - Terreno Tipo II - Modelo $k - \omega$ SST | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Categorias e parâmetros de terreno [13] | 19 |
| 4.2 | Valores recomendados dos c_{pe} para paredes verticais de edifícios de planta rectangular [13] | 24 |
| 4.3 | Valores recomendados dos c_{pe} para cobertura em terraço [13] | 25 |
| 5.1 | Tamanho do domínio computacional | 29 |
| 5.2 | Modelos de turbulência RANS com base no número de equações extra [58] . | 38 |
| 7.1 | Estabilidade - Terreno Tipo I | 62 |
| 7.2 | Campo de Velocidades - Terreno Tipo I | 69 |
| 7.3 | Comparação resultados com Hoxey et al.(2002) [21] | 73 |
| 7.4 | Estabilidade - Terreno Tipo II | 82 |
| 7.5 | Campo de Velocidades - Terreno Tipo II | 89 |

LISTAGENS

| | | |
|-----|---|-----|
| I.1 | Função definida pelo utilizador, do inglês <i>User-Defined Function</i> (UDF) - Terreno tipo I | 105 |
| I.2 | UDF - Terreno tipo II | 107 |

SIGLAS

| | |
|---------|--|
| CAD | Desenho Assistido por Computador, do inglês <i>Computational Aided Design</i> |
| CFD | Dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês <i>Computational Fluids Dynamic</i> |
| CLA | Camada Limite Atmosférica |
| CLC | Camada Limite Convectiva |
| CP | Coeficiente de Pressão |
| CWE | Engenharia Computacional do Vento, do inglês <i>Computational Wind Engineering</i> |
| DES | <i>Detached Eddy Simulation</i> |
| DNS | Simulação Numérica Direta, do inglês <i>Direct Numerical Simulation</i> |
| EC1 | Eurocódigo 1: Ações em estruturas - Ações do vento |
| FCT-UNL | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa |
| LES | <i>Large Eddy Simulation</i> |
| LMFTA | Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada |
| MDF | Método das Diferenças Finitas |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MVF | Método dos Volumes Finitos |
| PISO | <i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i> |
| QUICK | <i>Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics</i> |
| RANS | <i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i> |
| RB | Rácio de Blocagem |
| RNG | Método <i>Renormalization Group</i> |

SIGLAS

| | |
|---------|---|
| RSM | <i>Reynolds Stress Model</i> |
| SGS | <i>Subgrid-Scale Model</i> |
| SIMPLE | <i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i> |
| SIMPLEC | <i>SIMPLE-Consistent</i> |
| SST | <i>Shear-Stress Transport</i> |
| UDF | Função definida pelo utilizador, do inglês <i>User-Defined Function</i> |
| UDS | Escalar definido pelo utilizador, do inglês <i>User-Defined Scalar</i> |
| URANS | <i>Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> |
| WALE | <i>Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity</i> |

SÍMBOLOS

| | |
|--|---|
| A | Área da superfície carregada |
| A_i | Área da célula i vizinha |
| α | Expoente da lei de potência |
| α_k e α_ε | Números de Prandtl inversos para k e ε , respectivamente |
| α_s | constante definida pelo tipo de turbilhão presente no escoamento |
| \vec{A} | Vector da área da superfície do volume de controlo |
| b | Comprimento entre as faces laterais do edifício |
| B | Constante de integração |
| $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ | Constantes |
| c_{dir} | Coefficiente de direção do vento |
| c_i | Vector desde o centróide da célula ao meio do centróide da célula vizinha |
| $c_o(z)$ | Coefficiente de orografia em função da altura |
| c_{pe} | Coefficiente de pressão exterior |
| $c_{pe,1}$ | Coefficiente de pressão exterior local |
| $c_{pe,10}$ | Coefficiente de pressão exterior global |
| $c_r(z)$ | Coefficiente de rugosidade em função da altura |
| C_S | Coefficiente de correção disponível no <i>ANSYS Fluent</i> que varia entre $0 < C_S \leq 1$ |
| c_{season} | Coefficiente de sazão |
| D | Domínio computacional |
| ΔB | Função de rugosidade |
| D_ω | Termo de difusão de mistura (<i>Cross-diffusion term</i>) |
| E | Constante empírica de valor 9,793 |
| f | Coefficiente de Coriolis |
| F_1 e F_2 | Funções pertencentes ao modelo SST $k - \omega$ |

SÍMBOLOS

| | |
|------------------------------|---|
| f_i | Vector desde o centróide da célula ao meio da aresta da célula vizinha |
| g | Aceleração da gravidade |
| G | Função filtro no modelo de turbulência LES |
| Γ_ϕ | Coeficiente de difusão da variável ϕ |
| Γ_k e Γ_ω | Difusividade de k e ω , respectivamente |
| G_b | Produção de energia cinética turbulenta devido flutuabilidade |
| G_k | Produção de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade |
| G_ω | Produção de ω |
| h | Altura do edifício |
| h_g | Altura máxima da Camada Limite Atmosférica |
| I | Intensidade de turbulência |
| $I_v(z)$ | Intensidade de turbulência em função da altura |
| k | Energia cinética turbulenta |
| κ | Constante de Von Karman |
| K_S^+ | Rugosidade equivalente grão de areia (<i>sand-grain</i>) adimensional |
| k_r | Factor do tipo de terreno |
| k_S | Rugosidade aerodinâmica |
| l | Comprimentos de escala (<i>Length scales</i>) |
| L | Comprimento característico |
| λ | Latitude da Terra |
| μ | Viscosidade dinâmica do fluido |
| μ_t | Viscosidade turbulenta |
| μ_{t0} | Viscosidade turbulenta calculada sem ter em conta os turbilhões |
| ∇_ϕ | Gradiente de ϕ |
| N_S | Frequência da libertação dos vórtices |
| ν | Viscosidade cinemática do fluido |
| ω | Taxa de dissipação específica |
| Ω | Velocidade angular |
| Ω_t | Característica do turbilhão |

| | |
|--------------------------------|--|
| p | Pressão |
| p_0 | Pressão estática local num ponto não perturbado a montante do escoamento |
| p_s | Pressão estática local na superfície do objeto |
| q | Humidade específica |
| $q_p(z)$ | Pressão dinâmica em função da altura |
| Re | Número de Reynolds |
| ρ | Massa volúmica |
| \vec{r} | Vector que vai do centro do volume de controlo para o centro do volume de controlo vizinho |
| S | Magnitude da taxa de deformação |
| Σ | Superfície do volume de controlo |
| σ_{ij} | Tensor devido à viscosidade molecular |
| σ_k e σ_ϵ | Números de Prandtl turbulentos |
| S_k, S_ϵ e S_ω | Termos fonte definidos pelo utilizador |
| S_ϕ | Termo fonte de ϕ por unidade de volume |
| St | Número de Strouhal |
| T | Temperatura |
| τ_{ij} | <i>Subgrid-scale Reynolds stress</i> |
| τ_u, τ_v e τ_w | Tensões de corte das componentes $u, v, e w$, respectivamente |
| θ_e | Ângulo interno de uma célula equilátera |
| θ_{max} | Maior ângulo interno de uma célula |
| θ_{min} | Menor ângulo interno de uma célula |
| \tilde{G}_k | Geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade |
| u_* | Velocidade de atrito |
| $\overline{U}_{b,0}$ | Valor básico da velocidade de referência do vento |
| \bar{u} | Velocidade característica |
| \overline{U} | Velocidade média |
| \overline{U}_{ref} | Velocidade média de referência |
| \overline{U}_b | Velocidade de referência do vento |
| V | Volume de controlo |
| \vec{v} | Vector de velocidade |

SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|---|
| Y_k e Y_ω | Dissipação de k e ω devido à turbulência |
| Y_M | Contribuição da flutuabilidade na compressão de turbulência na taxa de dissipação geral |
| y_p | Distância do centro do primeiro elemento à parede |
| y^+ | Distância à parede adimensional |
| z | Altura a partir da superfície terrestre |
| z_0 | Altura da rugosidade aerodinâmica |
| z_{max} | Altura máxima a partir do solo |
| z_{min} | Altura mínima a partir do solo |
| z_{ref} | Altura de referência |

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A engenharia do vento será melhor descrito como o estudo da "interação entre o vento na camada limite atmosférica e o Homem e o seu trabalho na superfície da Terra"[8]. Esta área de estudo pode necessitar da aplicação dos conhecimentos da mecânica dos fluídos, mecânica estrutural, meteorologia e aerodinâmica, para que seja possível estudar desde a dispersão de partículas de poluição no ar e da sua deposição, o efeito das cargas do vento nos edifícios, alterações meteorológicas devido ao vento, ventilação de edifícios, o conforto pedestre no meio urbano e, o mais importante neste trabalho, o estudo da alteração da direção do vento em áreas urbanas devido a edifícios e outros elementos de rugosidade aerodinâmica e os seus efeitos em edifícios.

Dentro da área do Dinâmica dos Fluídos Computacional, do inglês *Computational Fluids Dynamic* (CFD), existe um ramo para o estudo do vento na CLA denominado por Engenharia Computacional do Vento, do inglês *Computational Wind Engineering* (CWE), que tem crescido nos últimos 30 anos com o desenvolvimento do poder computacional, quer em memória computacional como em velocidade de processamento. Apesar do desenvolvimento de CFD, ainda nos dias de hoje há uma predominância dos estudos feitos no túnel de vento em relação aos testes feitos em CFD.

Os ensaios em túnel de vento tem limitações que não se encontram em CWE, como exemplo, os ensaios são estrangidos relativamente à configuração da montagem do objeto de estudo, quer seja pela direção do vento, pelo tamanho do túnel, obrigando muitas vezes a realizar escalas do objeto de estudo. Durante uma investigação é muitas vezes necessário fazer alterações e ajustes do objeto de estudo, sendo mais dispendioso monetariamente e em termos de tempo num estudo realizado no túnel de vento do que realizar as alterações em computador. É necessário ter em consideração uma outra vantagem, que

a nível computacional não há restrição da localização da extração de informação dentro do domínio de estudo.

A área de CFD apareceu para dar resposta a imensos problemas com fluidos de engenharia que não seria possível de resolver de outra forma. O CFD fornece várias ferramentas necessárias para o estudo de sistemas que envolve escoamentos complexos de fluidos, transferência de calor e fenómenos associados como reações químicas, tudo isto a partir de simulação numérica em computador e tem as mais variadas aplicações como aerodinâmica nas várias áreas, hidrodinâmica, escoamento dentro de turbomáquinas, dispersão e deposição de partículas poluentes, entre muitos outros.

1.2 Objetivos

Para esta dissertação o objetivo é criar uma base para o estudo da interação do vento com um edifício a partir de simulação numérica com um *software* comercial, *ANSYS Fluent*.

Nesta simulação numérica os perfis de velocidade serão programados a partir da informação disponível no EC1 e ter-se-á em atenção os efeitos da rugosidade aerodinâmica de dois tipos de terreno, I e II, na criação da CLA.

Para cada tipo de terreno serão realizadas três simulações, cada uma com um modelo de turbulência diferente mas com os restantes parâmetros constantes.

Assim numa primeira fase é necessário criar e avaliar a estabilidade do domínio computacional, onde se irão desenvolver os casos de estudo, para depois se fazer os testes no domínio com o cubo.

1.3 Descrição Geral da Dissertação

Após o primeiro capítulo desta dissertação, onde se encontra a introdução, dá-se uma contextualização da camada limite atmosférica. Aqui serão referidos aspectos importantes para a causa deste trabalho, desde a estabilidade de camada, as suas equações e a influência da turbulência.

De seguida, o capítulo três refere-se o escoamento em torno de edifícios e as suas características mais importantes.

No capítulo quatro encontra-se descrito o Eurocódigo 1: Ações em estruturas - Ações do vento (EC1) e os parâmetros a utilizar para esta dissertação.

Toda a teoria necessária para criar a simulação numérica encontra-se no capítulo 5, desde a metodologia, à malha, modelos de turbulência e o restante *setup*.

Conjugando toda a informação dos capítulos até aqui referidos, encontra-se no capítulo 6 a descrição do caso de estudo e todas as decisões tomadas.

Uma vez o modelo computacional completamente descrito, os resultados do caso de estudo e a sua discussão encontram-se no capítulo 7.

Esta dissertação acaba no capítulo 8 com um pequeno resumo dos resultados que daqui se retiram e com algumas sugestões de trabalhos futuros.

CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

2.1 Caracterização Geral

O conceito da camada limite apareceu com William Froude no início de 1870, ao estudar o atrito de uma placa plana fina ao ser arrastada em água parada, mas o termo em si foi primeiramente introduzido por Ludwig Prandtl em 1904 [41], ao estudar o escoamento de um fluido de baixa viscosidade perto de uma parede onde deu a conhecer pela primeira vez a definição de Camada Limite Atmosférica (CLA). Prandtl explicou que o efeito do atrito era a causa para que o fluido aderisse à superfície, ou seja descreveu a condição de não escorregamento na superfície, e que os efeitos de atrito apenas eram expressos na camada limite, uma região muito fina perto da superfície. Fora da camada limite, o escoamento poderia continuar-se a considerar fluido invíscido.

Aplicando estes conhecimentos ao estudo do vento, é possível definir a CLA como "a camada de ar acima da superfície terrestre onde os efeitos de atrito, de aquecimento e de arrefecimento, variam ao longo do dia, e onde os fluxos de momento, calor ou matéria descrevem movimentos turbulentos com ordens de grandeza que podem variar entre a altura da camada limite atmosférica ou menores"[18].

É possível dividir a CLA em duas zonas principais, a região exterior e a região interior (figura 2.1). A transição entre estas duas camadas é difícil de definir, desta forma diz-se que existe uma zona de sobreposição das duas.

A região exterior é onde a rugosidade da superfície tem pouca influência no escoamento, por outro lado, as forças de Coriolis, devido à rotação da Terra, e os efeitos dos gradientes de pressão são os dois fenómenos dominantes. Esta região também pode ser referida como a camada de Ekman.

A região interior é a camada mais próxima da superfície terrestre e é sensível à rugosidade da superfície terrestre e aos gradientes de temperatura. Esta pode ser dividida em

duas zonas, a subcamada rugosa interfacial (onde se insere a rugosidade aerodinâmica) e a *inertial sublayer* (que ainda é influenciada pela rugosidade aerodinâmica mas não tem nela qualquer obstáculo). É necessário ter em consideração que na subcamada *interfacial sublayer* não há uma direção geral do vento mas sim muitas direções locais do vento devido aos obstáculos, querem sejam estes de origem humana (por exemplo, edifícios) ou de origem natural (por exemplo, árvores), e cria assim canais de vento.

Daqui retira-se que altura da CLA pode variar com as condições atmosféricas e com o tipo de rugosidade terrestre e, desta forma, pode ir desde poucas centenas de metros a vários quilómetros de altura, a partir da superfície terrestre.



Figura 2.1: Regiões da Camada Limite Atmosférica (adaptado de [42])

2.2 Estabilidade de Camada Limite

Devido ao ciclo diário de aquecimento e arrefecimento terrestre e à presença de nuvens, estas alteram não só a altura da CLA como a estrutura turbulenta da mesma. Desta forma a CLA pode apresentar-se em três estados de estabilidade: neutra, estável e instável. Estes três estados encontram-se ilustrados na figura 2.3.

Considere-se uma massa de ar que ao ascender na atmosfera, é de esperar que com a diminuição de pressão com a altitude esta sofra uma expansão e que, por sua vez, diminuía a temperatura, e vice-versa (ver figura 2.3, imagem do lado esquerdo). Caso a variação de temperatura decresça com a altitude da atmosfera na mesma razão, existe um equilíbrio entre as partículas e então tem-se que a CLA atinge uma estabilidade neutra, como se demonstra a azul na figura 2.2. Neste caso, a turbulência existente na atmosfera deve-se unicamente à rugosidade aerodinâmica presente na superfície da terra.

A condição instável, onde a CLA pode também denominar-se por Camada Limite Convectiva (CLC), ocorre devido ao aquecimento da superfície terrestre pelo sol, onde se que criam plumas térmicas, fazendo com que a diferença de temperatura com a altitude

seja maior como se demonstra laranja na figura 2.2, e assim o movimento de subida ou de descida da massa de ar será intensificado (figura 2.3).

Por outro lado, durante a noite (principalmente se não existirem nuvens) a superfície terrestre está a arrefecer e a emitir o calor para o espaço, donde a variação da temperatura com a altitude é menor (a verde na figura 2.2) e assim o movimento da massa de ar é reduzido (figura 2.3). [6, 12, 18, 42]

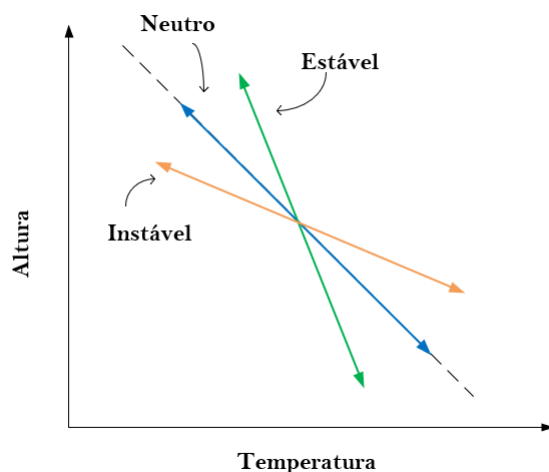


Figura 2.2: Razão altura/temperatura na estabilidade da CLA (adaptado de [12])

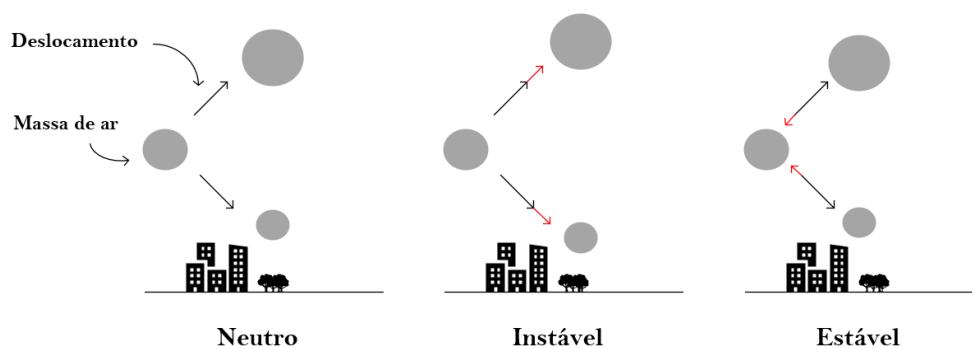


Figura 2.3: Intensidade de movimento da massa de ar na estabilidades da CLA (adaptado de [12])

Para o tratamento deste caso de estudo, é necessário fazer simplificações da CLA, de outra forma não é possível a resolução das equações (descritas na secção 2.3).

A primeira consideração necessária a fazer é que a CLA está na condição neutra, assim trata-se de um problema adiabático e toda a turbulência é apenas criada pela rugosidade aerodinâmica e não pelas correntes de convecção (quer sejam elas positivas ou negativas). A segunda consideração é que se trata de um fluido incompressível.

Estas duas considerações não irão afetar os resultados, uma vez que os mesmos serão realizados com base nas normas portuguesas do Eurocódigo 1: Ações em estruturas - Ações do vento (EC1) que tratam as ações do vento como uma força nos edifícios e, uma vez que

a ordem de grandeza da turbulência criada pela convecção térmica (aproximadamente 10^3 a 10^4 [m], como é visível na figura 2.4) é muito superior ao domínio computacional em estudo (aproximadamente entre 10^{-1} a 10^2 [m], como será referido na secção 5.2), os efeitos provocados pela convecção térmica desta não seriam visíveis.

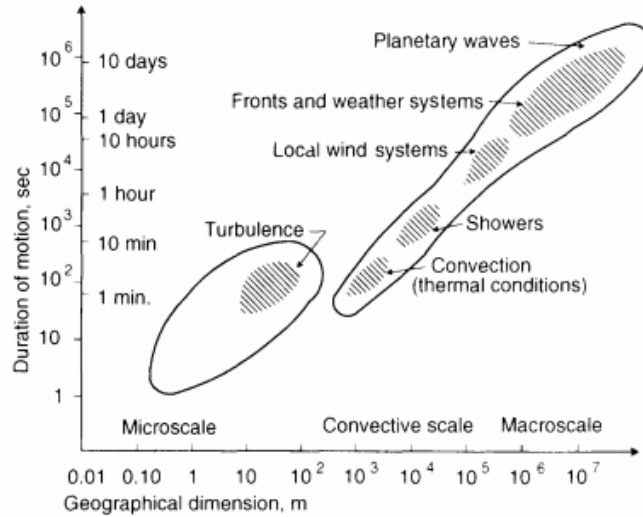


Figura 2.4: Ordens de grandeza no espaço e tempo para os diferentes tipos de movimento na atmosfera [12]

2.3 Equações da Aplicação na Camada Limite Atmosférica

As equações necessárias para definir a CLA são [18]:

- As três equações de conservação da quantidade de movimento, isto é, as equações de Navier-Stokes;
- Uma equação para a conservação de massa (a equação da continuidade);
- Uma equação para a conservação de energia térmica (a equação da entalpia);
- Uma equação para a conservação de vapor de água;
- Uma equação de estado (a lei dos gases ideal).

Este sistema de sete equações descreve a dependência das variáveis espaciais x, y, z e temporal e t com as variáveis da CLA, u, v, w (componentes longitudinal, transversal e vertical da velocidade), ρ (massa volúmica do ar), T (temperatura), q (humidade específica) e p (pressão).

Considerando as simplificações ditas anteriormente, as equações necessárias para definir o movimento do vento para a CLA ficam então:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = fV + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_u}{\partial z} \quad (2.1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -fU + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_v}{\partial z} \quad (2.1b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_w}{\partial z} \quad (2.1c)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.2)$$

Onde u , v e w são as componentes da velocidade e estão alinhados com as variáveis espaciais x , y e z , respectivamente, onde x é no sentido do vento, y é perpendicular ao vento e z é na vertical, g a aceleração da gravidade e τ_u , τ_v e τ_w são as tensões de corte.

Faz-se notar que a variável f que se encontra no primeiro termo do lado direito das equações 2.1a e 2.1b refere-se ao coeficiente de Coriolis provocada pela rotação da Terra, que é dada por:

$$f = 2\Omega \sin|\lambda| \quad (2.3)$$

Onde Ω é a velocidade angular e λ é a latitude da Terra.

Da secção 2.1, determinou-se que se tratava de um fluido incompressível logo, os termos referentes a $\partial\rho/\partial t$ da equação 2.2 são desprezados. Uma vez que o caso de estudo presente nesta tese trata-se de um meio urbano com algumas dezenas de metros de altura, ou seja, na região interior da CLA, é possível retirar a força de Coriolis presente nas equações 2.1a e 2.1b, e na equação 2.1c, uma vez que os termos gradiente de pressão vertical e o efeito da gravidade são dominantes relativamente aos restantes, pode-se cortar os restantes termos. Desta forma as equações 2.1a a 2.2 tomam a seguinte forma final:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_u}{\partial z} \quad (2.4a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_v}{\partial z} \quad (2.4b)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = 0 \quad (2.4c)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

As tensões de corte τ_u e τ_v presentes nas equações 2.4a e 2.4b, respectivamente, podem ser descritas a partir da Lei de Newton:

$$\tau_u = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

$$\tau_v = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.7)$$

Em [42] é referido que se se diferenciar a equação 2.4c, tendo em conta o x e y , tem-se que a variação vertical do gradiente de pressão depende unicamente do gradiente

de densidade horizontal e como se assume que o gradiente de densidade horizontal é desprezável, então o gradiente de pressão horizontal não varia em altura. Se o gradiente de pressão horizontal não varia em altura e se se está a trabalhar na camada superficial da CLA, o implica que o efeito da força de Coriolis é desprezável, então, se não existir qualquer obstáculo no escoamento, a CLA não varia ao longo do escoamento [49].

2.4 Perfil de Velocidades e Rugosidade Aerodinâmica

Dentro da CLA, a velocidade média do escoamento não é constante ao longo da altitude, isto é, devido à condição de não escorregamento, a velocidade varia de zero, no nível da superfície, até à velocidade de escoamento não perturbado, no limite da CLA.

Como foi assumido anteriormente, neste caso de estudo, a CLA encontra-se num estado de estabilidade neutro, logo a variação da velocidade do vento em altura é justificado pela força de Coriolis e pela rugosidade da superfície terrestre.

Uma das formas de se estimar h_g , a altura máxima da CLA visível na figura 2.5, é a partir da variável f , coeficiente de Coriolis.

$$h_g = \frac{u_*}{6f} \quad (2.8)$$

Onde u_* , a velocidade de atrito, é definida por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.9)$$

Onde τ_w é a tensão de corte do fluido na parede e ρ é a massa volúmica do ar.

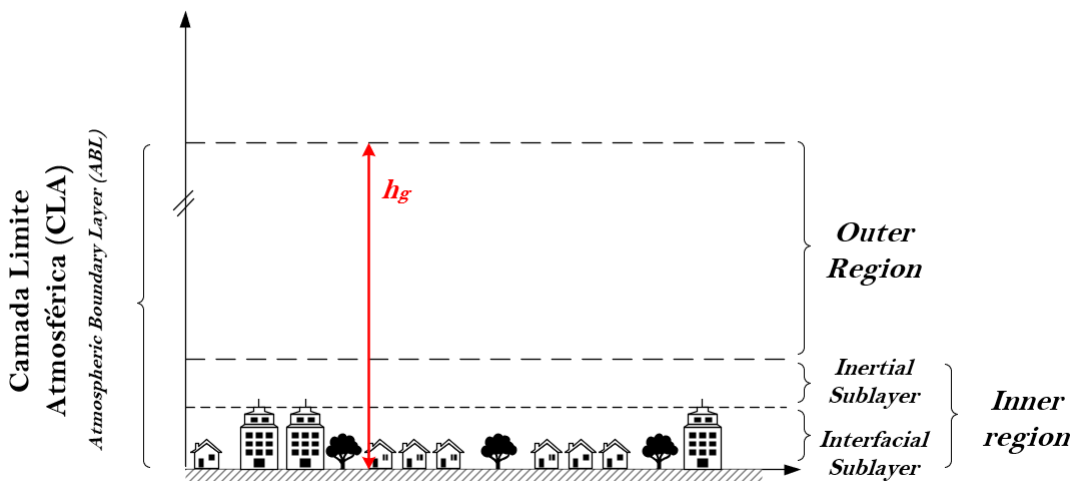


Figura 2.5: Altura máxima da CLA

Este trabalho terá maior foco na região interior da CLA, e considerar-se-á que na zona externa da mesma, a variação da velocidade do vento em altura é considerada desprezável, e o perfil de velocidade é uniforme.

Na região interior da CLA, onde já existe influência da rugosidade da superfície terrestre, existem dois modelos para descrever o perfil de velocidade: lei de potência e lei logarítmica.

A rugosidade aerodinâmica provocada pelos obstáculos na superfície terrestre tem grande influência na criação e desenvolvimento do perfil de velocidades do vento. Quando comparados dois tipos de terrenos, como por exemplo, um do tipo planície e outro do tipo uma cidade desenvolvida e com muitas casas e edifícios, isto é, dois tipos de rugosidade extremas, o escoamento do vento terá uma zona de abrandamento mais acentuada com o terreno com maior rugosidade devido à maior tensão de corte da superfície (figura 2.6).

Devido à sensibilidade do escoamento perante a rugosidade da superfície terrestre, é necessário ter em atenção ao modelo usado para descrever o perfil de velocidades do vento.

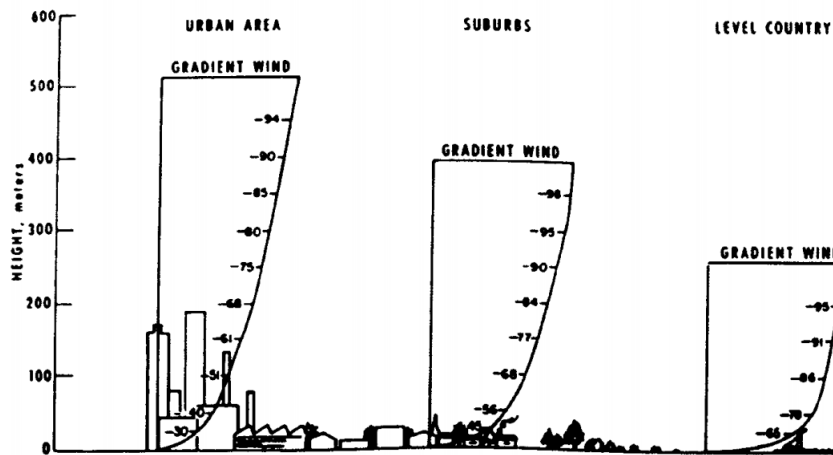


Figura 2.6: Efeito da rugosidade aerodinâmica no perfil de velocidade do vento [42]

Lei de Potência

O perfil médio de velocidades do vento segundo a lei de potência é descrito da seguinte forma:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.10)$$

Onde \bar{U} é a velocidade média do vento à altura z , \bar{U}_{ref} é a velocidade de referência à altura z_{ref} e α é um coeficiente que depende da rugosidade do terreno.

Este modelo é uma boa aproximação do perfil de velocidades do vento na *inertial sublayer* da CLA mas na *interfacial sublayer*, apesar de ter em conta a rugosidade aerodinâmica do terreno, não apresenta a melhor aproximação da velocidade [42].

Lei Logarítmica

Devido à lei de potência não apresentar a melhor aproximação do vento junto à superfície terrestre, foi criada a lei logarítmica:

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.11)$$

Onde κ é a constante de Von Karman que pode variar entre $K = 0.40 \pm 0.01$ [20], considerar-se-á que $K = 0.40$, e z_0 é a altura da rugosidade aerodinâmica. A altura da rugosidade aerodinâmica, z_0 , está relacionada com a rugosidade da superfície terrestre, seja esta obstáculos e estruturas de origem humana (como edifícios, casas e pontes) ou de origem natural (como árvores, arribas e montanhas), e trata-se da altura onde a velocidade local do vento seria igual a zero se se extrapolasse da lei logarítmica [18].

O perfil logarítmico ajusta-se melhor na subcamada rugosa interfacial (*interfacial sublayer*) da CLA mas apesar de não ser a melhor aproximação na subcamada inercial e na região exterior como é o perfil potencial, este fá-lo de forma conservadora.

Por forma a melhorar o ajuste do perfil logarítmico, desenvolveu-se um perfil logarítmico alargado [12], onde foram adicionados coeficientes polinomais de origem empírica que torna válido todo o perfil logarítmico até à altura h_g (descrito na equação 2.8 e na figura 2.5):

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{K} \left[\ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) + 5.75a - 1.88a^2 - 1.33a^3 + .25a^4 \right] \quad (2.12)$$

Onde $a = (z - z_d)/z_g$.

2.5 Turbulência

Todos os escoamentos que se encontram em problemas de engenharia desde os mais simples, que se podem representar a duas dimensões, como jactos e escoamentos em tubos, até aos mais complexos a três dimensões, começam como escoamentos laminares mas a partir de certo número de Reynolds tornam-se instáveis. O número de Reynolds, Re , é um parâmetro adimensional e descreve a importância relativa das forças de inércia e das forças viscosas no escoamento, é dado por:

$$Re = \frac{\bar{u}L}{\nu} \quad (2.13)$$

Onde \bar{u} e L são a velocidade e o comprimento característicos do escoamento e ν é a viscosidade cinemática do fluido e é dada por:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.14)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Escoamentos com número de Reynolds elevado, isto é com $Re \geq Re_{critico}$, estes tornam-se turbulentos, mesmo com condições de entrada constantes, ou seja, criam-se movimentos aleatórios e caóticos onde a velocidade e todas as outras propriedades do escoamento estão constantemente a variar com o tempo. Na figura 2.7 mostra-se um exemplo típico de uma medição de velocidade num escoamento turbulento.

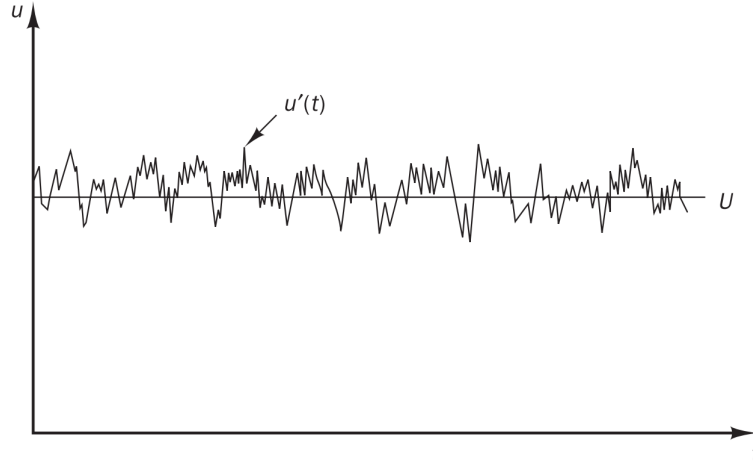


Figura 2.7: Exemplo de uma medição de velocidade num escoamento turbulento [58]

Devido aos movimentos aleatórios das partículas no escoamento, as propriedades do fluidos deixam desta forma de ser possíveis de descrever de uma forma direta, em vez disso, é necessário descrever a propriedade $A(t)$ como a soma do seu valor médio, \bar{A} , e a sua flutuação $a'(t)$, onde $\frac{\partial a'}{\partial t} = 0$ por definição, logo: $A(t) = \bar{A} + a'(t)$. Este processo chama-se decomposição de Reynolds e desta forma é possível descrever todas as propriedades do fluido num escoamento turbulento, quer seja este um escoamento em duas ou em três dimensões.

As equações 2.4a, 2.4b, 2.4c e 2.5 são as equações de Navier-Stokes com as simplificações finais para este trabalho, mas não têm em conta as oscilações das propriedades devido à turbulência.

Para descrever a velocidade do escoamento, é necessário fazer a decomposição de Reynolds para cada uma das componentes:

$$\begin{cases} u(t) \\ v(t) \\ w(t) \end{cases} = \begin{cases} \bar{u} + u'(t) \\ \bar{v} + v'(t) \\ \bar{w} + w'(t) \end{cases} \quad (2.15)$$

Onde $\frac{\partial u'}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial v'}{\partial t} = 0$ e $\frac{\partial w'}{\partial t} = 0$. Ao rescrever a velocidade como a soma da velocidade média e a sua oscilação, para cada componente da velocidade, cria novos termos nas equações de Navier-Stokes conhecidos como tensões de Reynolds, $(-\rho \overline{u'v'})$. Ao adicionar estes novos termos as equações de Navier-Stokes (2.4a, 2.4b, 2.4c e 2.5) ficam a chamar-se *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) (2.16a, 2.16b, 2.16c e 2.17).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{\rho u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho u'w'}}{\partial z} \right) \quad (2.16a)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho v'w'}}{\partial z} \right) \quad (2.16b)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = 0 \quad (2.16c)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

Ao terem sido adicionados novos termos nas equações mas não se ter adicionado mais equações, fica-se então com um sistema de equações sem solução. Para contornar este problema foram criados modelos de turbulência de forma a resolver este problema numericamente. Os modelos de turbulência são falados com melhor detalhe na secção 5.4.

A turbulência da CLA pode ser quantificada, entre outros parâmetros, através da intensidade de turbulência, I , que é dada por [47, 58]:

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{U_{ref}} = \frac{\sqrt{2k/3}}{U_{ref}} \quad (2.18)$$

Onde k é a energia cinética por unidade de massa da turbulência local:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.19)$$

Desta forma dá uma ideia geral no nível de turbulência dentro da CLA mas não é suficiente para caracterizar e definir completamente a estrutura turbulenta uma vez que trata as três componentes da velocidade com igual peso [42].

ESCOAMENTO EM TORNO DE EDIFÍCIOS

3.1 Caracterização Geral

O ar, para além de apresentar efeitos viscosos, uma vez que contém massa, também apresenta efeitos de inércia e a relação entre estes dois efeitos denomina-se por Número de Reynolds, Re , e é um parâmetro adimensional, como foi descrito na secção 2.5 na equação 2.13, $Re = \bar{u}L/\nu$.

Considerando um escoamento laminar a duas dimensões, isto é, independente da coordenada normal ao plano em que se está a ver, a passar por uma placa plana com arestas vivas, tem-se que o comportamento das linhas de corrente pode-se alterar consoante o Re , como se demonstra na figura 3.1.

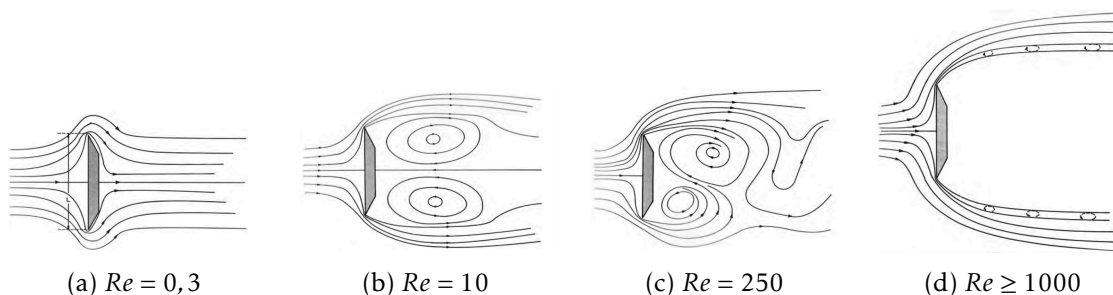


Figura 3.1: Escoamento laminar em torno de uma placa plana com arestas vivas com variação de Re [49]

Com um valor baixo de $Re \simeq 0,3$, o escoamento ao passar pela placa consegue contornar o objeto sem geração de vórtices. À medida que o $0,3 < Re < 1000$ vai aumentando, existe separação do escoamento nas esquinas e geração de vórtices na face tardoz do plano, que com o crescimento de Re tornam-se assimétricos e cria o conhecido fenómeno estrada de Von Karman como se demonstra na figura 3.2.



Figura 3.2: escoamento em torno de um paralelepípedo com $b/h = 0,4$ e $Re = 200$ [37]

A periodicidade desses vórtices pode ser descrita pelo Número de Strouhal, St .

$$St = \frac{N_S L}{\bar{u}} \quad (3.1)$$

Onde N_S representa a frequência da liberação dos vórtices, L é a dimensão característica e \bar{u} a velocidade característica do escoamento.

A variação do número de Strouhal tem grande influência no efeito do tipo e comprimento da zona de recirculação como se demonstra na figura 3.3.

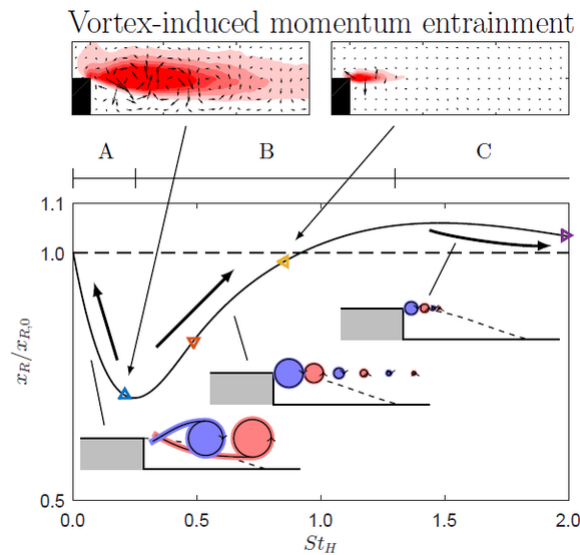


Figura 3.3: Representação do efeito do St na zona de recirculação [3]

Quando o $Re \geq 1000$, o efeito predominante no escoamento é a inércia. Aqui os grandes vórtices têm pouca possibilidade de se gerarem e cria-se uma esteira na parte a jusante da placa. Este fenômeno, quando se trata de um objeto rectangular e não de uma placa plana com arestas vivas, pode separar-se na esquina e não voltar a recolar (figura 3.4a) ou pode separar-se na esquina, recolar e haver uma nova separação que cria então a esteira (figura 3.4b).

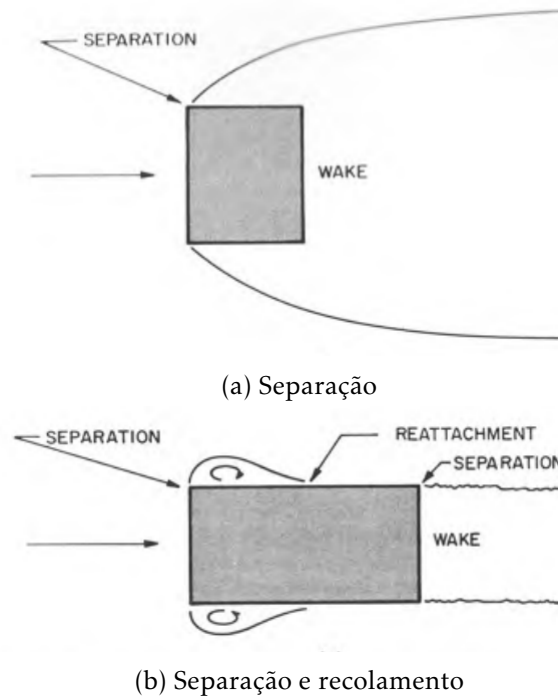


Figura 3.4: Escoamento em trono de um paralelepípedo [49]

Para além do Re , o perfil de velocidades incidente no objeto pode fazer variar o comportamento do escoamento. Sejam dois tipos de escoamento, um com perfil incidente uniforme (figura 3.5a) e outro com um perfil incidente não uniforme (figura 3.5b), tem-se que no segundo perfil na face frontal, abaixo do ponto de estagnação, há uma zona de recirculação e que na face superior o escoamento depois de se separar devido à aresta, este volta a recolar, contrariamente ao escoamento com um perfil incidente uniforme, onde o escoamento apenas se separa.

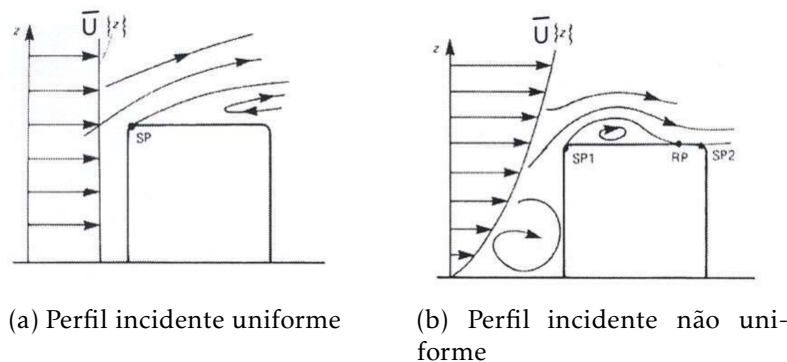


Figura 3.5: Comportamento do escoamento com vários perfis incidentes num cubo [10]

3.2 Coeficientes de Pressão

Quando se tem um objeto imerso num escoamento com velocidade, este cria pressões no corpo de acordo com a equação de Bernoulli:

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p = \text{const} \quad (3.2)$$

Mas é mais comum e prático de se descrever a pressão na superfície do objeto como um Coeficiente de Pressão (CP) que é definido da seguinte forma:

$$C_p = \frac{p_s - p_0}{\frac{1}{2}\rho \bar{u}^2} \quad (3.3)$$

Onde p_s é a pressão estática local na superfície do objeto, p_0 representa a pressão estática local num ponto não perturbado a montante do escoamento e $1/2\rho\bar{u}^2$ é a pressão dinâmica do vento não perturbado a montante do escoamento e fora da CLA.

A vantagem de se usar os CP relativamente à pressão p resultante da equação de Bernoulli é que permite transferir os resultados de um modelo experimental para o objeto em escala real e a comparação dos resultados obtidos com os catalogados para cada geometria do obstáculo.

O perfil incidente do escoamento num obstáculo não altera apenas o comportamento do escoamento como os seus efeitos nos CP. Sejam dois tipos de escoamento, um com perfil incidente uniforme (figura 3.6a) e outro com um perfil incidente não uniforme (figura 3.6b) num obstáculo do tipo placa plana com arestas vivas, é possível verificar o impacto que estes perfis incidentes têm no padrão do CP.

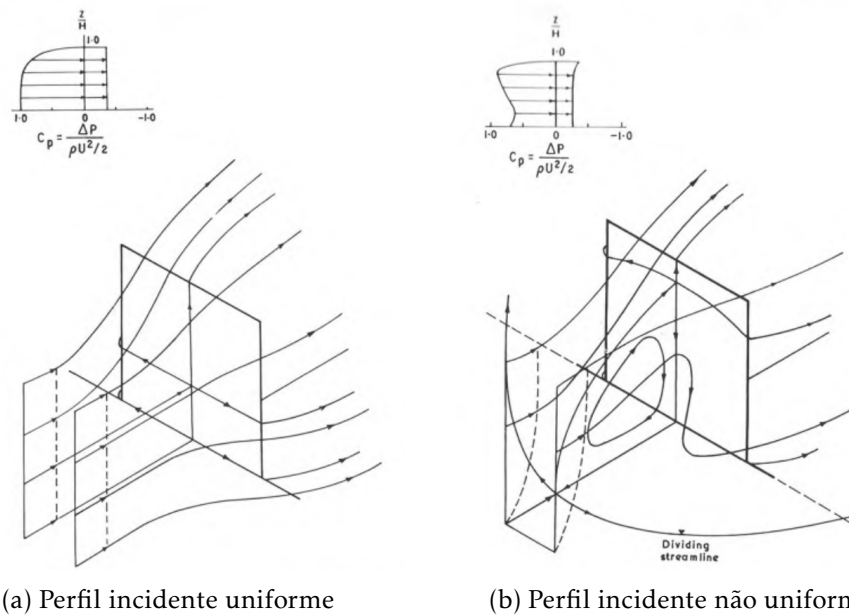


Figura 3.6: Variação do CP na face frontal com diferentes perfis incidentes num cubo [2]

EUROCÓDIGO 1

4.1 Introdução

O programa relativo aos Eurocódigos Estruturais foi criada pelo Comité Técnico CEN/TC 250 "*Structural Eurocodes*" com o objetivo de eliminar alguns dos entraves técnicos existentes e a harmonização das especificações técnicas para o projeto de obras de construção.

Para esta dissertação será usada a norma Eurocódigo 1: Ações em estruturas - Ações do vento (EC1) que "fornece orientações relativamente à determinação das ações do vento natural para o projeto estrutural de edifícios e de outras obras de engenharia civil, para cada uma das áreas submetidas àquelas ações"[13]. Esta norma é aplicável a estruturas apoiadas no solo até os 200 metros de altura e os seus componentes e elementos acessórios.

Como foi descrito na secção 2.5, a velocidade contém uma componente média e uma componente flutuante.

A velocidade média do vento, \bar{U} , no EC1 é estabelecida a partir do valor de referência da velocidade do vento, e da variação do vento em função da altura, determinada a partir da rugosidade do terreno e da orografia.

A componente flutuante do vento, no EC1 é caracterizada pela intensidade de turbulência.

4.2 Perfil de Velocidade Médio

A velocidade média do vento a uma altura z a partir do solo, $\bar{U}(z)$, como foi descrito anteriormente, depende da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento, sendo dada por:

$$\bar{U}(z) = c_r(z).c_o(z).\bar{U}_b \quad (4.1)$$

Onde $c_o(z)$ é o coeficiente de orografia, \bar{U}_b é a velocidade de referência do vento e $c_r(z)$ é o coeficiente de rugosidade.

4.2.1 Coeficiente de Orografia

O coeficiente de orografia, $c_o(z)$, que tem em consideração a variação da velocidade do vento em colinas ou escarpas e encontra-se definido no Anexo A.3 do EC1.

Segundo o EC1, os efeitos da orografia, para efeitos de modelação do vento, poderão ser desprezados quando o declive médio do terreno a montante da construção é inferior a 3°.

4.2.2 Velocidade de Referência do Vento

A velocidade de referência do vento, \bar{U}_b , é o valor de referência do vento, definido em função da direção do vento e da época do ano a uma altura de 10[m] acima da superfície de um terreno da categoria II (ver Tabela 4.1). O valor de referência da velocidade do vento deve ser calculado através da expressão:

$$\bar{U}_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot \bar{U}_{b,0} \quad (4.2)$$

Onde c_{dir} e c_{season} são os coeficientes de direção do vento e de sazão, respectivamente, e podem ser consultados no Anexo Nacional do EC1 mas o valor recomendado é de 1,0 para ambos e por fim o $\bar{U}_{b,0}$ é o valor básico da velocidade de referência do vento.

No Anexo Nacional do EC1, para a generalidade do território português o valor básico da velocidade de referência do vento, $\bar{U}_{b,0}$, é de $\bar{U}_{b,0} = 27[m s^{-1}]$, com exceção dos arquipélagos dos Açores e da Madeira e das regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5[km] de largura ou altitudes superiores a 600[m] onde $\bar{U}_{b,0} = 10[m s^{-1}]$. Para este trabalho será utilizado $\bar{U}_{b,0} = 10[m s^{-1}]$.

4.2.3 Coeficiente de Rugosidade

O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, tem em consideração a variação da velocidade média em altura e da rugosidade do terreno em redor da construção. Este coeficiente baseia-se num perfil logarítmico e é definido pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Onde z_0 é a altura da rugosidade aerodinâmica do terreno, z_{min} é a altura mínima definida na Tabela 4.1, z_{max} é considerada igual a 200 metros e k_r é o fator do tipo de terreno e é calculado por:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (4.4)$$

Em que $z_{0,II}$ é a altura da rugosidade aerodinâmica do terreno do tipo II e é igual a 0,05 metros como se pode ver na Tabela 4.1.

A Tabela 4.1 retirado do EC1 [13] fornece os valores recomendados de z_0 e z_{min} para as cinco categorias de terreno.

Tabela 4.1: Categorias e parâmetros de terreno [13]

| Categoria de terreno | | z_0 [m] | z_{min} [m] |
|----------------------|---|--------------|------------------|
| 0 | Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar | 0,003 | 1 |
| I | Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos | 0,01 | 1 |
| II | Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura | 0,05 | 2 |
| III | Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes) | 0,3 | 5 |
| IV | Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 metros | 1,0 | 10 |

Considerando que o coeficiente de orografia desprezável, $c_0(z) = 1$, e a velocidade de referência do vento de $\bar{U}_b = 10[m s^{-1}]$, exemplifica-se na Figura 4.1 as diferenças no perfil de velocidades médio para cada categoria de terreno.

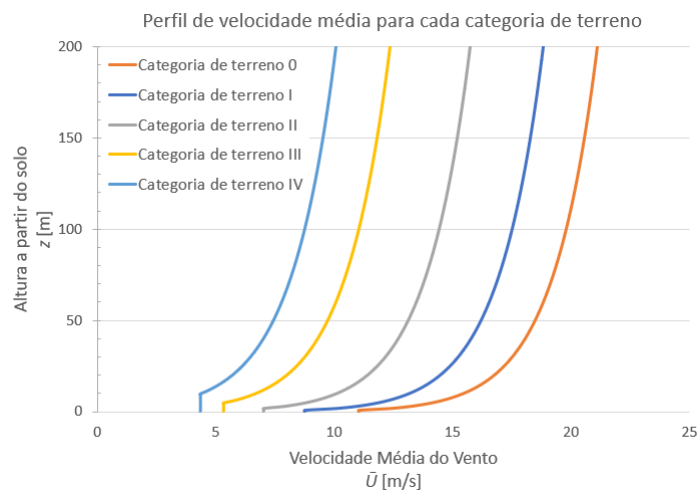


Figura 4.1: Perfil de velocidade para cada categoria de terreno com $\bar{U}_b = 10[m s^{-1}]$ e $c_0 = 1$ (adaptado de [27])

Na Figura 4.1 é notória a diferença entre os perfis de velocidade dos vários tipos de terreno e a influência que a rugosidade aerodinâmica tem na construção e desenvolvimento do perfil de velocidade médio.

4.3 Turbulência do Vento

Como foi dito anteriormente, no Capítulo 2.5, a componente flutuante do vento é caracterizada pela intensidade de turbulência, $I_v(z)$ e esta, segundo o EC1, é definida por:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{\bar{U}(z)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.5)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min}$$

Onde σ_v é o desvio padrão da turbulência e é dada por:

$$\sigma_v = k_r \cdot \bar{U}_b \cdot k_I \quad (4.6)$$

Onde k_r é o coeficiente de terreno dado na equação 4.4, \bar{U}_b é a velocidade de referência do vento dada pela equação 4.2 e k_I é o coeficiente de turbulência fornecido no Anexo Nacional do EC1 onde o valor recomendado é 1,0.

Substituindo a equação 4.6 na equação 4.5:

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.7)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min}$$

Onde c_o é o coeficiente de orografia e z_0 o comprimento da rugosidade dado na Tabela 4.1.

Sabendo que os coeficientes de turbulência e de orografia, para este trabalho, são dados por $k_I = 1,0$ e $c_o = 1,0$, respectivamente, então a intensidade de turbulência dada na equação 4.7 pode ser substituída por:

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.8)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min}$$

4.4 Coeficientes de Pressão

No EC1 existe um capítulo dedicado aos coeficientes de pressão para as mais variadas construções, elementos estruturais e componentes.

O coeficiente de pressão exterior fornece informações sobre o efeito do vento sobre as superfícies exteriores e este reparte-se por coeficientes globais e coeficientes locais. Os coeficientes locais, $c_{pe,1}$, correspondem aos coeficientes de pressão para superfícies carregadas de área igual a $1[m^2]$ e os coeficientes globais, $c_{pe,10}$, correspondem aos coeficientes de pressão para superfícies carregadas de área a igual a $10[m^2]$. Estes dependem das dimensões da área de construção carregada pelo vento, A .

A determinação do c_{pe} depende do tipo de construção em causa e uma vez que objeto de estudo é um cubo, para o EC1 trata-se de um edifício de planta rectangular e paredes verticais com uma cobertura em terraço.

4.4.1 Paredes Verticais de Edifícios de Planta Rectangular

Para o cálculo dos coeficientes de pressão para as paredes verticais de um cubo, aplica-se o caso do EC1 como se encontra na Figura 4.2.

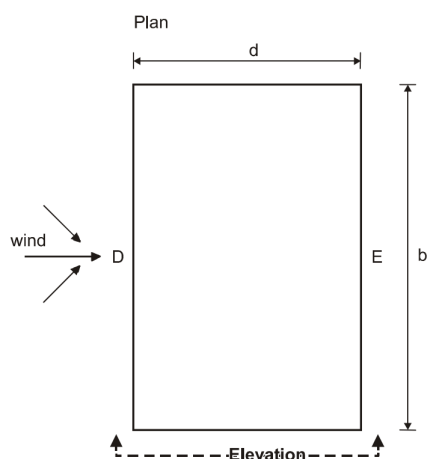


Figura 4.2: Planta de um edifício rectangular e paredes verticais

Onde a face frontal é definida por D e face oposta por E, e b e d são a largura e comprimento, respectivamente, do edifício. O procedimento recomendado para a determinação do c_{pe} para superfícies carregadas até $10[m^2]$ é dada por:

$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A \quad \text{para } 1[m^2] < A < 10[m^2] \quad (4.9)$$

A equação anterior encontra-se representada na Figura 4.3.

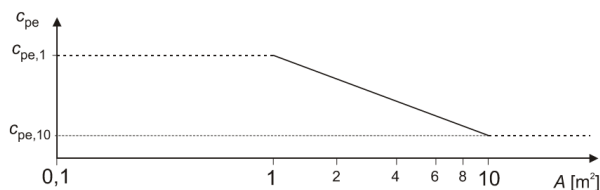
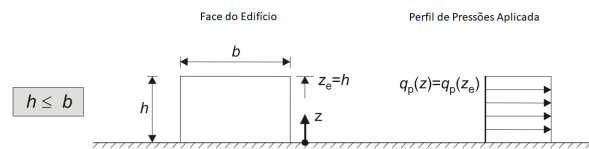


Figura 4.3: Representação gráfica do cálculo de c_{pe} segundo o EC1 [13]

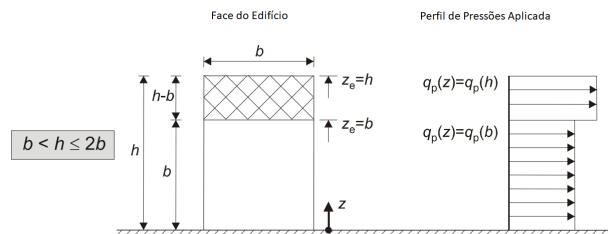
Para além da utilização da equação anterior, o EC1 disponibiliza uma metodologia de forma a uniformizar as distribuições de pressão nas superfícies carregadas criadas pelo perfil de velocidades e turbulência, que não são de natureza uniforme. A partir da relação da largura b e a altura do edifício h , existem três casos de perfis de distribuição da pressão dinâmica:

- Caso 1 - $h \leq b$: Perfil de pressões aplicadas deverá ser considerado como uma única parte de valor constante (Figura 4.4a);
- Caso 2 - $b < h \leq 2b$: Considera-se que o edifício é constituído por duas partes, com cada uma de valor constante (Figura 4.4b);
- Caso 3 - $h \geq 2b$: O edifício é dividido em duas secções principais de valor constante e uma secção intermédia dividida em faixas horizontais (Figura 4.4c);

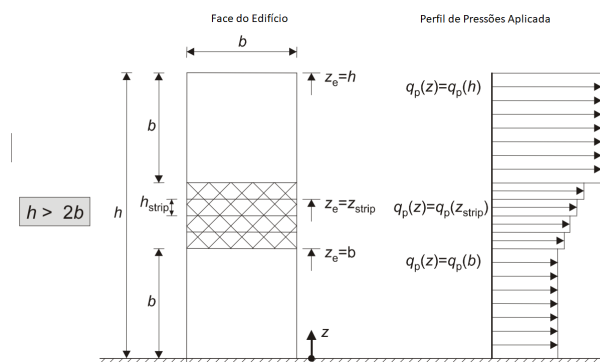
Na Figura 4.4 encontra-se representado cada um dos casos descritos anteriormente e o respectivo perfil de pressão dinâmica, $q_p(z)$, que é dada pela equação 4.10.



(a) Caso 1



(b) Caso 2



(c) Caso 3

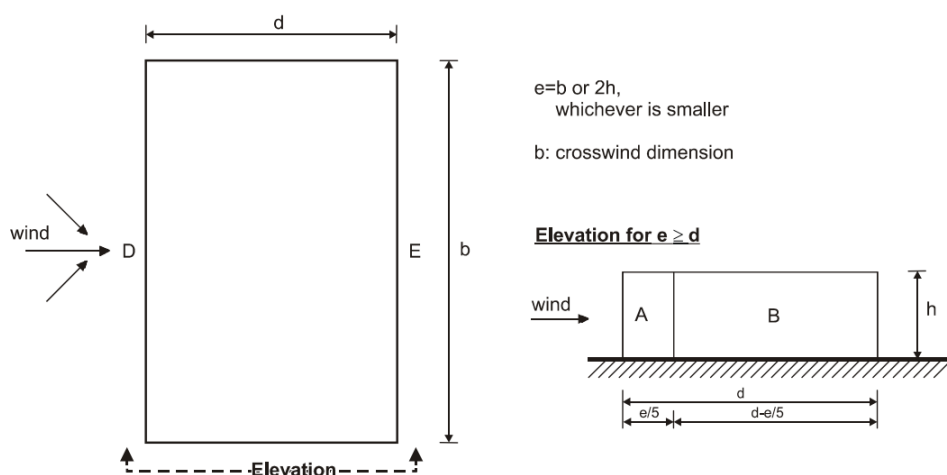
Figura 4.4: Uniformização de perfil de pressões aplicadas em edifícios [13]

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(z) \quad (4.10)$$

A pressão dinâmica de pico à altura z resulta da velocidade média, $\bar{U}(z)$, dada na equação 4.1, e das flutuações de curta duração da velocidade do vento dadas pela intensidade de turbulência, $I_v(z)$, que se pode calcular pela equação 4.8, e onde ρ é, neste caso, a massa volúmica do ar.

Uma vez que o objecto de estudo trata-se de um cubo, aplica-se o caso 1, isto significa que a forma do perfil de pressões aplicada é uniforme, como se pode ver na Figura 4.4a.

No EC1 para edifícios de planta rectangular, dependendo da relação entre a altura x comprimento x largura do edifício, há valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para cada tipo de edifício e para a condição do cubo de lado 6[m] aplica-se o caso descrito na Figura 4.5.



Legenda:

| | |
|--------------------------------------|--|
| plan | planta |
| elevation for ... | alçado para ... |
| wind | vento |
| $e=b$ or $2h$, whichever is smaller | e = menor valor de entre b e $2h$ |
| crosswind dimension | dimensão transversal à direcção do vento |

Figura 4.5: Designação das zonas em paredes verticais [13]

Em função da relação h/d , os valores recomendados de c_{pe} segundo o EC1 para um cubo, encontram-se na Tabela 4.2.

Estes valores de $c_{pe,10}$ e $c_{pe,1}$ da Tabela 4.2 são os utilizados para as direcções ortogonais do vento 0° , 90° e 180° , que correspondem aos valores mais desfavoráveis de entre os obtidos numa gama de direcções do vento $\theta \pm 45^\circ$ para cada lado da direcção ortogonal considerada.

Tabela 4.2: Valores recomendados dos c_{pe} para paredes verticais de edifícios de planta rectangular [13]

| Zona | A | | B | | C | | D | | E | |
|-----------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| c_{pe} | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ |
| $h/d = 1$ | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | — | — | +0,8 | +1 | -0,5 | -0,5 |

4.4.2 Coberturas em Terraço

Para o tecto do cubo, como são arestas vivas, aplica-se a metodologia do EC1 para coberturas em terraço onde a inclinação α bordo, como se mostra na Figura 4.6 é tal que $-5^\circ < \alpha < 5^\circ$.

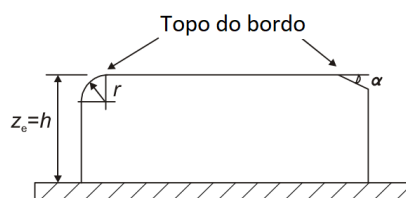
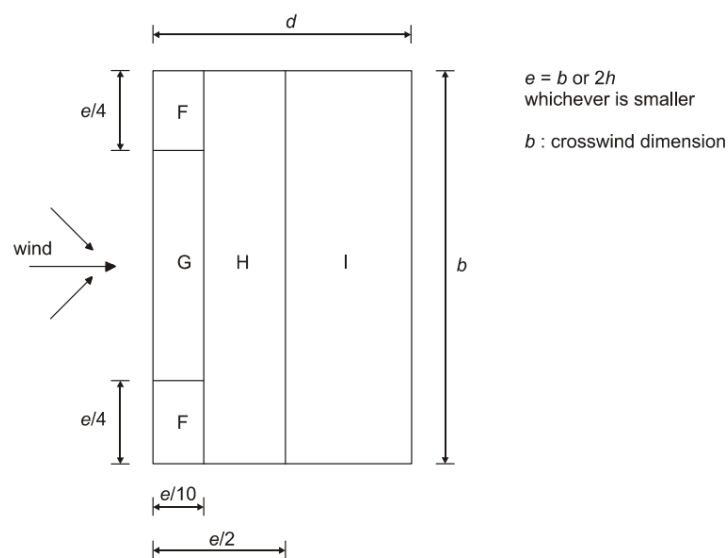


Figura 4.6: Bordo de uma cobertura em terraço [13]

Tal como foi feito para paredes verticais, o EC1 divide a cobertura em terraço em várias zonas, como se mostra na Figura 4.7.



Legenda:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| parapets | platibandas |
| edge of eave | topo do bordo |
| curved and mansard eaves | bordos arredondados ou amansardados |
| $e=b$ or $2h$, whichever is smaller | $e =$ menor valor de entre b e $2h$ |
| crosswind dimension | dimensão transversal à direcção do vento |

Figura 4.7: Designação das zonas em coberturas em terraço [13]

4.4. COEFICIENTES DE PRESSÃO

Para cada uma das zonas da Figura 4.7 o EC1 tem os valores recomendados de $c_{pe,10}$ e $c_{pe,1}$ e encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores recomendados dos c_{pe} para cobertura em terraço [13]

| Tipo de cobertura | Zona | | | | | | | |
|-----------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | F | | G | | H | | I | |
| | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ |
| Bordos em aresta viva | -1,8 | -2,5 | -1,2 | -2 | -0,7 | -1,2 | +0,2 | +0,2 |

MODELO COMPUTACIONAL

5.1 Metodologia

Dinâmica dos Flúidos Computacional, do inglês *Computational Fluids Dynamic* (CFD) é uma forma de analisar sistemas que envolvam um escoamento de um fluido, transferência de calor ou reações químicas através de uma simulação numérica. Esta técnica de análise pode ser usada para as mais variadas áreas, quer sejam elas industriais ou não, devido ao seu potencial de resolver um caso de estudo de forma mais rápida e de menor custo, face à via experimental.

Para a resolução de problemas de escoamento de fluido, todos os códigos de CFD são estruturados com três passos fundamentais: i. Pré-Processamento, ii. Resolução e iii. Pós-Processamento.

i. *Pré-Processamento*

A fase de pré-processamento consiste em introduzir o caso de estudo no programa de CFD. Aqui define-se a geometria e a região de interesse para o problema, denominado por domínio computacional. Todo o volume ocupado pelo fluido tem de ser discretizado em células, que não se podem sobrepor umas às outras, e criar-se assim a malha. Na geração de malha é necessário ter em atenção a uma série de pormenores que serão melhor descritos na secção 5.3.

Uma vez que o domínio computacional esteja definido e discretizado, define-se o modelo físico a tratar, como por exemplo as equações de movimento, entalpia, calor, e por fim as condições do domínio, isto é, o comportamento do fluido, modelo de turbulência, as condições de fronteira das superfícies, propriedades de material, entre outras especificações. Na secção 5.4 serão referidos os modelos de turbulência disponíveis para definir o comportamento da turbulência do escoamento.

ii. Resolução

Para que seja possível a resolução, código de CFD começa por discretizar as equações de Navier-Stokes e resolve as mesmas, de forma iterativa quer seja numa simulação do tipo estacionária ou transiente, para cada uma das células da malha ao longo do domínio computacional. Na secção 5.6 serão dados mais detalhes sobre os *solvers* disponíveis.

iii. Pós-Processamento : Análise de Resultados

Uma vez resolvidas as equações de Navier-Stokes para todo o domínio computacional, é possível retirar os dados e informações importantes do escoamento como a velocidade, pressão, entre outros, em pontos, linhas, planos ou superfícies, desde que se encontrem dentro do domínio computacional.

5.2 Geometria

A geometria do domínio computacional está ligada ao tipo de simulação que se deseja realizar. Para este caso de estudo vai-se simular o escoamento do vento à volta de um modelo cúbico, de lado L , para um certo tipo de terreno. Desta forma o tamanho do domínio computacional depende do tamanho do objeto de estudo e das condições de fronteira do domínio computacional.

Este tipo de simulação, contrariamente ao estudo de um fluido a passar num tubo, não tem fronteiras físicas nas laterais nem no topo, uma vez que se trata da atmosfera, logo é necessário impor condições de fronteira que simulem essas "fronteiras", sendo este tema discutido na secção 5.5. Por forma a que condições de fronteira não interfiram com o escoamento à volta do cubo, de lado L , estas têm de estar longe o suficiente para não criar gradientes de pressão estranhos mas também têm de estar próximas o suficiente por forma a não se tornar pesado computacionalmente.

Uma forma de calcular a interferência das condições de fronteira no escoamento é a partir do cálculo do Rácio de Blocagem (RB) [%]:

$$R.B. = \frac{\text{Área da secção do objeto}}{\text{Área do domínio}} \times 100 \quad (5.1)$$

O RB pode ser calculado para cada plano e o RB máximo aconselhado é de 3% [15] mas existem autores que dizem que 3% é demasiado [42] e que aconselham a que o RB não ultrapasse dos 1,5% [16].

Vários autores já fizeram inúmeros testes do tamanho do domínio computacional onde o objeto de estudo era um cubo ou um paralelepípedo. Na tabela 5.1 tem-se um resumo dos vários domínios utilizados, onde o escoamento é no sentido x^+ e a altura do domínio é no sentido z^+ . Na figura 5.1 tem-se o exemplo de um domínio com um modelo cúbico de lado L por forma a guiar o leitor na interpretação da tabela 5.1. Da tabela 5.1 retira-se que não existe uma regra exata do tamanho do domínio computacional por forma a

garantir os melhores resultados, mas que o utilizador tem de fazer um pequeno processo iterativo para o seu caso em específico. É necessário ter em atenção à forma e tamanho do obstáculo, às propriedades do vento e do domínio (tais como, temperatura, velocidade, radiação), às propriedades das fronteiras do domínio (tais como, rugosidade ou não do chão), entre outras variáveis.

A partir da análise dos vários casos presentes na tabela 5.1 o processo iterativo para desenvolver o tamanho da geometria do domínio computacional do caso de estudo desta dissertação, tornou-se mais rápido e será referido no capítulo seguinte.

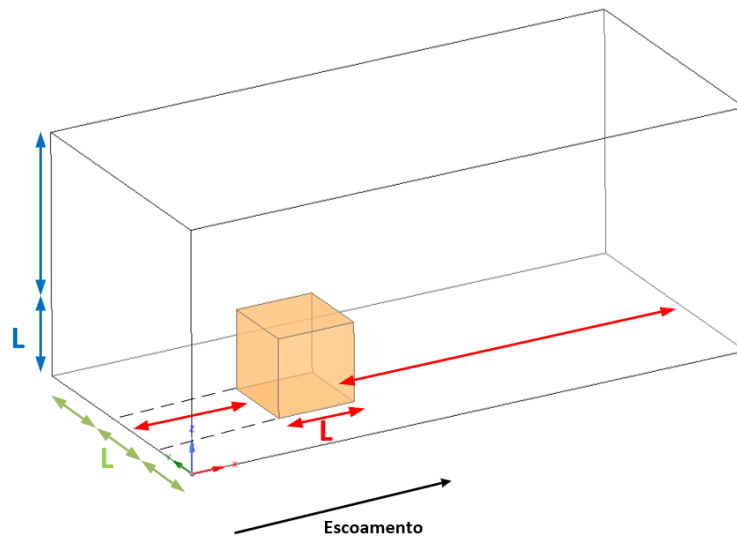


Figura 5.1: Geometria genérica do domínio computacional com modelo cúbico de lado L

Tabela 5.1: Tamanho do domínio computacional

| | x | Domínio y | z | Modelo (x;y;z) |
|---------------------------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| Franke et al. (2004) [15] | $5L+L+15H$ | $5L+L+5L$ | $L+5L$ | (L;L;L) |
| Lopes (2008) [27] | $9L+L+12L$ | $4,5L+L+4,5L$ | $L+7L$ | (L;L;L) |
| Stathopoulos et al. (1990) [51] | $6L+L+9L$ | $3B+B+3B$ | $H+2H$ | (L;B;H) |
| Richards et al. (2002) [46] | $7,5L+L+7,5L$ | $7,5L+L+7,5L$ | $L+7,5L$ | (L;L;L) |
| | $9,5L+L+14,5L$ | $4L+L+4L$ | $L+9L$ | (L;L;L) |
| | $6,2L+L+32,8L$ | $17L+L+17L$ | $L+15,7L$ | (L;L;L) |
| Gao et al. (2005) [17] | $15,7L$ | $4,35L+L+4,35L$ | $L+L$ ou $L+4,2L$ | (L;L;L) |
| Mochida et al. (2002) [29] | $10,8L$ | $6,9L$ | $5,6L$ | (L;L;L) |
| Murakami et al. (1988) [34] | $10L$ | $3,5L$ | $4L$ | (L;L;L) |
| Tominga et al. (2008) [55] | $?+L+10L$ | $5L+L+5L$ | $L+5L$ | (L;L;L) |
| Murakami et al. (1992) [30] | $15,7L$ | $4,35L+L+4,35L$ | $L+L$ ou $L+4,2L$ | (L;L;L) |
| Nozawa et al. (2002) [38] | $7L+2L+13L$ | $8L+2L+8L$ | $L+9L$ | (2L;2L;L) |
| Richards et al. (2015) [43] | $15L$ | $5L+L+5L$ | $L+5,67L$ | (L;L;L) |
| Revuz (2011) [42] | $20B+L+30B$ | $13B+B+13B$ | $H+4H$ | (L;B;H) |
| | $3H+L+3H$ | | | |

Faz-se notar que caso se queira comparar uma simulação de CLA com testes feitos em túnel de vento, a secção transversal do domínio computacional deve ser a mesma que a do túnel mas caso a altura do túnel seja maior que $6L$ então a altura do domínio computacional pode-se diminuir até $5L$ [16].

5.3 Malha

5.3.1 Tipos de Malha

As equações diferenciais que definem o escoamento do fluido não têm solução analítica, salvo casos simples, desta forma, para a análise de casos de estudo mais realistas, é necessário dividir o domínio do escoamento em subdomínios mais pequenos a partir de geometrias primitivas, como quadrados e triângulos em 2D (Figura 5.2a) ou hexaedros e tetraedros em 3D (Figura 5.2b), e a partir daqui discretiza-se as equações e resolvem-se para cada uma destas células. Os métodos existentes de discretização das equações de Navier-Stokes serão abordados com maior detalhe na secção 5.6.

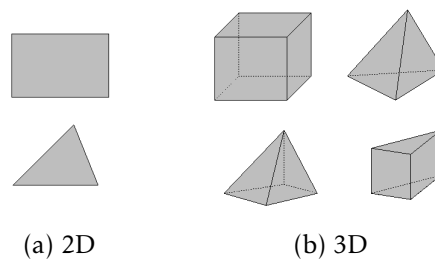


Figura 5.2: Geometrias primitivas

A geração da malha a partir destas geometrias primitivas cria três tipos de malhas: malha estruturada, não estruturada e mista. Na figura 5.3 tem-se representado, num plano, como é possível criar malhas estruturadas e malhas não estruturadas a partir das geometrias antes referidas.

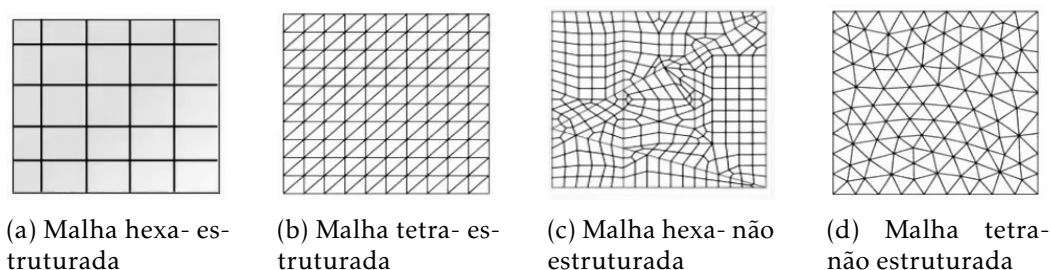


Figura 5.3: Malhas estruturadas e não estruturadas

Uma malha estruturada, contrariamente à malha não estruturada, é caracterizada pela ligação regular e arranjo das células. Esta ligação regular entre as células das malhas faz com que seja altamente eficiente em termos de espaço de memória computacional devido

à facilidade de converter os nós da malha em matrizes. Outra vantagem relativamente à malha não estruturada é que com uma malha estrutura há uma melhor convergência e resolução de resultados.

5.3.2 Qualidade de Malha

A qualidade da malha influencia o número de iterações da simulação, a rapidez e a precisão da convergência de resultados. A precisão de resultados depende tanto do número total de elementos da malha como o tipo de geometria de cada um desses elementos. É necessário ter uma malha refinada o suficiente para se garantir que se capta todas as características do escoamento mas com o aumento do número de elementos da malha o tempo de computacional cresce, desta forma é necessário ter em atenção o tamanho e tipo de elementos da malha de forma a obter bons resultados num tempo computacional razoável.

Para avaliar a qualidade da malha são usados três parâmetros: distorção (*skewness*), ortogonalidade (*orthogonality*) e alongamento (*aspect ratio*).

Distorção (*skewness*) é um parâmetro adimensional definido como a diferença entre o formato da célula e o formato de uma célula equilátera de volume equivalente. Este parâmetro pode variar entre 0 (ideal) e 1 (mau).

$$Skewness = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (5.2)$$

Onde θ_{max} é o maior ângulo interno da célula, θ_{min} é o menor ângulo interno da célula e θ_e é o ângulo de uma célula equilátera de uma célula de volume equivalente, caso se trate de uma célula triangular então θ_e caso se trate de uma célula quadrada então $\theta_e = 90$ [1], como se demonstra na figura 5.4.

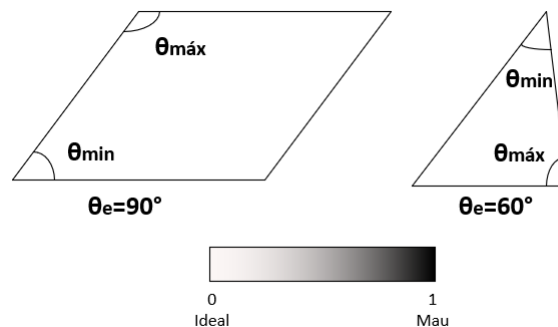


Figura 5.4: Ângulos internos de um triângulo e quadrado para o parâmetro adimensional distorção (*skewness*) e o seu range

Ortogonalidade (*orthogonality*) é um conceito que varia entre 0 (mau) e 1 (ideal) e que relaciona, de forma adimensional, o quão perto estão os ângulos entre células vizinhas de serem ótimas [1].

$$Orthogonality = \min \left[\frac{A_i \cdot f_i}{|A_i| |f_i|}, \frac{A_i \cdot c_i}{|A_i| |c_i|} \right] \quad (5.3)$$

Onde A_i é a área da célula i vizinha, f_i é o vector que vai desde o centróide da célula até ao meio da aresta da célula i vizinha e c_i é um vector que vai desde o centróide da célula até ao centróide da célula i , como se demonstra na figura 5.5.

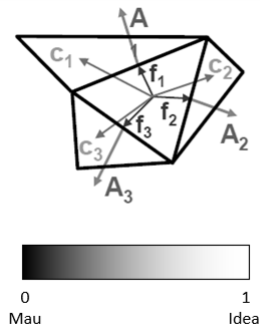


Figura 5.5: Ortogonalidade (*orthogonality*)

Por fim, o parâmetro alongamento (*aspect ratio*) calcula o rácio entre a distância maior e a distância menor da célula [1]. Quanto menor for este parâmetro (*aspect ratio* ≥ 1), melhor serão os resultados.

$$Aspect\ Ratio = A/B \quad (5.4)$$

Onde A e B são as distâncias maior e menor da célula, respectivamente, como se pode ver nas figuras 5.6a e 5.6b para os casos 2D e 3D.

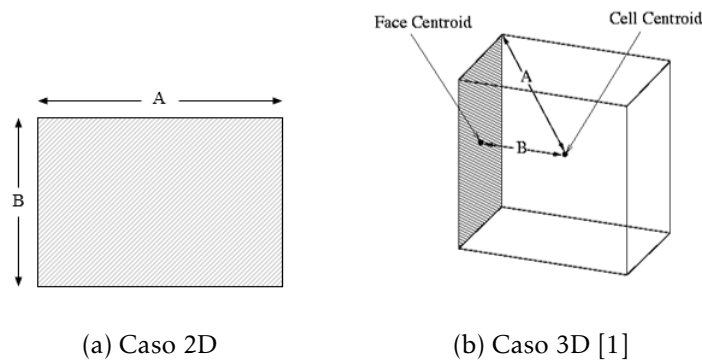


Figura 5.6: Alongamento (*aspect ratio*)

Um outro pormenor por forma a melhorar a qualidade da malha é ter cuidado com o crescimento das células, isto é, o rácio entre células não deve exceder os 1,2 [15].

5.3.3 Tratamento da Malha Perto de Paredes

Os escoamentos são afetados pela presença de paredes e essas zonas são caracterizadas pela existência de um acentuado gradiente de velocidade. Para se captar esse gradiente, é necessário que a malha perto da parede seja tão pequena quanto for necessária, como se demonstra na figura 5.7.

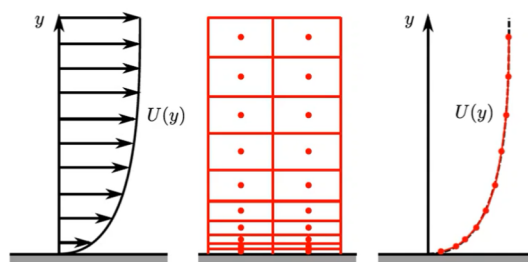


Figura 5.7: Gradiente de velocidade perto de paredes

O problema de criar uma malha que tenha de ser tão pequena quanto for necessária é que se torna uma malha muito pesada e o tempo computacional torna-se excessivo. Por forma a que não seja preciso que o tamanho das células seja tão pequeno, criaram-se as funções de parede (*wall functions*) que são capazes de modelar o escoamento, quer seja ele turbulento ou não, perto da parede e assim a célula adjacente à parede não necessita de ser tão pequena, como se demonstra na figura 5.8.

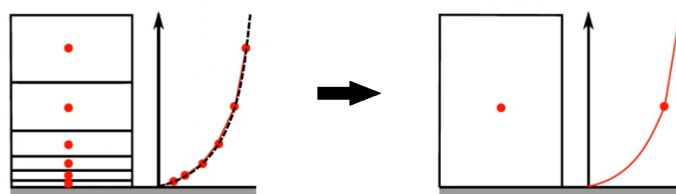


Figura 5.8: Capacidade das funções de parede (*wall functions*)

A camada do escoamento perto da parede pode ser dividida em três camadas como se encontra na figura 5.9. A zona mais perto da parede é denominada por subcamada viscosa (do inglês, *viscous sublayer*), onde a viscosidade molecular tem um grande impacto, a zona exterior é camada turbulenta (do inglês, *fully-turbulent layer*), onde é a turbulência que tem maior impacto no escoamento, por fim, temos a camada intermédia denominada por *buffer layer*.

As funções de parede (*wall functions*) são funções empíricas ajustadas ao comportamento observado pelo escoamento, isto é, na figura 5.10 tem-se um gráfico que trata da velocidade adimensional relativamente à distância à parede adimensional e tem-se uma linha preta a cheio que é o comportamento observado pelo escoamento e a azul e verde tem-se as funções empíricas que ajustam ao comportamento observado e estas são as funções de parede (*wall functions*) [47].

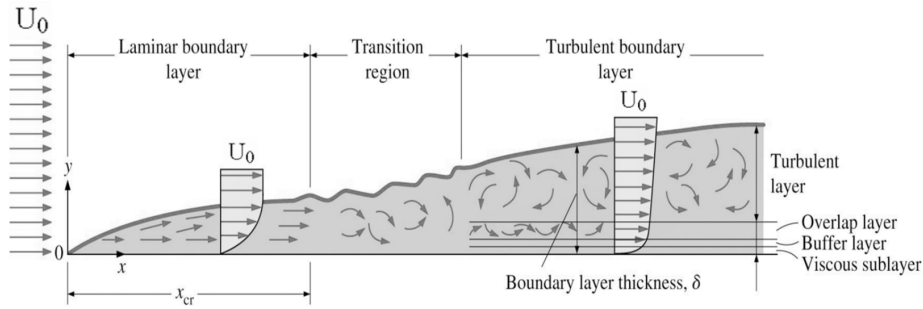


Figura 5.9: Divisão do escoamento perto da parede [63]

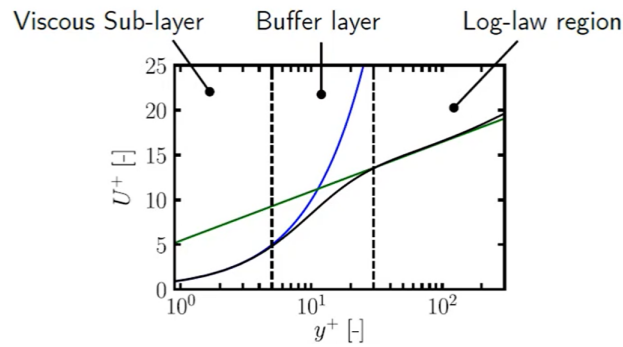


Figura 5.10: Gráfico das funções de parede (*wall functions*)

Observa-se que o gráfico da figura 5.10 está dividido em três zonas:

- A subcamada viscosa (*viscous sublayer*), onde o perfil azul ajusta-se perfeitamente ao comportamento observado, é a camada onde $y^+ < 5$
- A *buffer layer*, onde $5 < y^+ < 30$
- A *log-law region*, onde o perfil verde ajusta-se ao comportamento observado, onde $30 < y^+ < 500$

A Lei de Parede Padrão fica então definida da seguinte forma:

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & y^+ < 5 \\ \frac{1}{\kappa} \log(y^+) + B - \Delta B(K_S^+) & 30 < y^+ < 500 \end{cases} \quad (5.5)$$

Onde κ é a constante de Von Karman, B é uma constante de integração, ΔB é a função de rugosidade e varia com o regime do escoamento e K_S^+ é a rugosidade equivalente grão de areia (*sand-grain*) adimensional definida da seguinte forma:

$$K_S^+ = \frac{u_* k_S}{\nu} \quad (5.6)$$

Onde k_S é a rugosidade aerodinâmica. Para escoamentos laminares $K_S^+ < 2,25$ e completamente rugoso $K_S^+ > 90$.

A distância à parede adimensional, y^+ , e a velocidade adimensional, u^+ , são descritas da seguinte forma:

$$y^+ = \frac{y_p u_*}{\nu} \tag{5.7}$$

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \tag{5.8}$$

Onde y_p é a distância do centro do primeiro elemento à parede, ν é a viscosidade cinemática do fluido e u_* é a velocidade de atrito e dá-se por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{5.9}$$

Onde τ_w é a tensão de corte na parede e ρ a massa volúmica.

Na *buffer region* as funções de parede cruzam-se em $y^+ = 11,25$ e a função poderia descrever-se da seguinte forma:

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & y^+ < 11,25 \\ \frac{1}{\kappa} \log(y^+) + B - \Delta B(K_S^+) & y^+ > 11,25 \end{cases} \tag{5.10}$$

Mas correr uma simulação nesta zona não costuma dar bons resultados, desta forma é aconselhado resolver as simulações para $y^+ < 5$ ou para $y^+ > 30$.

A Lei de Parede está então representada na figura 5.11.

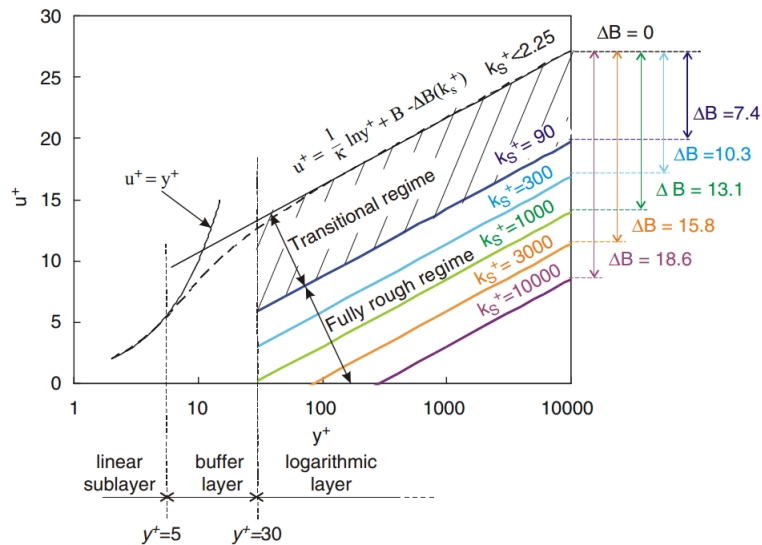


Figura 5.11: Lei de Parede para superfícies lisas e grão de areia (*sand-grain*) com a variação de K_S^+ [5]

Faz-se notar que a rugosidade aerodinâmica, k_s , é diferente da rugosidade aerodinâmica, z_0 fornecida pelo Eurocódigo no capítulo 4, desta forma é necessário fazer uma conversão e para o *ANSYS Fluent* é da seguinte forma:

$$k_S = \frac{E z_0}{C_S} \quad (5.11)$$

Onde E é uma constante empírica de valor 9,793 e C_S é um coeficiente de correção disponível no *ANSYS Fluent* que varia entre $0 < C_S \leq 1$.

Para a descrição precisa do escoamento próximo da superfície do solo é necessário tem em atenção os quatro requisitos que devem ser satisfeitos simultaneamente [1, 5, 15, 16, 45]:

1. Uma resolução da malha adjacente à superfície do solo fina o suficiente;
2. A distribuição transversal do perfil da CLA ser homogênea ao longo do domínio computacional;
3. A distância do centro da primeira célula, y_p , adjacente à superfície do solo ser maior que a altura da rugosidade aerodinâmica, k_S , i.e. $y_p > k_S$ (ver figura 5.12);
4. Conhecer a relação entre a rugosidade aerodinâmica, k_S , e a correspondente altura da rugosidade aerodinâmica, z_0 , (ver equação 5.11).

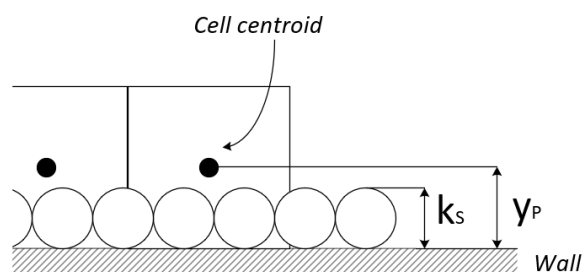


Figura 5.12: Relação entre a altura do centróide da primeira célula, y_p , e a altura da rugosidade aerodinâmica, k_S

Os autores de [5] demonstram que não é possível conseguir os quatro requisitos em simultâneo, uma vez que a 3ª condição ($y_p > k_S$) juntamente com a 4ª condição ($k_S = \frac{E z_0}{C_S}$) fazem com que seja impossível respeitar a 1ª condição. Assim, com o incumprimento dos quatro requisitos juntamente com a excessiva dissipação de energia turbulenta esperada [17, 31, 33, 35, 55], é complicado manter a estabilidade da CLA ao longo do domínio computacional [4, 5, 40, 43], com demonstra na figura 5.13.

Vários autores já propuseram vários procedimentos para minimizar este conflito, mas relatam que há poucas melhorias quando aplicados em *softwares* comerciais [9, 19, 39, 44, 45, 56, 61].

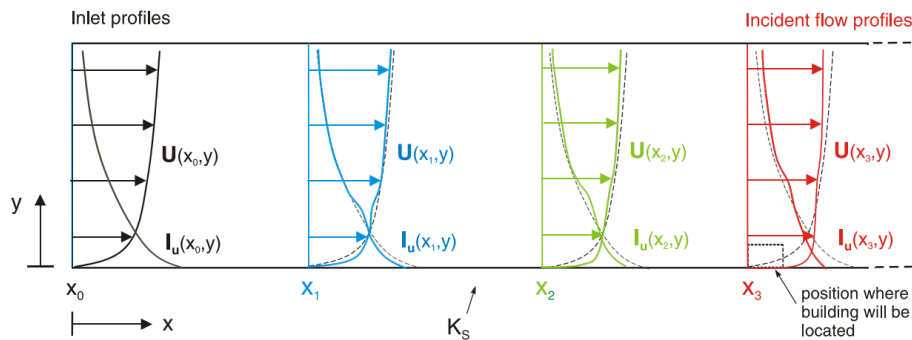


Figura 5.13: Ilustração da instabilidade no desenvolvimento da CLA [4]

5.4 Modelos de Turbulência

5.4.1 Introdução

Escoamentos turbulentos são caracterizados pela flutuação dos campos de velocidade, momento, energia, etc, e uma vez que estas flutuações podem ser de pequena escala e de alta frequência, tornam-se computacionalmente dispendiosas de simular a partir de Simulação Numérica Direta, do inglês *Direct Numerical Simulation* (DNS) onde as equações de Navier-Stokes são resolvidas sem qualquer modelo de turbulência mas para o estudo de CLA isto torna-se impossível, devido ao tamanho do domínio computacional e ao elevado número de Reynolds que implicaria uma capacidade computacional que ainda não existe disponível [42].

Os primeiros modelos criados, devido a limitações do *hardware* dos computadores, eram modelos de duas equações e eram usados para simulações do tipo estacionário. Com o passar do tempo e com a melhoria dos computadores, estes modelos foram rectificados e deram origem a vários tipos de modelos de turbulência de forma a obter resultados mais realistas. Apesar da melhoria contínua dos modelos de turbulência, estes na verdade apenas vão melhorando um ou outro aspecto do escoamento e, desta forma, tornam-se bastante específicos para um caso de estudo [7].

5.4.2 RANS

Nos modelos de turbulência derivados das equações *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) têm como foco o escoamento médio e os efeitos de turbulência nas propriedades médias do escoamento. Antes de aplicar qualquer modelo numérico RANS, são acrescentados nas equações de Navier-Stokes, antes descritas, termos extra dependentes do tempo, de forma a incluir a interação dos vários movimentos turbulentos existentes no sistema.

De forma a resolver os escoamentos turbulentos com as equações de RANS é necessário desenvolver modelos de turbulência que consigam descrever as tensões de Reynolds e os termos de transporte escalar e assim completar o sistema de equações que descreve o escoamento [58].

Os modelos de turbulência RANS mais gerais podem ser classificados a partir do número de equações que acrescentam ao sistema de equações como se encontra na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Modelos de turbulência RANS com base no número de equações extra [58]

| Nº de equações extra | Nome do Modelo |
|----------------------|--|
| Zero | Modelo comprimento de mistura (<i>mixing length</i>) |
| Uma | Modelo <i>Spalart-Allmaras</i> |
| Duas | Modelo $k - \varepsilon$ Modelo $k - \omega$ <i>Algebraic Stress Model</i> |
| Sete | <i>Reynolds Stress Model</i> |

5.4.2.1 Modelos $k - \varepsilon$

Os modelos $k - \varepsilon$ são modelos de duas equações com base nas equações RANS que se encontram descritas na secção 2.5 (ver equações 2.16a a 2.16c e equação 2.17). Este modelo introduz duas novas variáveis: a energia cinética turbulenta, k , e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta.

De uma forma simplista, a turbulência pode ser caracterizada a partir de dois parâmetros: a viscosidade turbulenta, μ_t , e comprimentos de escala (*length scales*), l . Com um modelo $k - \varepsilon$ estes dois parâmetros podem ser descritos de forma independente a partir das duas novas variáveis k e ε .

Faz-se notar que para se usar um dos modelos $k - \varepsilon$ é necessário assumir que o escoamento é completamente turbulento e que os efeitos da viscosidade molecular são desprezáveis [1].

Modelo $k - \varepsilon$ *standard*

O modelo $k - \varepsilon$ *standard* [26] é um modelo semi-empírico onde a equação de transporte para k (equação 5.12) deriva de uma equação exata, enquanto que a equação de transporte para ε (equação 5.13) é obtida a partir de uma mistura de uma equação exata com parte empírica.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} S_\varepsilon \quad (5.13)$$

Nestas equações, G_k representa a produção de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade, G_b é a produção de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade, Y_M representa a contribuição da dilatação de flutuabilidade na compressão de

turbulência na taxa de dissipação geral, por fim, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes, σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulento para k e ε , respectivamente, e S_k , S_ε e S_ω são termos fonte definidos pelo utilizador [1].

Após experiências para ar e água escoamentos de corte turbulentos fundamentais, encontra-se como *default* [1] os seguintes valores das constantes:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad C_{2\varepsilon} = 1,92 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Tem-se assim que a viscosidade turbulenta, μ_t , e as length scales, l , podem ser escritas como uma combinação de k e ε .

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.14)$$

Onde $C_\mu = 0,09$ é uma constante empírica

$$l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (5.15)$$

O modelo $k - \varepsilon$ *standard* é um modelo de turbulência versátil e por isso muito usado em várias áreas, inclusive no estudo do vento.

Após a análise do trabalho de vários autores, muitos referem que este modelo sobrestima a energia cinética turbulenta, k , nas arestas vivas das geometrias e que quando se trata de um modelo cúbico, isto influencia o local onde o escoamento recola quer no tecto como também nas faces laterais e que também influencia no local onde deveria ser o ponto de estagnação na face frontal [15, 17, 31, 33, 35, 46].

O facto destes problemas serem conhecidos, outros autores propuseram variantes ao modelo $k - \varepsilon$ *standard* como por exemplo o modelo LK [23, 25], o modelo MMK [57], o modelo $k - \varepsilon - \varphi$ [24], entre muitos outros, ou mudaram as condições de fronteira quando usavam o modelo $k - \varepsilon$ *standard* de forma a apaziguar estes problemas [5, 9, 19, 39, 44, 45, 61].

Modelo RNG $k - \varepsilon$

O modelo RNG $k - \varepsilon$ deriva das equações de Navier-Stokes instantâneas usando uma técnica estatística matemática denominada por Método *Renormalization Group* (RNG). Apesar de ser muito semelhante ao método $k - \varepsilon$ *standard*, este modelo refina pequenos pormenores que faz dele mais preciso e de confiança para um conjunto de tipos de escoamento mais vasto que o modelo $k - \varepsilon$ *standard*.

Contrariamente ao modelo $k - \varepsilon$ *standard*, o modelo RNG $k - \varepsilon$ tem em consideração o efeito de turbilhão e para além de ser capaz de estudar escoamentos com alto número de Reynolds, a teoria por detrás da técnica RNG proporciona o cálculo dos efeitos de viscosidade devido aos efeitos do baixo número de Reynolds. Desta forma torna este modelo um pouco mais versátil que o modelo $k - \varepsilon$ *standard*.

Neste modelo as equações de transporte são as seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon - S_\varepsilon \quad (5.17)$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido ao gradientes de velocidade médios, G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade, Y_M representa a contribuição da flutuabilidade na compressão de turbulência na taxa de dissipação geral, α_k e α_ε são os números de Prandtl inversos para k e ε , respectivamente. Todas estas variáveis podem ser calculadas segundo as equações que se encontram no manual do *ANSYS Fluent* [1]. Por fim, S_k e S_ε são os termos fonte definidos pelo utilizador.

Faz-se notar que na equação de transporte para ε foi acrescentado um termo, R_ε , que melhora a precisão de resultados em escoamentos com elevadas tensões de corte.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^3}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (5.18)$$

Onde, $\eta \equiv S k / \varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0,012$.

Para este modelo a viscosidade turbulenta, μ_t , é dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.19)$$

Onde $C_\mu = 0,0845$ é derivado da teoria RNG. É de notar que este valor para C_μ é muito parecido com o obtido empiricamente $c_\mu = 0,09$ usado no modelo $k - \varepsilon$ *standard*, como foi referido anteriormente.

No *ANSYS Fluent*, existe a opção de modificar a viscosidade turbulenta para ter em consideração os efeitos dos turbilhões presentes num escoamento com turbulência, desta forma, é acrescentado na viscosidade turbulenta uma função $f(\alpha_s, \Omega_t, \frac{k}{\varepsilon})$:

$$\mu_t = \mu_{t0} f \left(\alpha_s, \Omega_t, \frac{k}{\varepsilon} \right) \quad (5.20)$$

Onde μ_{t0} é a viscosidade turbulenta calculada sem ter em conta os turbilhões a partir da equação 5.19, Ω_t é a característica do turbilhão e α_s é uma constante definida pelo tipo de turbilhão presente no escoamento.

O modelo RNG $k - \varepsilon$ foi criado em 1992 [60] e ao início foi dado como muito promissor [42], uma vez que melhorava a precisão da localização do ponto de estagnação na face frontal do modelo cúbico como o local onde o escoamento recola no tecto quando o vento era aplicado a 0° mas quando se aplicava o vento a 45° os resultados já não eram promissores [46]. Com este modelo já vários autores relataram que os resultados podem não ser consistentes [21, 29, 46, 52].

Modelo $k - \varepsilon$ realizable

O modelo $k - \varepsilon$ realizable é uma variação do modelo $k - \varepsilon$ standard e difere de duas formas, primeiro a viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada de forma diferente e a equação de transporte para a taxa de dissipação, ε , agora deriva de uma equação exata.

A equação de transporte para k é igual à do modelo $k - \varepsilon$ standard (equação 5.12 mas para ε a equação de transporte é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (5.21)$$

Onde,

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

A viscosidade turbulenta no modelo $k - \varepsilon$ realizable é dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.22)$$

Apesar de a equação ter o mesmo aspecto, a grande diferença entre os modelos $k - \varepsilon$ realizable e $k - \varepsilon$ standard é que C_μ deixa de ser constante e passa a dar-se por:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (5.23)$$

Onde as variáveis U^* , A_0 e A_s não serão aqui descritas devido à sua extensividade mas podem ser encontradas no manual do ANSYS Fluent [1].

Uma vez que C_μ passa a ser uma função da taxa de deformação e rotação, velocidade angular e campos de turbulência, o modelo $k - \varepsilon$ realizable tem melhores resultados em escoamento que envolvem rotação, camadas limites dentro de grandes gradientes de pressão, separação e recirculação [1].

O modelo $k - \varepsilon$ realizable foi desenvolvido por Shih *et al* em 1995[48]. Este modelo foi utilizado para o estudo do efeito de Venturi entre dois edifícios [5] e os resultados foram validados utilizando os dados de um outro estudo em túnel de vento [50] para além de que o modelo $k - \varepsilon$ realizable é aconselhável a sua utilização em vez do modelo $k - \varepsilon$ standard [15, 16].

5.4.2.2 Modelos $k - \omega$

Tal como os modelos $k - \varepsilon$, os modelos $k - \omega$ são modelos de duas equações para a resolução das equações de RANS descritas na secção 2.5 (ver equações 2.16a a 2.16c e equação 2.17) e também introduz duas novas variáveis: a energia cinética turbulenta, k , e a taxa de dissipação específica, ω , que se trata de um rácio entre ε e k , $\omega = \varepsilon/k$.

Modelo $k - \omega$ standard

O modelo $k - \omega$ standard é baseado no modelo $k - \omega$ de Wilcox [59] que tem modificações para ter em conta os efeitos no escoamento quando o número de Reynolds é baixo, a compressibilidade do escoamento e a dispersão dos efeitos de atrito no escoamento.

Este modelo é um modelo empírico onde as equações de transporte para k e ω são as seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (5.25)$$

Nestas equações, G_k representa a produção de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade, G_ω é a produção de ω , Γ_k e Γ_ω representam a difusividade de k e ω , respectivamente, e Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω devido à turbulência. As equações para o cálculo das variáveis antes descritas encontram-se no manual *ANSYS Fluent* [1]. Por fim, S_k e S_ω são termos fonte definidos pelo utilizador [1].

Tem-se assim que a viscosidade turbulenta, μ_t pode ser escrita como uma combinação de k e ω .

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (5.26)$$

Onde o coeficiente α^* amortece a viscosidade turbulenta e cria assim uma correção para zonas do escoamento com baixo número de Reynolds e encontra-se especificado no manual *ANSYS Fluent* [1].

Modelo SST $k - \omega$

O modelo *Shear-Stress Transport* (SST) $k - \omega$ foi desenvolvido por Menter [28] e é muito similar ao modelo $k - \omega$ standard mas tem umas pequenas variantes. Este um modelo é uma mistura do modelo $k - \omega$ standard com uma variante do modelo $k - \varepsilon$ onde ativa o modelo $k - \omega$ standard na zona viscosa perto da parede e a variante do modelo $k - \varepsilon$ na zona de escoamento livre.

As equações de transporte deste modelo para k e ω são as seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5.28)$$

Nestas equações, \tilde{G}_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade, G_ω é a geração de ω , Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω , respectivamente, Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω , respectivamente, D_ω é o termo de difusão de mistura (*cross-diffusion term*). Todas estas variáveis e como

calculá-las encontram-se no manual *ANSYS Fluent* [1]. Por fim, S_k e S_ω são termos fonte definidos pelo utilizador.

Para este modelo, o cálculo da viscosidade turbulenta, μ_t , tem em consideração o o transporte das tensões de corte turbulentas.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^+}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right]} \quad (5.29)$$

Onde S é a magnitude da taxa de deformação e F_1 e F_2 são funções que ativam e desativam o modelo $k - \omega$ *standard* e a variante do modelo $k - \varepsilon$, dependendo da zona do escoamento. Todas estas variáveis podem ser calculadas e as suas equações encontram-se no manual *ANSYS Fluent* [1].

Apesar das várias publicações existentes usando o modelo $k - \varepsilon$ *standard* para o estudo da CLA quer em domínio vazio como com objetos com arestas vivas, o modelo SST $k - \omega$, apesar de ser menos utilizado, tem provado obter melhores resultados que o modelo $k - \varepsilon$ *standard* [22, 62].

5.4.2.3 Modelo RSM

O modelo *Reynolds Stress Model* (RSM) é dos modelos de turbulência mais elaborados, onde, contrariamente aos modelos anteriormente referidos, fecha as equações de RANS resolvendo as equações de transporte para as tensões de Reynolds juntamente com uma equação da taxa de dissipação [1, 14].

Este modelo é baseado nas equações dinâmicas do tensor de Reynolds $\tau_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j}$ e as equações de transporte são as seguintes:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_k \tau_{ij})}{\partial x_k} = - \left(\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) + \rho \varepsilon_{ij} - \prod_{ij} + \frac{\partial}{\partial c_k} \left(\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right) \quad (5.30)$$

Primeiros dois termos do lado direito da equação são termos de produção e não necessitam de qualquer aproximação ou modelação. O termo pressão-tensão \prod_{ij} redistribui a energia cinética turbulenta nas componentes do tensor de Reynolds e é importante referir que não modifica a energia cinética total do sistema. O termo seguinte $\rho \varepsilon_{ij}$ é um termo dissipador e por fim tem-se o difusor de turbulência, C_{ijk} . Estes últimos três termos referidos podem ser resolvidos na sua forma exata como os termos restantes logo é necessário fazer aproximações e modelá-los [14].

Existem modelos onde se aproxima estes termos de forma mais simples e há modelos mais sofisticados e complexos.

Trata-se sem qualquer dúvida de um modelo com imenso potencial para descrever a turbulência de forma mais precisa que qualquer modelo descrito anteriormente, mas devido à sua complexidade e das aproximações necessárias, tornam este modelo pouco abrangente aos escoamentos existentes. O modelo RSM tem bons resultados para escoamentos com curvas acentuadas como ciclones ou turbilhões dentro de um motor [1].

Tal como o modelo $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ já sofreram várias alterações e desenvolveram-se assim várias versões, com o modelo RSM também se desenvolveram várias versões mas nenhuma é capaz de prever o recolamento do escoamento no tecto do edifício e o recolamento na parte detrás do modelo dá-se por excesso [32]. Para além desses problemas conhecidos, os modelos RSM, comparativamente com outros modelos RANS, este envolve um custo computacional maior, desta forma é pouco aconselhado para simulações no estudo do vento [15, 16, 32].

5.4.2.4 URANS

Os modelos RANS têm como foco o escoamento médio e os efeitos de turbulência nas propriedades médias do escoamento, mas no estudo da interação do vento com objetos, mesmo que tudo no escoamento seja simétrico, o vento pode gerar cargas de pressão nos objetos de forma não simétrica, isto é, cria cargas irregulares e desta forma os modelos RANS não detetam esta característica e a simulação deixa de ser uma aproximação da realidade.

Por esta razão, pode-se usar *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes* (URANS) que essencialmente é como um modelo RANS mas introduz-se um filtro temporal que define o *time step* da simulação tão pequeno quanto for preciso durante um longo período de forma a capturar essas características.

5.4.3 LES

Num escoamento turbulento existem uma infinidade de turbilhões, do inglês *eddies* de várias escalas de tamanho e de tempo. Os turbilhões de grande escala representados na figura 5.14, considerados daqui para a frente como *large eddy*, são os responsáveis pela forma característica do escoamento e os turbilhões de pequena escala representados na figura 5.14, considerados daqui para a frente como *small eddy*, são os responsáveis pela dissipação da energia cinética turbulenta do escoamento.

Idealmente num estudo de um escoamento, a simulação seria realizada de forma exata através de DNS mas, como foi dito anteriormente, com a complexidade dos escoamentos e com o alto número de Reynolds torna-se impossível e é aí que entram os modelos de turbulência. Num escoamento turbulento onde, contrariamente aos *small eddy*, os *large eddy* são maiores, mais energéticos e por sua vez com mais força, tornam-se eficazes a transportar e conservar as propriedades do sistema. Desta forma, a abordagem do modelo de turbulência *Large Eddy Simulation* (LES) é resolver os *large eddies* com DNS e os *small eddies* são resolvidos com uma aproximação.

O modelo de turbulência LES resolve simulações tridimensionais e dependentes do tempo mas, em termos computacionais, tem custos mais elevados que outros modelos de turbulência

Uma vez que no modelo LES apenas os *small eddies* são resolvidos com uma aproximação é necessário filtrar estes das equações de Navier-Stokes dependentes do tempo [1, 14].

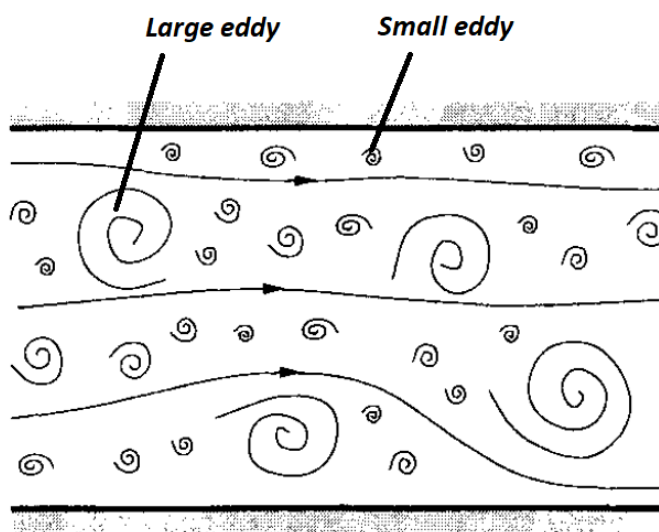


Figura 5.14: Tipos de *eddys* presentes num escoamento turbulento (adaptado de [14])

Para filtrar uma variável Θ usa-se a definição:

$$\bar{\Theta}(x) = \int_D \Theta(x') G(x, x') dx' \quad (5.31)$$

Onde D é o domínio computacional e G é uma função que serve de filtro para determinar o tamanho *eddy* a resolver.

Aplicando esta definição de filtro nas equações de Navier-Stokes fica-se com:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (5.33)$$

Onde σ_{ij} é tensor de tensões devido à viscosidade molecular definida por:

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (5.34)$$

e τ_{ij} é tensor das tensões de Reynolds definido por:

$$\tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (5.35)$$

O tensor das tensões de Reynolds, τ_{ij} , é desconhecido e, desta forma, é necessário modelar. Estes modelos denominam-se por *Subgrid-Scale Model* (SGS) e vários autores já propuseram vários modelos, no ANSYS Fluent existem os modelos Smagorinsky-Lilly, Dynamic Smagorinsky-Lilly, *Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity* (WALE) e Dynamic Kinetic Energy Subgrid-Scale. Nenhum destes modelos será falado em pormenor aqui mas encontram-se descritos no manual ANSYS Fluent [1].

O modelo LES já foi utilizado por vários autores e todos eles reportam que se trata de um modelo que, contrariamente ao modelo $k - \varepsilon$, o LES é capaz de prever os coeficientes de pressão em todas as faces do cubo como toda a zona de separação à volta do mesmo com imensa precisão, mesmo quando o vento não é perpendicular ao objeto de estudo, e fenómenos como vórtices e outras flutuações no escoamento são muito bem reproduzidas [30, 32, 33, 36, 38, 43].

5.4.4 DES

A abordagem dos modelos de turbulência *Detached Eddy Simulation* (DES) é um híbrido entre o modelo URANS e LES, onde o modelo URANS é aplicado na zonas perto da parede onde existe camada limite no escoamento enquanto que o modelo LES é aplicado no resto do domínio, como se demonstra na figura 5.15 [1, 42].

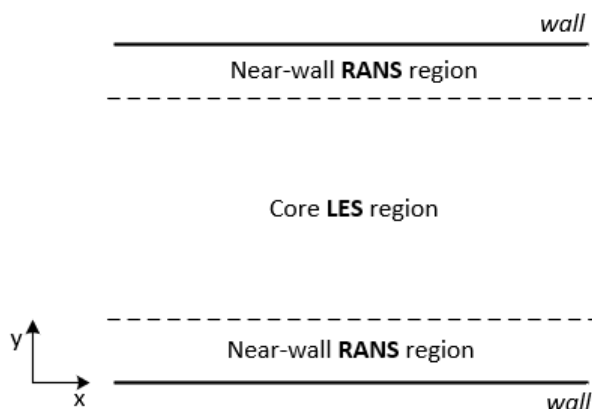


Figura 5.15: Ilustração do modelo de turbulência DES (adaptado de [42])

O modelo DES foi criado especialmente para casos com o número de Reynolds alto e onde o escoamento limitado por paredes teria um custo computacional muito alto quando resolvido com o modelo LES.

No *ANSYS Fluent* existe três tipos de modelos DES: Spalart-Allmaras, Realizable $k - \varepsilon$ e SST $k - \omega$. Nenhum destes modelos será falado em pormenor aqui mas encontram-se descritos no manual *ANSYS Fluent* [1].

Os modelos híbridos RANS-LES como o DES têm sido usados por vários autores e todos reportam que têm tipo sucesso mesmo com malhas grosseiras onde modelos como o LES teriam um mau desempenho especialmente perto de paredes. O único problema que tem sido encontrado neste problema é que a zona RANS por vezes não fornece a informação necessária para a zona LES e desta forma o erro no escoamento propaga-se, caso não se tenha atenção [11, 42, 53, 54].

5.5 Condições de fronteira

O *software* ANSYS Fluent oferece vários tipos de condições de fronteira, para o propósito deste caso de estudo apenas serão referidos as seguintes condições de fronteira: parede (do inglês, *wall*), simetria (do inglês, *symmetry*), entrada (do inglês, *inlet*) e saída (do inglês, *outlet*).

As condições de fronteira do tipo *wall* são usadas para superfícies sólidas ou como fronteiras de zonas de fluido, aqui é possível especificar-se a componente tangencial da velocidade, a rugosidade k_s ou definir uma "*slip*" *wall* especificando a tensão de corte nela, entre muitas outras coisas. Existe ainda a opção de *symmetry*, isto é, o ANSYS Fluent assume que a velocidade normal é zero e os gradientes de todas as outras variáveis é nula nessa parede.

Para definir uma entrada do escoamento, existe a condição de fronteira *inlet* onde se pode definir o coeficiente de perda (caso exista), a direção do escoamento, pressão e temperatura na entrada.

Por fim, para se definir a saída do fluido, para escoamentos incompressíveis, existe a opção de *outflow* que utiliza um modelo que extrapola as informações do interior do domínio para a fronteira de saída e assim o utilizador não tem de definir nem a velocidade nem a pressão de saída do fluido [1].

Para além do obstáculo imerso no escoamento, as condições de fronteira do domínio computacional também têm impacto no comportamento escoamento e no desenvolvimento da CLA.

Para o estudo da CLA à volta de um modelo cúbico, de lado L , e com rugosidade na superfície terrestre, o domínio computacional irá incluir uma entrada de escoamento (denominado daqui em diante por *inlet*), duas faces laterais, uma face superior (denominado daqui em diante por *top*), o chão e a face de saída do escoamento (denominada daqui em diante por *outlet*) como se demonstra na figura 5.16.

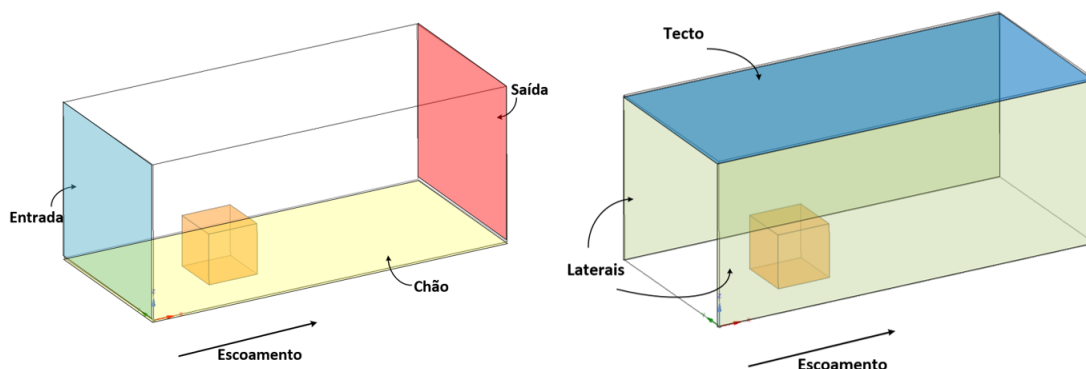


Figura 5.16: Faces do domínio computacional

Inlet

Na face de entrada do escoamento é necessário definir como *inlet* onde o utilizador define o perfil de velocidade, e vários autores [16, 45] sugerem o uso do perfil logarítmico para a velocidade, e as componentes da turbulência de acordo com o modelo de turbulência utilizado.

Para os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, a energia cinética turbulenta, k , inicialmente era considerada constante [5, 45] mas mais tarde há autores [39, 61] que propõem que k varie com a altura do domínio por forma a melhorar os resultados obtidos.

Top

A condição de fronteira a utilizar para a face superior do domínio computacional é o um tema muito discutido e que gera discórdia.

Há autores que utilizam a condição de *wall* mas com uma tensão de corte constante, $\tau = \rho u_*^2$, por forma a manter a estabilidade do perfil de velocidade e a energia cinética turbulenta [9, 42, 45], há autores que usam a condição de *wall* mas do tipo *freeslip* [4, 44, 61] e há quem defenda que se deva utilizar condição de *wall* mas a partir de uma Escalar definido pelo utilizador, do inglês *User-Defined Scalar* (UDS) impor que k , ε e u sejam constantes na face.

Segundo o guia COST Action 732 [16], a forma mais correta é utilizar a condição de *wall* com uma tensão de corte constante mas caso o *Top* esteja fora da CLA esta pode ser considerada como *symmetry* [19] ou ainda como *outflow* [15].

Lateral

Nas faces laterais o mais comum é encontrar-se definidas como *symmetry* por forma a manter o escoamento paralelo a esta face, ou seja, garantir que a velocidade normal às faces laterais é zero e os gradientes de todas as outras propriedades também seja nulo [19, 42].

Há autores que conseguem garantir essas requisitos apenas utilizando a condição de *wall free-slip* [4, 55, 61].

Chão e paredes do obstáculo

O chão e as paredes do obstáculo do domínio computacional uma vez que se tratam não só de uma fronteira mas como se uma superfície sólida são definidas como *wall*, aqui, dependendo do tipo de estudo e do tipo de modelo de turbulência escolhido pelo utilizador, é possível definir-se rugosidade aerodinâmica a partir da constante k_S ou pela tensão de corte ou mesmo uma superfície lisa.

Outlet

A saída do escoamento, para escoamentos incompressíveis, deverá ser definida como *outflow* [1] e para o caso de estudo o rácio de saída e de entrada de escoamento no domínio computacional será de 1.

5.6 Solver

Uma vez a malha e o *set-up* da simulação definido, o código de CFD tem de discretizar as equações de Navier-Stokes, anteriormente referidas, e resolve-as ao longo do domínio.

Resolver as equações de Navier-Stokes ao longo do domínio significa discretizar as equações espacialmente e para tal, uma vez que não podem ser resolvidas analiticamente, utiliza-se um dos seguintes métodos: Método dos Elementos Finitos (MEF), Método das Diferenças Finitas (MDF) e Método dos Volumes Finitos (MVF). Neste trabalho não será referido a diferença entre cada um destes métodos mas faz-se notar que as simulações deste trabalho serão realizadas em *ANSYS Fluent* e este usa o método MVF.

No MVF o domínio computacional é dividido em pequenos volumes de controlo e a forma discretizada das equações de Navier-Stokes é então resolvida para cada um deles. A forma integral dessas equações utiliza a regra da equação 5.36 que está representada para uma variável aleatória ϕ .

$$\underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{Taxa de alteração (transiente)}} + \underbrace{\int_{\Sigma} \rho \phi \vec{v} d\vec{A}}_{\text{Fluxo convectivo efetivo}} = \underbrace{\int_{\Sigma} \Gamma_{\phi} \nabla \phi d\vec{A}}_{\text{Fluxo difusivo efetivo}} + \underbrace{\int_V S_{\phi} dV}_{\text{Termo fonte}} \quad (5.36)$$

Onde V é um volume de controlo, Σ é a superfície do volume de controlo, ρ é a massa volumica do fluido, \vec{v} é o vector de velocidade, \vec{A} é o vector da área da superfície do volume de controlo, Γ_{ϕ} é o coeficiente de difusão da variável ϕ , ∇_{ϕ} é o gradiente de ϕ e S_{ϕ} é o termo fonte de ϕ por unidade de volume.

Para cada volume de controlo, é calculada a taxa de variação de cada variável nos limites da célula e a partir daí é construída uma matriz com todas as variáveis para todas as células. Esta matriz é resolvida de forma iterativa e o processo pára quando se chega a um valor de erro residual pré-definido pelo utilizador.

Por forma a resolver a forma integral das equações de Navier-Stokes que provêm do MVF, existe no *ANSYS Fluent* disponíveis dois tipos de *solvers*: baseado na pressão (*pressure-based*) e baseado na densidade (*density-based*). O *solver* do tipo baseado na densidade (*density-based*) é mais adequado a escoamentos do tipo compressível com altas velocidades, já o baseado na pressão (*pressure-based*) é mais adequado para escoamentos incompressíveis [1].

Como foi dito anteriormente, o caso de estudo é um escoamento do tipo incompressível, logo não será referido nenhuma das formulações disponíveis no *solver* baseado na densidade (*density-based*).

Dentro do *solver* baseado na pressão (*pressure-based*) existem dois modelos, o segregado (do inglês, *segregated*) e o acoplado (do inglês, *coupled*).

O modelo acoplado oferece uma solução robusta para escoamentos simples e estacionários. Este resolve em simultâneo as equações e desta forma o tempo de iteração e de memória são maiores, que com o algoritmo segregado.

Dentro do modelo segregado existem três tipos de algoritmos: *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* (SIMPLE), *SIMPLE-Consistent* (SIMPLEC) e *Pressure Implicit with Splitting of Operators* (PISO).

O algoritmo SIMPLE é essencialmente um método iterativo para o cálculo da pressão e velocidade nos volumes de controlo e o algoritmo SIMPLEC aumenta o fator de relaxamento, o que faz com que o método iterativo convirja mais rapidamente.

O algoritmo PISO é também como os algoritmos anteriores, um método iterativo mas com mais um passo com um factor corretivo e é aconselhado para escoamentos transientes, principalmente quando se usa um *time step* grande.

Os termos fluxo convectivo efetivo e fluxo difusivo efetivo da equação 5.36 necessitam dos valores da variável ϕ na superfície do volume de controlo e, uma vez que apenas os valores no centro do volume de controlo é que são armazenadas, é necessário extrapolar os valores para as fronteiras do volume de controlo e para tal é necessário um esquema (*scheme*). No *ANSYS Fluent* existem disponíveis três tipos de esquema (*scheme*): *first-order accuracy*, *second-order accuracy* e *Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics* (QUICK).

O esquema (*scheme*) mais simples é o *first-order accuracy* que assume que o valor na fronteira do volume de controlo n é igual ao valor do centro do volume de controlo $n + 1$.

O *second-order accuracy* usa o valor ϕ do centro do volume de controlo e o gradiente $\Delta\phi$ do volume de controlo vizinho para calcular o valor ϕ_f na fronteira, como demonstra na equação 5.37.

$$\phi_f = \phi + \Delta\phi \cdot \vec{r} \quad (5.37)$$

Onde \vec{r} é o vector que vai do centro do volume de controlo para o centro do volume de controlo vizinho.

Por fim, o terceiro esquema (*scheme*) é o QUICK onde o calculo valor de ϕ na fronteira do volume de controlo n utiliza os valores dos centros de vários volumes de controlo vizinhos. Devido à sua complexidade, a sua forma de cálculo não será demonstrada neste trabalho mas encontra-se no manual *ANSYS Fluent* [1].

Em suma, enquanto que o *first-order accuracy* converge mais rápido, os seus valores serão pouco precisos, desta forma o *second-order accuracy* é aconselhado. Por outro lado, caso o escoamento envolva grandes turbilhões o QUICK terá resultados mais precisos que o *second-order accuracy*.

CASO DE ESTUDO

6.1 Introdução

Em engenharia, todos os estudos realizados para entender a influência do vento em estruturas são feitos em túnel de vento devido à sua precisão e segurança nos resultados. Há vários anos que tem-se vindo a progredir no método computacional no estudo da influência do vento, mas ainda com resultados pouco precisos.

Neste capítulo será feito um estudo numérico da interação do vento e de um obstáculo dentro da CLA com um perfil de velocidades e rugosidade aerodinâmica retirados do EC1. A simulação numérica computacional da CLA foi realizada a partir do *software* ANSYS Fluent 16.0. Todos os passos e escolhas feitas por forma a realizar este trabalho serão aqui referidas.

6.2 Domínio Computacional

O objecto escolhido trata-se de um modelo cúbico de lado $L = 6$ [m], com arestas vivas e faces lisas. Uma vez escolhido o obstáculo, o tamanho do domínio computacional, representado na figura 6.1, após algumas iterações, tem as seguintes dimensões: no sentido do escoamento $x = 8L + L + 19L = 168$ [m], no sentido normal ao escoamento $y = 5L + L + 5L = 66$ [m] e em altura $z = L + 7L = 48$ [m].

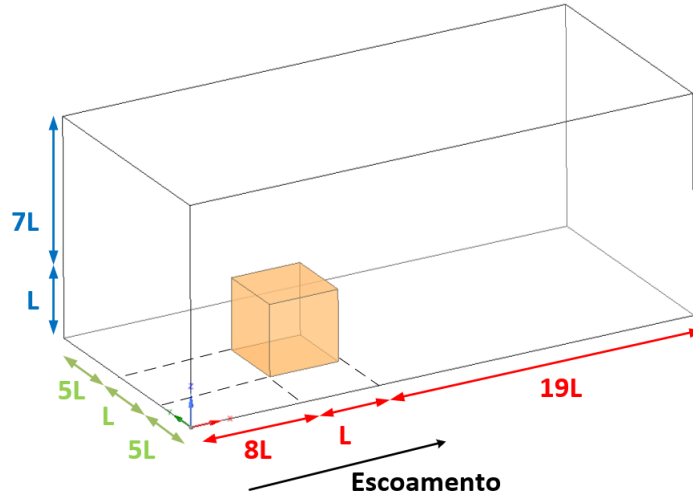
Desta forma o Rácio de Blocagem (RB) para cada plano, calculados a partir da equação 5.1, são os seguintes:

$$R.B_{\text{plano } xy} = \frac{6 \times 6}{168 \times 66} \times 100 \simeq 0,32\%$$

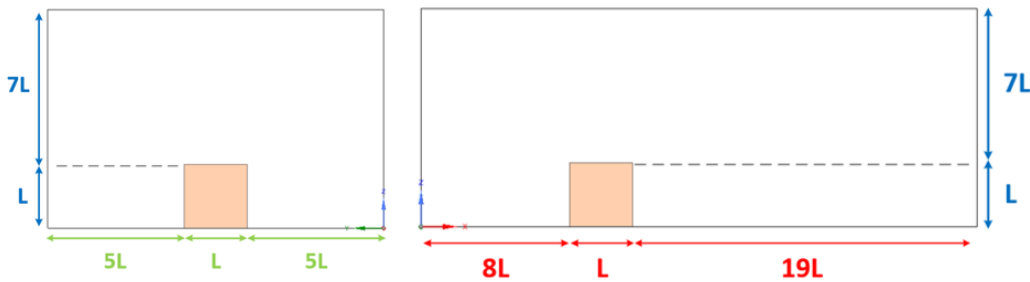
$$R.B_{\text{plano } yz} = \frac{6 \times 6}{66 \times 48} \times 100 \simeq 1,14\%$$

$$R.B_{\text{plano } xz} = \frac{6 \times 6}{168 \times 48} \times 100 \approx 0,45\%$$

Garante-se assim que nenhum dos RB ultrapassa os 1,5% (ver secção 5.2).



(a) Domínio computacional em perspectiva



(b) Domínio computacional no planos zy à esquerda e no plano zx à direita

Figura 6.1: Domínio computacional

6.3 Malha

Para a geração da malha, é necessário ter em conta a altura da primeira célula a partir do chão, devido à rugosidade que será imposta no mesmo, e também tem de se ter em atenção ao y^+ (ver secção 5.3.3).

Para a simulação do terreno do tipo I e II, segundo o EC1 (ver tabela 4.1), a altura da rugosidade aerodinâmica para cada terreno, z_0 , é $z_{0,I} = 0,01$ [m] e $z_{0,II} = 0,05$ [m], mas para se simular essa rugosidade é necessário converter z_0 em k_S (ver secção 5.3.3) a partir da equação 5.11, $k_S = Ez_0/C_S$, com $E = 9,793$ e seja $C_S = 1$, tem-se que $k_S \approx 10z_0$.

$$z_{0,I} = 0,01[\text{m}] \implies k_{S,I} = 0,1$$

$$z_{0,II} = 0,05[\text{m}] \implies k_{S,II} = 0,5$$

Desta forma, para garantir que a altura do centroide da primeira célula a partir do chão do domínio computacional, y_p , tem de ser maior ou igual à rugosidade aerodinâmica, k_S , (ver secção 5.3.3 e figura 5.12) então $y_{p,I} \geq 0,1$ [m] e $y_{p,II} \geq 0,5$ [m].

Segundo a Lei de Parede, por forma a garantir que os valores de $30 < y^+ < 500$, isto é resolver as funções de parede na camada turbulenta, a altura da primeira célula junto às paredes necessita ter no máximo 0,02 [m]. Para se chegar a este resultado é um processo iterativo.

Para qualquer um dos terrenos, a altura da primeira célula no chão é sempre superior a 0,02 [m] (ver secção 5.3.3) mas, uma vez que o cubo tem paredes lisas, é possível garantir esta altura à volta do mesmo.

Para este trabalho foram testadas várias malhas, mas serão aqui discutidas apenas duas que obtiveram melhores resultados e a partir daí decidir a mais vantajosa.

A primeira malha será denominada daqui em diante como Malha 1.

Como se vê na figura 6.2 aplicou-se um dimensionamento da face (*face sizing*) na faces do cubo por forma a garantir que a altura da primeira célula à volta do cubo tinha 0,02 [m] e a partir da função corte de células (*cutcell*) estas obrigatoriamente mantinham-se hexaedros à medida que iam crescendo com um rácio de 1,2 até chegarem ao tamanho das células do resto do domínio.

Uma vez que este crescimento é uniforme, na base no cubo não se consegue garantir a altura y_p de cada terreno, logo foi necessário criar um subdomínio, como se vê na figura 6.2 a azul, onde a zona do chão deste subdomínio não tem rugosidade aerodinâmica. Faz-se notar que no restante domínio computacional a altura da primeira célula a partir do chão garante os y_p para cada terreno.

Com estas definições a Malha 1 era pesada computacionalmente, onde tinha $\simeq 6 \times 10^6$ nós e $\simeq 5 \times 10^6$ elementos para o terreno tipo II, logo para o terreno tipo I esta seria ainda mais pesada, uma vez que a primeira célula a partir do chão pode ser mais pequena.

Uma vez que não se conseguia colocar a rugosidade aerodinâmica a todo o chão do domínio computacional, esta malha foi descartada uma vez que quando se faziam os teste de estabilidade da CLA (ver secção 6.5), os resultados não eram satisfatórios.

A segunda malha será denominada daqui em diante como Malha 2.

Para a Malha 2, dividiu-se todo o domínio computacional em paralelepípedos, como se encontra na figura 6.3, por forma a que na criação de malha se tivesse sempre células do tipo hexaedros sem ter de se usar a função corte de células (*cutcell*).

A partir de funções de enviesamento (*bias*) foi possível criar zonas mais refinadas, como por exemplo perto do cubo, e zonas com células maiores por forma a minimizar o peso da malha e não perder a precisão, como se demonstra na figura 6.4

Para cada aresta da divisória do domínio computacional foi necessário definir os parâmetros de crescimento das células.

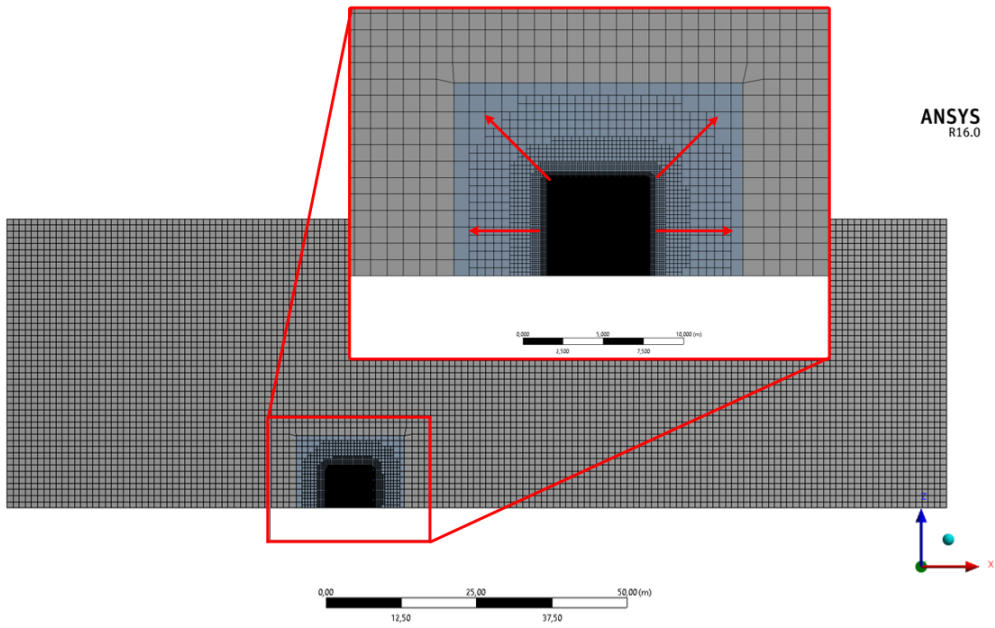


Figura 6.2: Geometria Malha 1

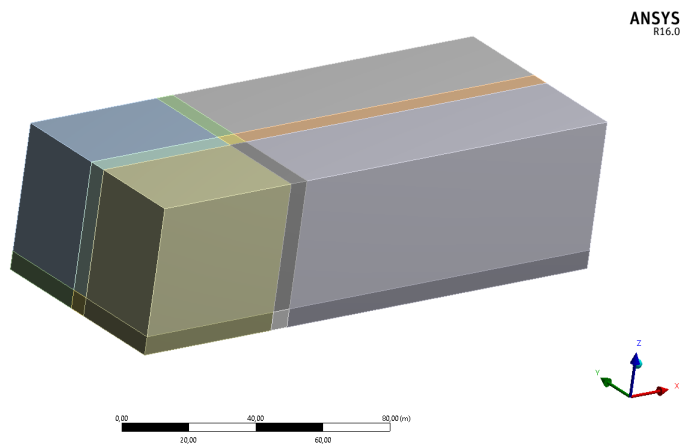


Figura 6.3: Geometria Malha 2

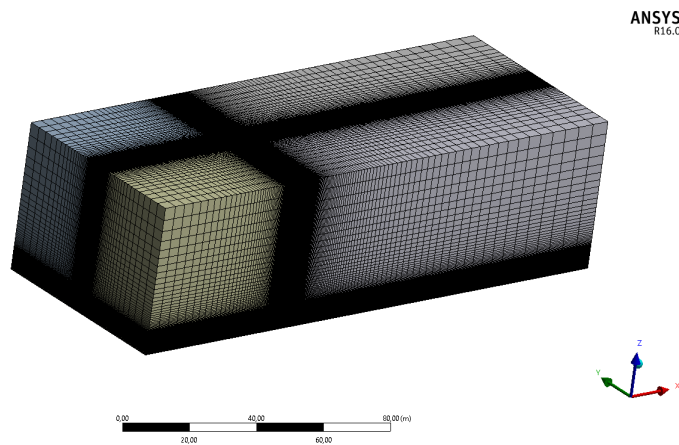
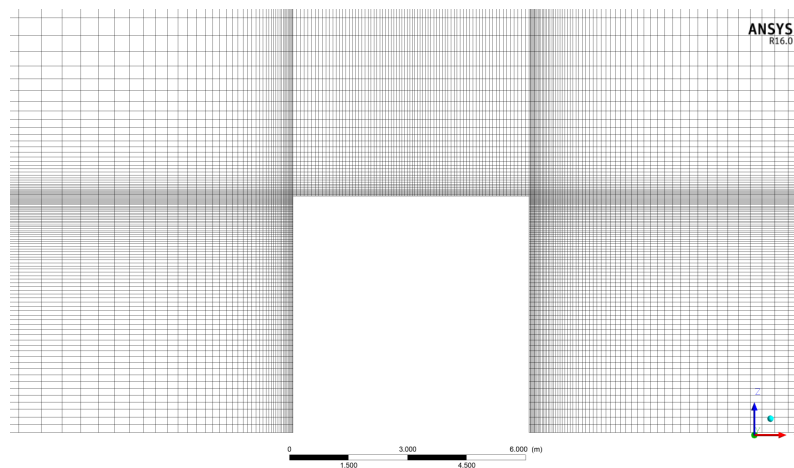
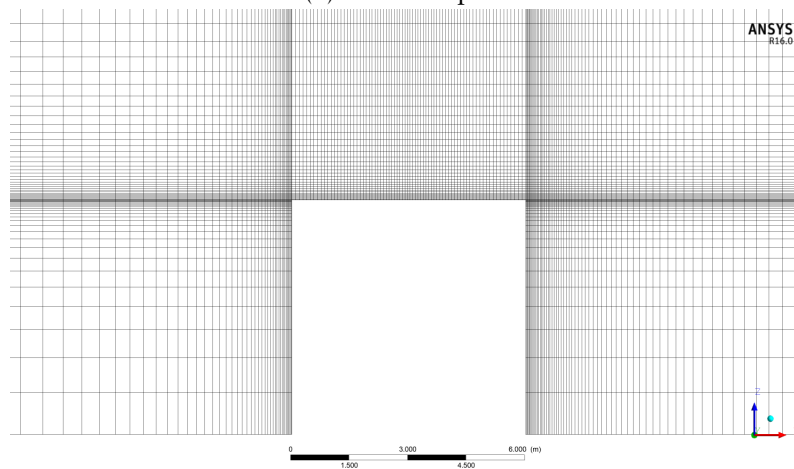


Figura 6.4: Malha 2

Com esta malha existe a vantagem de se conseguir colocar a rugosidade aerodinâmica em todo o chão do domínio, mas com isto, há a desvantagem que, para o terreno de tipo II, como a altura da primeira célula tem 1 [m] uma vez que $y_p \geq 0,5$ [m] então há 1/6 de cada face do cubo que irá ter menor precisão no cálculo dos CP, como demonstra na figura 6.5.



(a) Terreno tipo I



(b) Terreno tipo II

Figura 6.5: Malha 2 - Crescimento das células junto ao cubo

Contrariamente à Malha 1, esta malha tem um peso computacional consideravelmente menor, isto é, para o terreno tipo I a Malha 2 tem $\simeq 4,8 \times 10^6$ nós e $4,5 \times 10^6$ elementos, para o terreno do tipo II a Malha 2 tem $\simeq 3,2 \times 10^6$ nós e 3×10^6 elementos.

Relativamente ao parâmetros de qualidade da Malha 2, tanto a utilizada para o terreno do tipo I como a do tipo II, encontram-se na figura 6.6. Faz-se notar que os valores do alongamento (*aspect ratio*) referem-se à célula com o maior alongamento (*aspect ratio*) dentro do domínio, que se encontra longe o suficiente do cubo para não afetar os resultados mas que pode ter influência na estabilidade e manutenção do perfil de velocidade ao longo do domínio computacional.

| | |
|--|--|
| Mesh Quality: | Mesh Quality: |
| Minimum Orthogonal Quality = 1.00000e+00 | Minimum Orthogonal Quality = 1.00000e+00 |
| Maximum Ortho Skew = 0.00000e+00 | Maximum Ortho Skew = 0.00000e+00 |
| Maximum Aspect Ratio = 3.73880e+02 | Maximum Aspect Ratio = 6.94200e+02 |
| (a) Terreno tipo I | (b) Terreno tipo II |

Figura 6.6: Qualidade da malha 2

Para o restante trabalho ficou decidido usar-se a Malha 2.

Como já se referiu e será falado em maior pormenor à frente, serão realizados testes de estabilidade da CLA e para isso é necessário o domínio computacional vazio, isto é, sem o cubo. Utilizando a Malha 2 para um domínio vazio fica-se com uma malha mais simples e de menor peso computacional, para o terreno tipo I tem $\simeq 1,05 \times 10^6$ nós e $1,009 \times 10^6$ elementos, para o terreno do tipo II a malha tem $\simeq 5,66 \times 10^5$ nós e $5,32 \times 10^5$ elementos

6.4 Setup

Todas as simulações serão realizadas em modo estacionário e escoamento do tipo incompressível.

A partir da geometria definida anteriormente e conseqüentemente a malha, é necessário definir as condições de fronteira. Como se demonstra na figura 6.7, a face de entrada do escoamento será definida como *inlet*, a face do chão como *wall*, as faces do tecto e laterais serão definidas como *symmetry* e a face de saída do escoamento como *outflow* (ver secção 5.5).

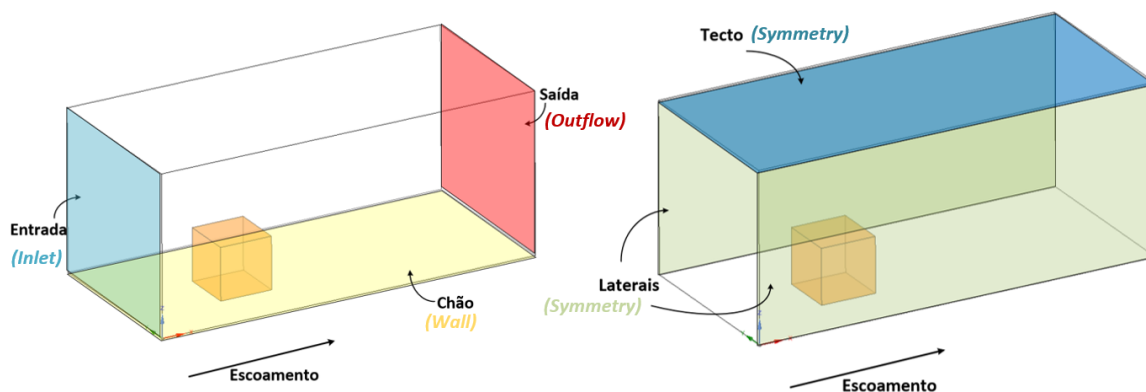


Figura 6.7: Condições de fronteira nas faces do domínio computacional

Na face do chão, a *wall* tem definido a rugosidade aerodinâmica que se deseja, logo para o terreno tipo I tem-se que $C_S = 1$ e $k_{S,I} = 0,1$ [m] e para o terreno tipo II tem-se que $C_S = 1$ e $k_{S,II} = 0,5$ [m].

Na face de entrada do escoamento, *inlet*, serão definidas as condições de entrada, isto é, será imposto o perfil de velocidades e os parâmetros do modelo de turbulência a utilizar.

Para o perfil de velocidades serão utilizadas as equações 4.1, 4.3 e 4.4. Aqui repetidas:

$$U(z) = U_b \cdot c_r(z) \cdot c_o$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

Uma vez que para as simulações serão usados os seguintes modelos de turbulência: modelos *k-ε standard*, *k-ε realizable* e *k-ω SST*, então os parâmetros *k*, *ω* e *ε* definem-se utilizando as seguintes equações [47], respectivamente.

$$k = \frac{3}{2} [U(z) \cdot I_v(z)]^2 \quad (6.1)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (6.2)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa \cdot z} \quad (6.3)$$

Onde u_* pode definir-se a partir das equações 2.11 e 4.1:

$$u_* = U_b \cdot k_r \cdot \kappa \quad (6.4)$$

Estas equações foram compiladas em linguagem tipo C, criando assim uma Função definida pelo utilizador, do inglês *User-Defined Function* (UDF), para cada tipo de terreno, por forma a ser possível implementá-las no *ANSYS Fluent*. O código para cada um terrenos a ser simulado encontra-se no anexo I. Faz-se notar que para a implementação destas UDF, o eixo de referência utilizado é o seguinte: $x = 0$ é na face *inlet* e $z = 0$ é no chão do domínio computacional.

Todos os parâmetros dos modelos de turbulência são os *default* incluindo o tratamento do escoamento perto de parede que utiliza a Lei de Parede *standard*.

Por forma a resolver, o *solver* utilizado será o SIMPLE (ver secção 5.6) onde a discretização espacial de todos os parâmetros é de segunda ordem. A inicialização das simulações foi tipo *standard* a partir do *inlet* e por fim o critério de convergência utilizado foi de 10^{-4} , como aconselhado por vários autores [15, 42, 55].

6.5 Casos a Analisar

As simulação serão divididas em duas tarefas, a primeira é garantir a estabilidade da CLA em domínio computacional vazio, isto é, sem o cubo, com as malhas a utilizar no respectivo tipo de terreno. De seguida fazem-se as computações numéricas para o terreno tipo I e II, com os três modelos de turbulência escolhidos, $k - \varepsilon$ *standard*, $k - \varepsilon$ *realizable* e $k - \omega$ SST.

Os resultados para o terreno tipo I serão comparados com o trabalho de Hoxey et al. (2002) [21], onde foi testado um cubo de 6 [m] em tamanho real e em túnel de vento no Instituto de Investigação de Silsoe e mais tarde Richards et al. (2002) [46] tentaram reproduzir os resultados numericamente. Daqui irá comparar-se qual dos modelos de turbulência irá desempenhar melhor em vários parâmetros, nomeadamente na altura do ponto de estagnação na face frontal do cubo, comprimento da bolha de recirculação, tanto no tecto do cubo como a jusante e a montante do mesmo, e os Coeficiente de Pressão (CP) no cubo.

Já os resultados do terreno tipo II serão feitas para num futuro serem comparados com o trabalho experimental realizado em túnel de vento disponível no Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada (LMFTA) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

Para os resultados dos CP ter-se-á em consideração os limites impostos pelo EC1, para ambos os dois tipos de terreno.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados primeiro os resultados do terreno tipo I e depois os do terreno tipo II.

A primeira tarefa a realizar para cada terreno é a verificação da CLA, isto é, verificar se as definições impostas no *inlet* se mantêm constantes ao longo do domínio computacional vazio, sem qualquer obstáculo.

A segunda tarefa é realizar a simulação do escoamento com o cubo no domínio computacional e observar os efeitos do vento no cubo, a partir dos coeficientes de pressão, e os efeitos do cubo no vento, como os comprimentos das bolha de recirculação, caso existam, no tecto do cubo e a jusante do mesmo e a altura do ponto de estagnação na face frontal do cubo. Estes parâmetros serão comparados entre os vários modelos de turbulência escolhidos.

Os resultados do terreno tipo I serão comparados com o trabalho de Hoxey et al. (2002) [21], onde foi testado um cubo de 6 [m] em tamanho real e em túnel de vento no Instituto de Investigação de Silsoe. Já os resultados do terreno tipo II serão feitas para num futuro serem comparados com o trabalho experimental realizado em túnel de vento disponível no Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada (LMFTA) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

7.2 Terreno tipo I

7.2.1 Estabilidade da CLA

Por forma a validar o modelo numérico utilizado, é necessário numa primeira fase simular a CLA em domínio vazio, isto é sem qualquer obstáculo, mas com as condições de entrada,

modelo de turbulência e condições de fronteira iguais às utilizadas nas simulações finais.

Serão retirados os dados em cinco planos como se mostra na figura 7.1, na entrada do domínio computacional, $X = 0$, à distância onde se encontraria o cubo caso não se tivesse domínio vazio, $X = 8L$, na saída do domínio computacional, $X = 28L$, e em dois planos intermédios, por forma a ver-se o desenvolvimento dos parâmetros, $X = 4L$ e $X = 18L$.

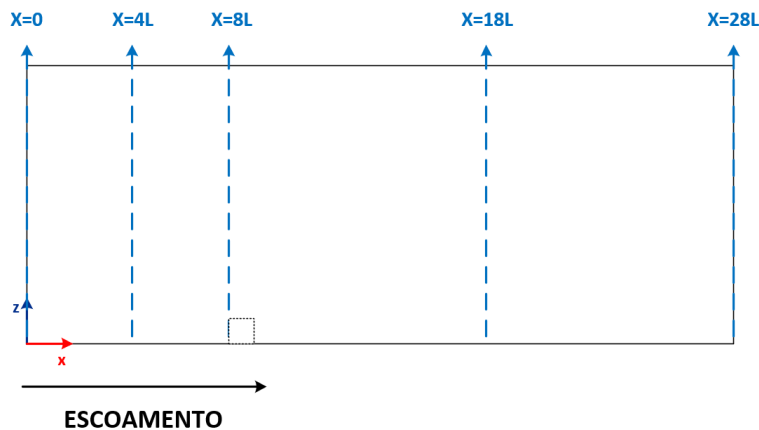


Figura 7.1: Planos utilizados para os testes de estabilidade

Para os testes de estabilidade é necessário analisar vários parâmetros: o perfil de velocidade de entrada, de forma adimensional, U/U_b , a energia cinética turbulenta, k , a sua taxa de dissipação, ε ou ω , e a intensidade de turbulência ao longo do domínio computacional na direção do escoamento, x^+ . Será feita uma comparação de qual dos modelos de turbulência escolhido tem melhor desempenho. Para estes testes os dados serão retirados dos planos anteriormente escolhidos.

Para o domínio computacional do terreno tipo I, os parâmetros para a análise de estabilidade encontram-se na tabela 7.1.

Na primeira linha da tabela 7.1 tem-se o desenvolvimento do **perfil de velocidade de forma adimensional**, U/U_b , ao longo do domínio computacional. O comportamento dos três modelos de turbulência face à estabilidade do perfil de velocidade é o muito semelhante, até à altura $Z/L = 1,5$ nenhum dos modelos foi capaz de manter o perfil de entrada devido à rugosidade aerodinâmica e à altura da primeira célula do domínio mas, apesar de a diferença ser visível é necessário ter em atenção que se trata de uma variação máxima de 15% e isto é nos extremos do domínio, $X = 0L$ e $X = 28L$. Quando se faz a comparação entre a entrada do domínio e o plano onde se encontraria o cubo, isto é entre $X = 0L$ e $X = 8L$, a variação é de no máximo de 5%.

A comparação da **energia cinética turbulenta**, k , encontra-se na segunda linha e os resultados dos três modelos de turbulência têm tendências diferentes.

Para o modelo $k - \varepsilon$ *standard* há uma grande perda de k ao longo do domínio computacional que vai de valores iniciais de $\approx 3,5[m^2/s^2]$, para $X = 0L$, até $\approx 1[m^2/s^2]$, para $X = 28L$, o que equivale a uma perda de $\approx 71\%$ ao longo de todo o domínio, e uma perda de $\approx 30\%$ até ao plano $X = 8L$. No gráfico deste modelo de turbulência sobressai que para cada plano existe uma "barriga" e isto deve-se ao facto de nesse plano, existe uma faixa ao longo da direção Y onde o parâmetro k não é constante como por exemplo para o plano $X = 28L$ como se demonstra na figura 7.2, para $1 < Z/L < 3$ os valores de k variam entre $1,12 < k < 1,17[m^2/s^2]$ ao longo de Y .

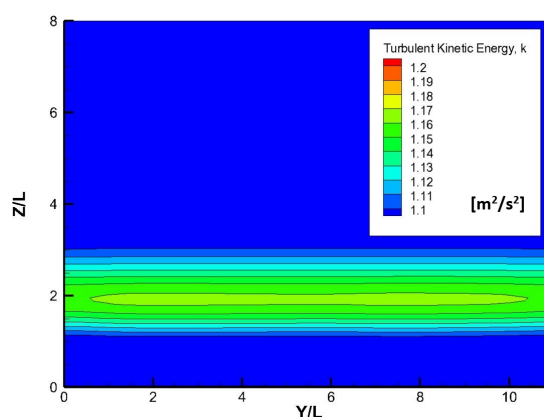


Figura 7.2: Plano $X=28L$ - variação da energia cinética turbulenta na faixa $1 < Z/L < 3$

Nos modelos $k - \varepsilon$ *realizable* e $k - \omega$ SST as curvas têm a mesma tendência mas no primeiro modelo há uma perda maior de k ao longo do domínio e à altura do cubo, isto é $Z/L = 1$, a energia cinética turbulenta, k , passa de $X_{0L} \approx 3,6$ para $X_{8L} \approx 3,2$ logo há uma perda de $\approx 11\%$ até chegar ao plano onde se encontraria o cubo. Já no segundo modelo a partir de $Z/L \approx 2,5$ não há praticamente perda de k mas à altura do cubo, isto é $Z/L = 1$, a energia cinética turbulenta, k , passa de $X_{0L} \approx 3,6$ para $3,55 < X_{8L} < 3,9$. Esta variação e "barriga" presente no gráfico tem a mesma explicação dada anteriormente e tem o mesmo efeito visual que se encontra na figura 7.2.

Na terceira linha da tabela tem-se a **taxa de dissipação** de cada modelo, onde nos modelos $k - \varepsilon$ para valores menores de $\varepsilon < 0,5[m^2/s^3]$ as tendências dos gráficos alteram-se, isto é, para o modelo *standard* a taxa de dissipação turbulenta vai-se perdendo não só em altura como em comprimento do domínio, e o mesmo não se verifica para o modelo *realizable*.

Para o modelo $k - \omega$ SST a taxa de dissipação específica, ω , vai crescendo ao longo do domínio computacional no sentido do escoamento.

Por fim, na última linha da tabela 7.1 tem-se a **intensidade de turbulência** calculada a partir da equação 2.18, $TI = \sqrt{2k/3}/U_b$. O seu comportamento para os três modelos de turbulência tem a mesma tendência que os gráficos de k como era esperado.

Tabela 7.1: Estabilidade - Terreno Tipo I

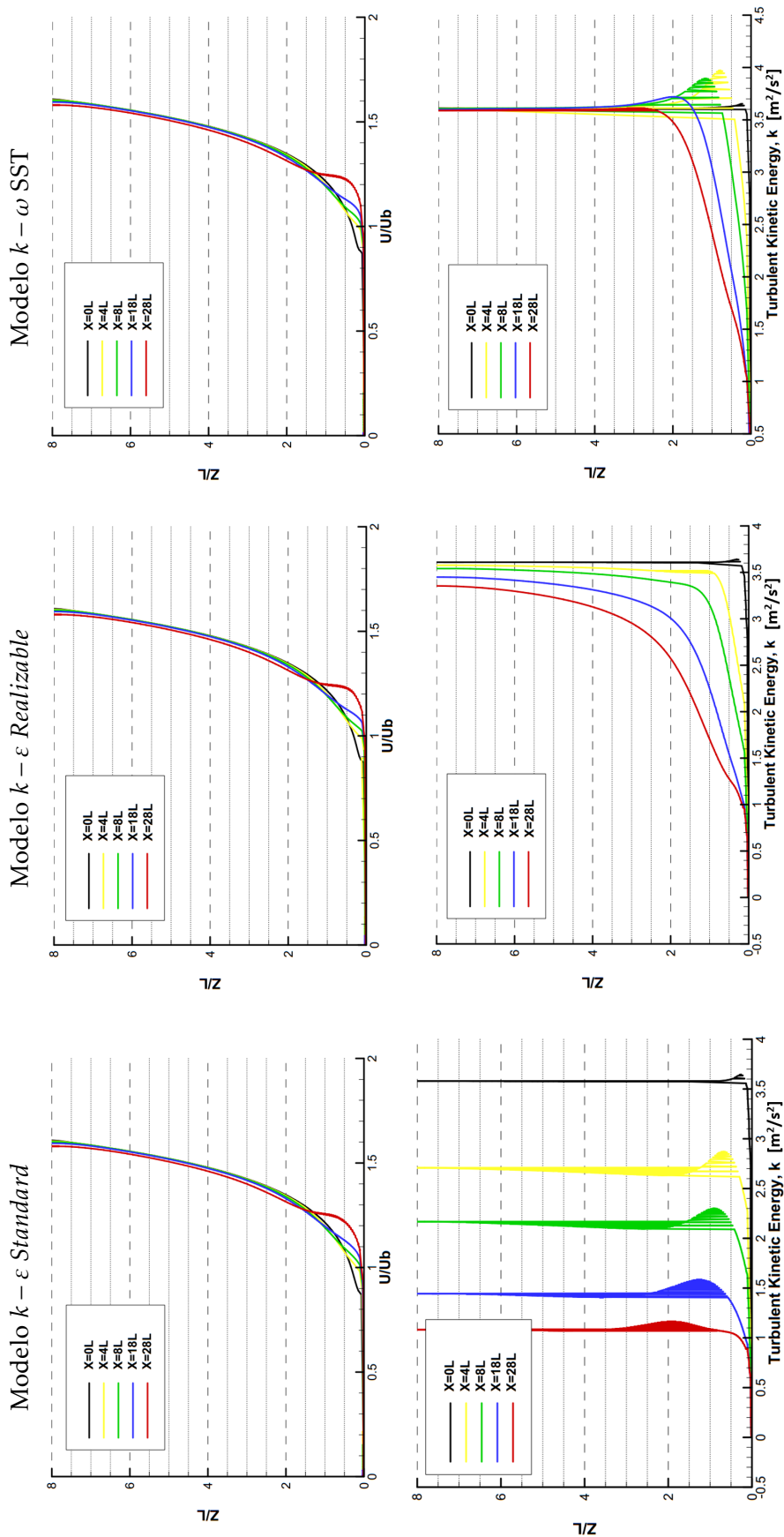
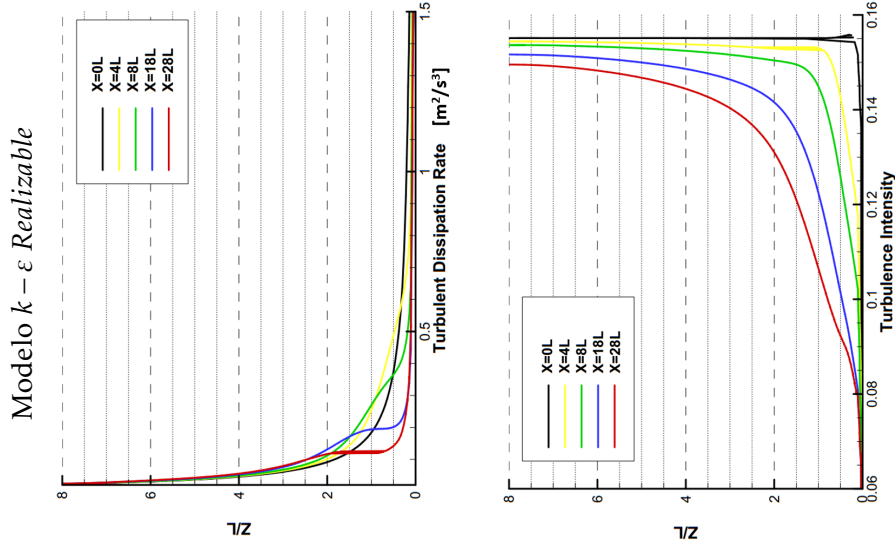
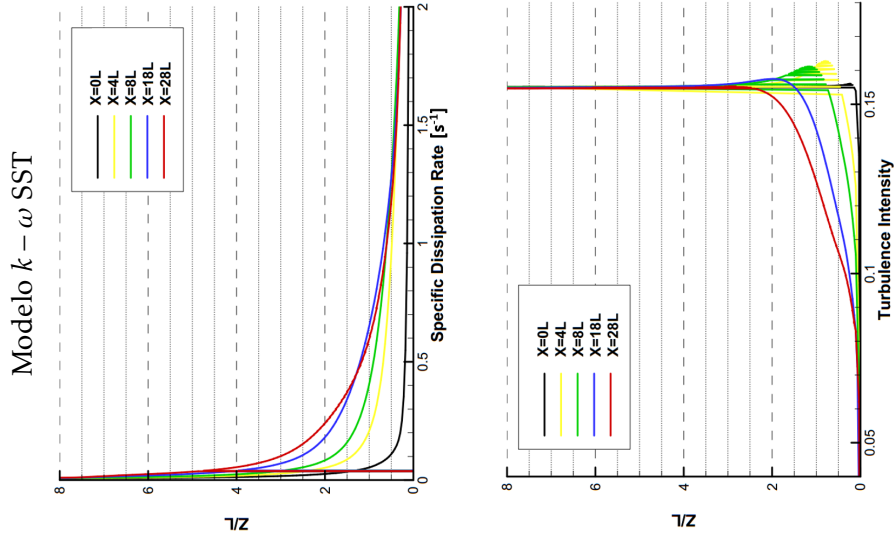


Tabela 7.1: (Continuação)
 Modelo $k - \varepsilon$ Realizable



7.2.2 Verificação de y^+

Como foi descrito na secção 5.3.3, para este trabalho é necessário resolver a Lei de Parede Padrão na *log-law region*, onde o ideal será ter a distância à parede adimensional, y^+ , dentro dos seguintes limites: $30 < y^+ < 500$.

Verifica-se y^+ , nos três modelos de turbulência, para cada face do cubo na forma planificada do mesmo, como se encontra representado na figura 7.3, e por baixo é possível ver-se na perspectiva isométrica no sentido positivo e negativo do escoamento, por forma a ver-se todas as faces do cubo.

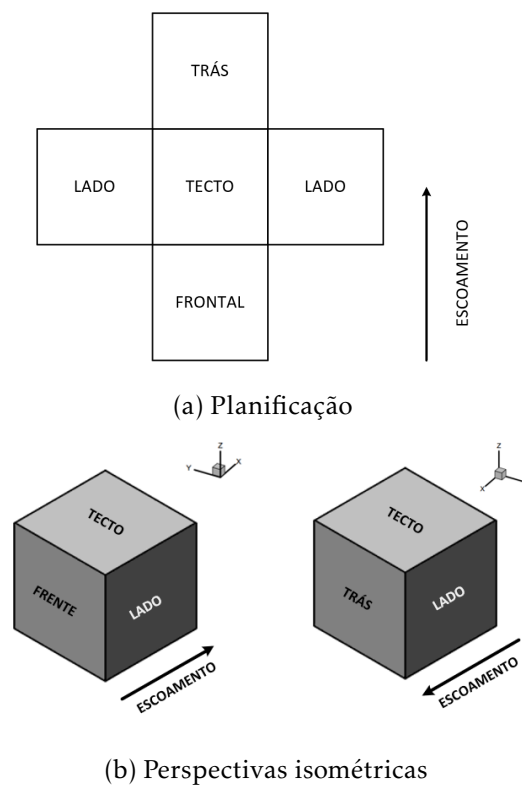
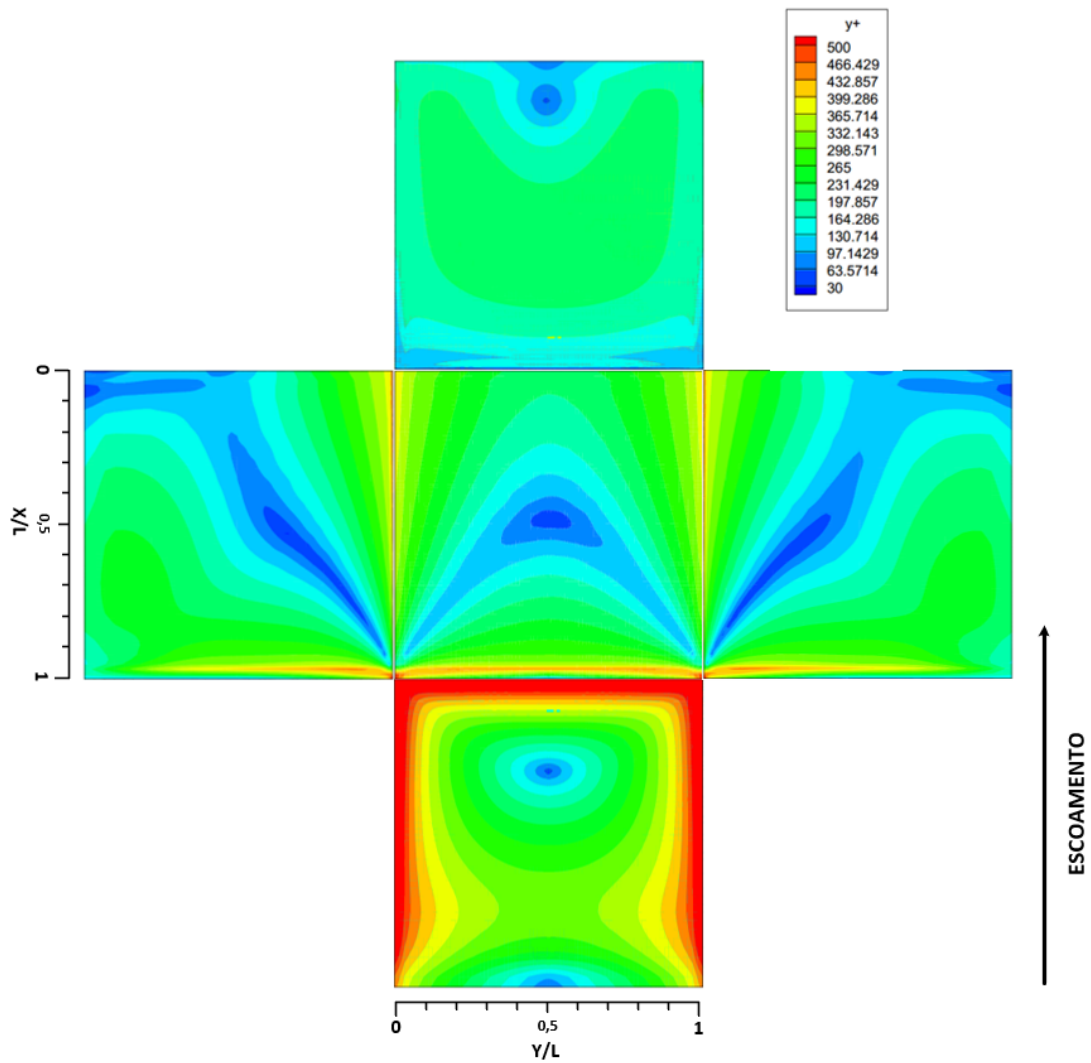


Figura 7.3: Representação gráfica

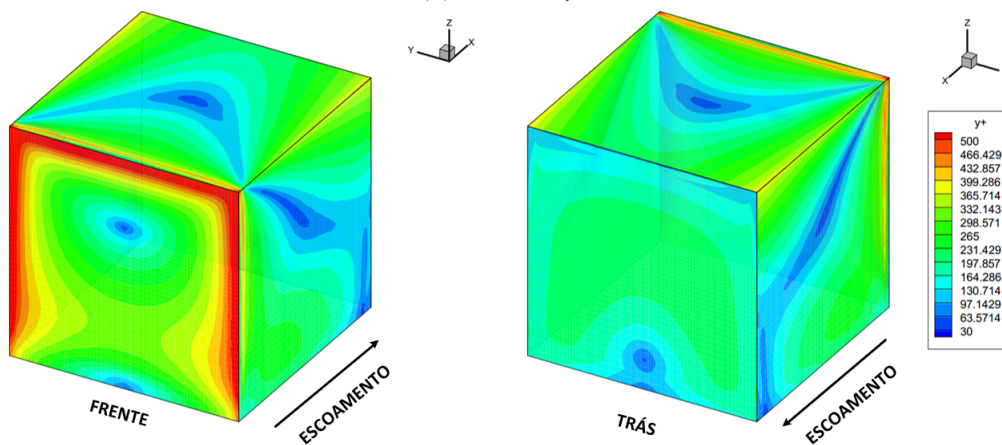
Nos três modelos de turbulência o padrão do y^+ na face frontal é muito semelhante, nas periferias desta mesma face todos os modelos têm y^+ no seu limite máximo ou chega mesmo a ultrapassar por pouco, mas é uma área pequena relativamente ao resto da face. Nas restantes faces dos três modelos os valores encontram-se dentro dos parâmetros aceitáveis.

No modelo $k - \omega$ SST, nas faces do tecto e trás do cubo, o padrão do y^+ não é completamente simétrico e isto deve-se ao facto de o escoamento a jusante do cubo não ser completamente simétrico (ver secção 7.2.3).

Por forma a obter-se estes resultados, a altura da primeira célula das malhas nas faces do cubo foi de aproximadamente entre 1 e 2 [cm].

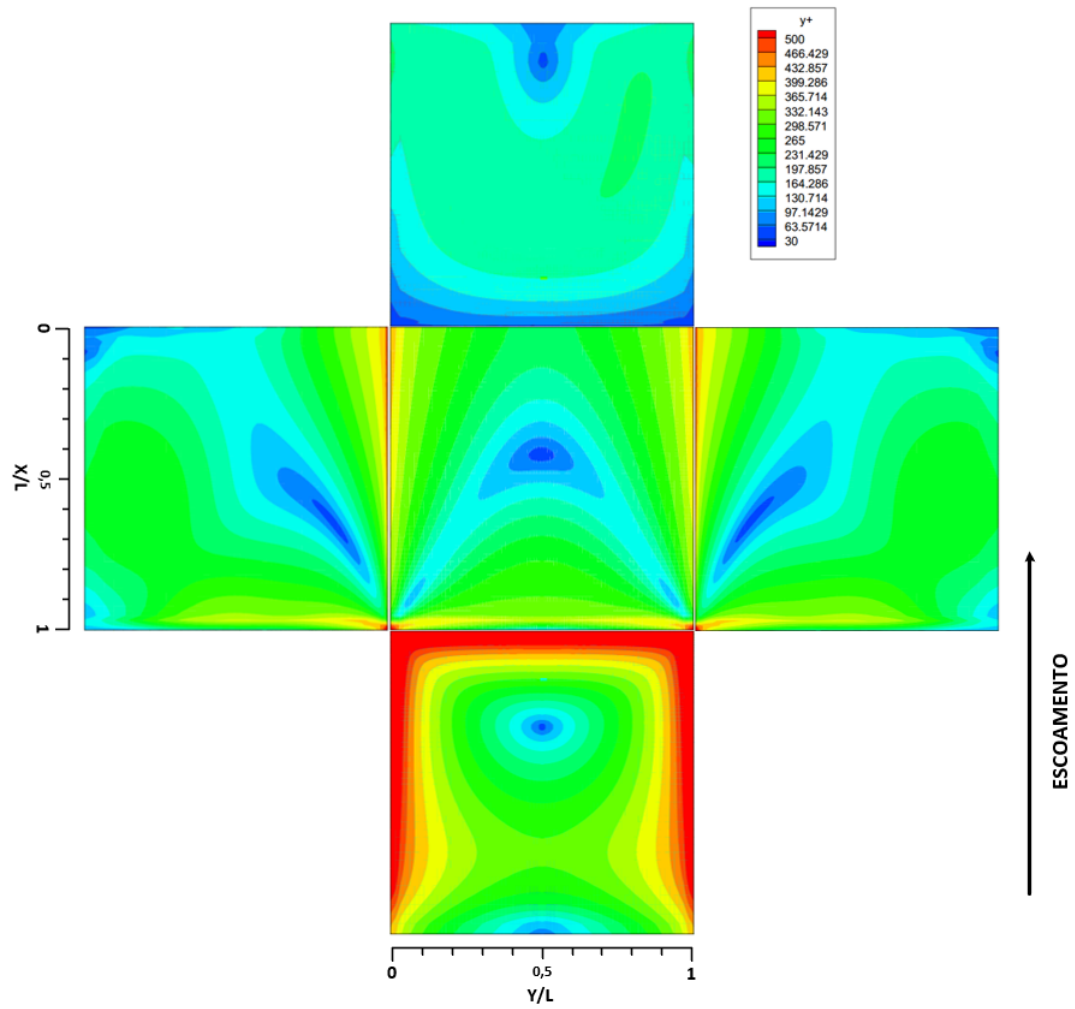


(a) Planificação

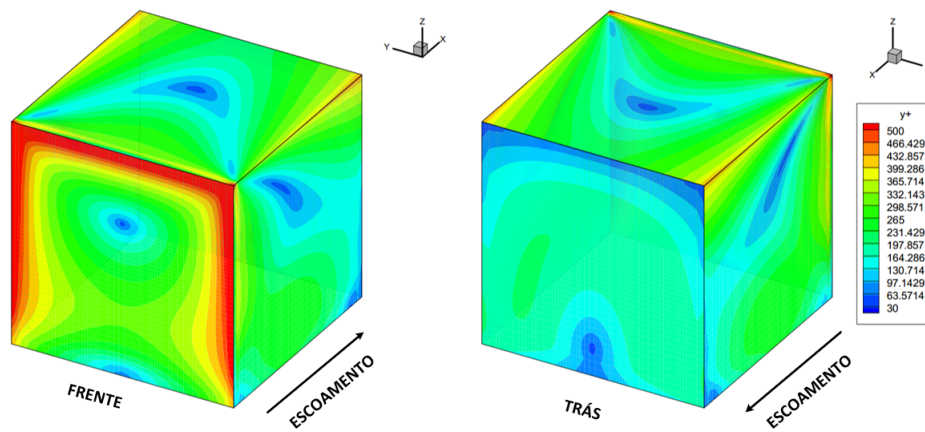


(b) Perspectivas isométricas

Figura 7.4: y^+ - Modelo $k - \varepsilon$ Standard

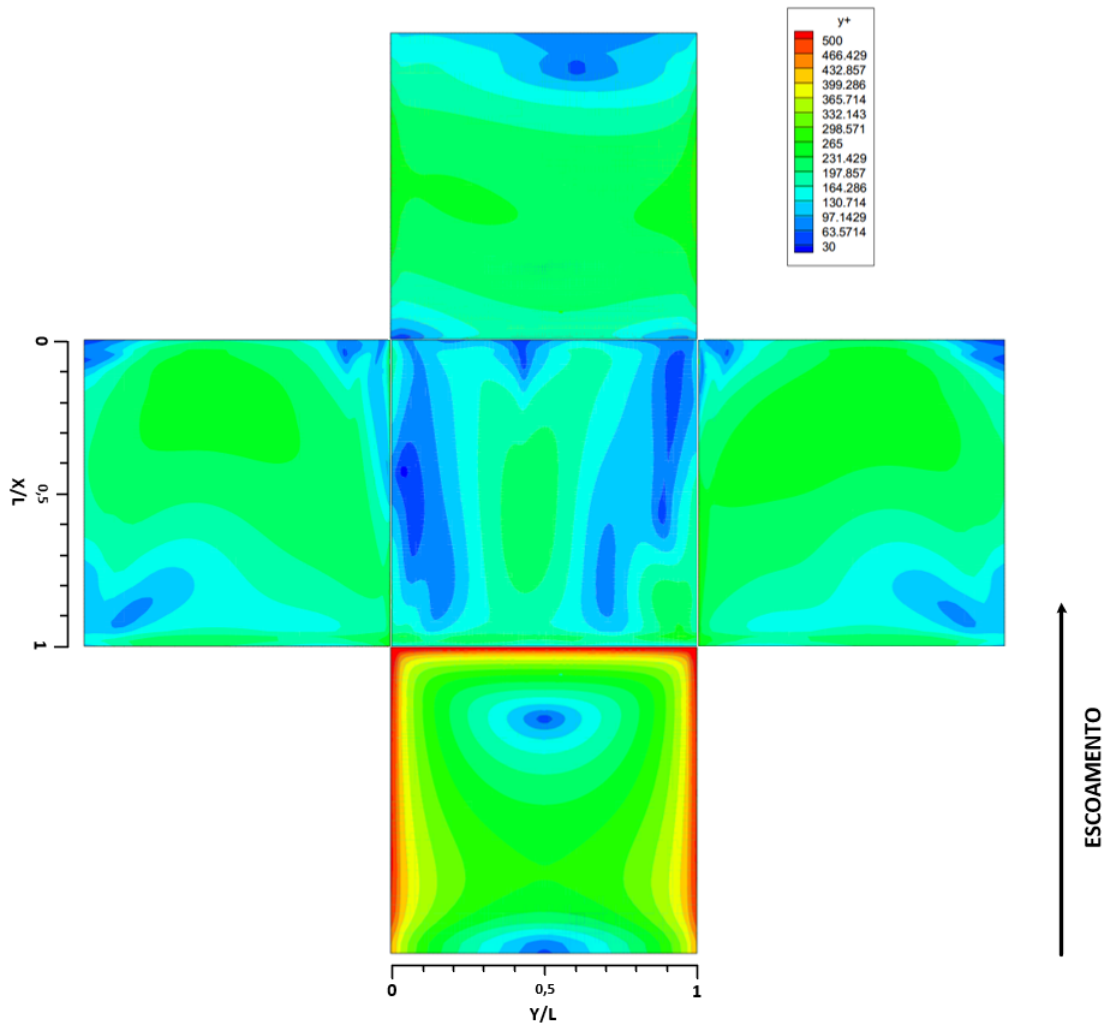


(a) Planificação

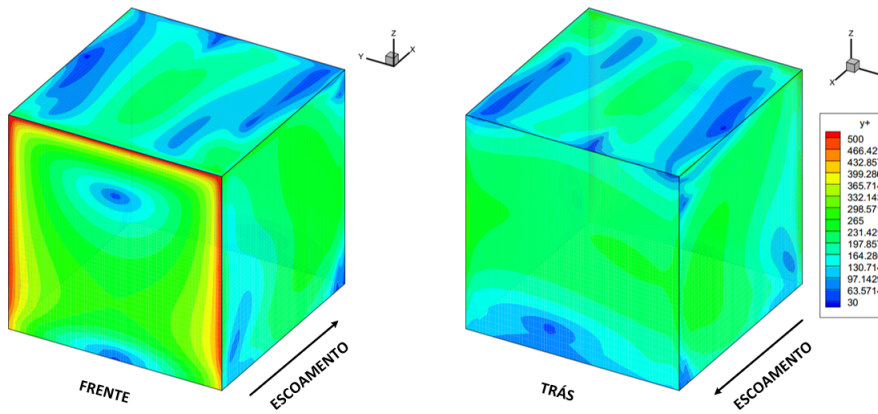


(b) Perspectivas isométricas

Figura 7.5: y^+ - Modelo $k - \varepsilon$ Realizable



(a) Planificação



(b) Perspectivas isométricas

Figura 7.6: y^+ - Modelo $k - \omega$ SST

7.2.3 Campo de Velocidades

Na tabela 7.2 encontra-se o desenvolvimento do perfil de velocidade ao longo do domínio e na forma como incide no cubo, para cada modelo de turbulência utilizado. Em cada linha da tabela tem-se os planos que intermédios do cubo, isto é plano $X=8,5L=51$ [m], $Y=5,5L=33$ [m] e $Z=0,5L=3$ [m], respectivamente. Os planos encontram-se representados na figura 7.7. Faz-se notar que o sentido do escoamento é no sentido positivo de x^+ .

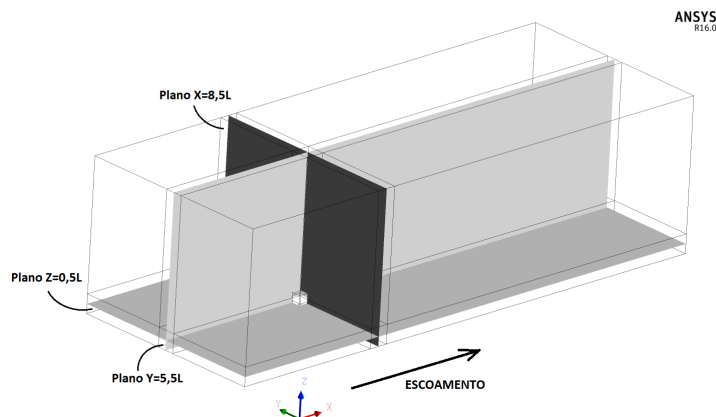


Figura 7.7: Planos intermédios do cubo

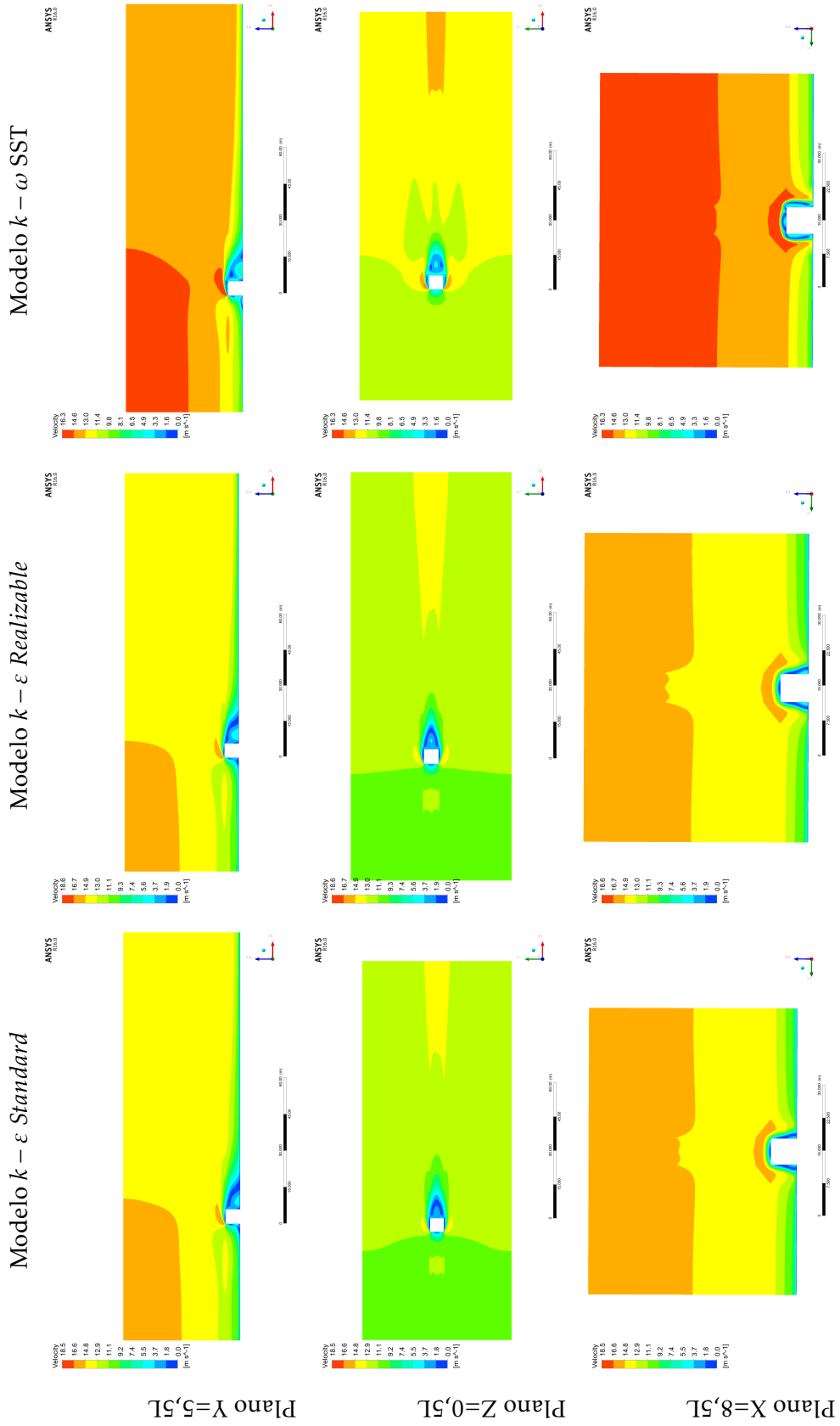
O desenvolvimento do campo de velocidades dos modelos $k - \epsilon$ *standard* e *realizable* é muito semelhante, é possível perceber que as fronteiras do domínio computacional estão longe o suficiente para não interferir com o escoamento incidente no cubo. No modelo $k - \omega$ SST, apesar do desenvolvimento em redor do cubo, no plano $Z=0,5L$, ser ligeiramente diferente, retira-se que as fronteiras também estão longe o suficiente para não terem tido interferência no escoamento incidente no cubo.

Faz-se notar que o desenvolvimento do perfil de velocidades antes de incidir no cubo, no plano $Y=5,5L$, nos três modelos de turbulência têm o aspecto esperado de um perfil de velocidades de uma CLA.

Nos três modelos, o escoamento a jusante do cubo, no plano $Z=0,5L$, é possível ver que o escoamento não é completamente simétrico o que significa que, caso se aumentasse a convergência dos resultados, possivelmente iria aparecer uma flutuação periódica no gráfico de resíduos da simulação numérica, o que poderia significar uma esteira de Von Karman. Uma vez que o número de Reynolds do escoamento é muito elevado, $Re = \bar{u}L/\nu \approx (10 \times 6)/(1,51 \times 10^{-5}) \approx 4 \times 10^6$ (no caso do ar a 20° , $\nu = 1,51 \times 10^{-5} [m^2/s]$), os vórtices não se conseguem gerar de forma periódica (ver secção 3.1), ou seja mesmo caso se realizasse uma simulação numérica em transiente há a possibilidade de nem a esteira de Von Karman aparecer [21, 55].

Esta assimetria do escoamento a jusante do cubo explica o porquê que de a representação do y^+ nas faces do tecto e trás do cubo não serem simétricas também (ver figura 7.6).

Tabela 7.2: Campo de Velocidades - Terreno Tipo I



7.2.4 Comprimentos de Recirculação

Nas figuras seguintes encontram-se representadas no plano $Y=5,5L$, que corresponde ao plano que corta ao meio todo o domínio no sentido do escoamento, apenas a velocidade x negativa, $U_x(z) < 0$, desta forma é possível retirar de forma mais precisa o tamanho das bolhas de recirculação como os pontos de estagnação. No fim desta secção, estes resultados serão comparados com os do trabalho de Hoxey et al. (2002) [21].

No modelo $k - \varepsilon$ *standard* é possível ver-se as zonas de recirculação na figura 7.10, a montante do cubo, a bolha de recirculação começa a cerca de $7,45L$ do *inlet*, logo tem cerca de $0,55L$ de comprimento, e o ponto de estagnação dá-se a uma altura de $0,15L$ a partir do chão do domínio. A jusante do cubo a zona de recirculação é consideravelmente maior e chega aos $10,7L$, logo tem cerca de $1,7L$, e com uma altura de $0,8L$.

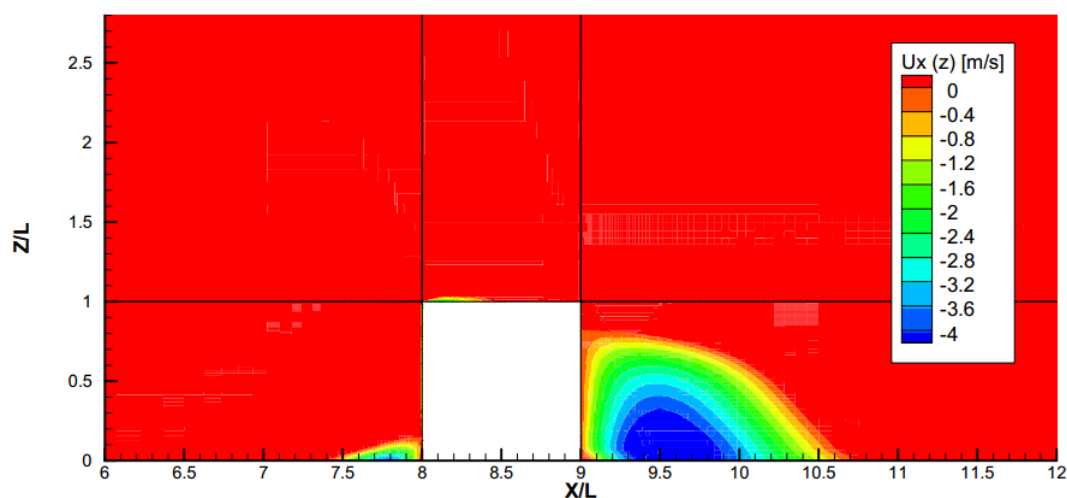


Figura 7.8: Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ *Standard*

Uma vez que na figura anterior não é possível ver-se com clareza a zona de recirculação no tecto do cubo, tem-se representado na figura 7.11 de forma mais pormenorizada. Daqui retira-se que no tecto do cubo a bolha de recirculação começa na aresta viva do mesmo e vai até $\approx 8,5L$ logo ocupa cerca de 50% do tecto e tem apenas uma altura de $0,035L$, a partir do tecto, daí não ser bem visível na figura 7.10.

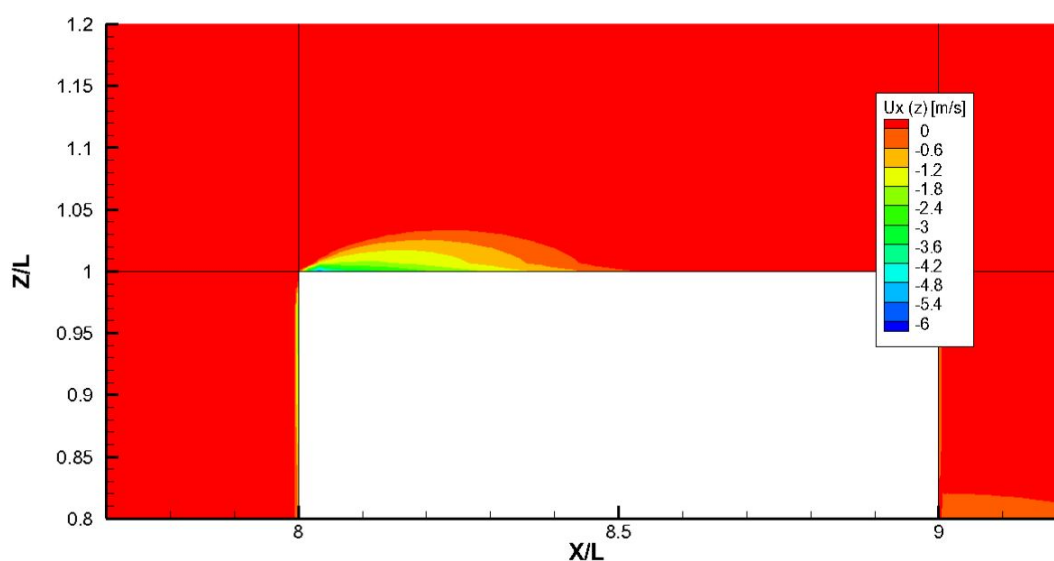


Figura 7.9: Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ Standard

No modelo $k - \varepsilon$ *realizable* os tamanhos das zonas de recirculação representadas na figura 7.10 não diferem muito das retiradas do modelo $k - \varepsilon$ *standard*. A montante do cubo o comprimento da bolha de recirculação começa aos $7,6L$, logo tem $0,4L$ de comprimento e o ponto de estagnação a uma altura $\approx 0,12L$. A jusante do cubo a zona de recirculação também chega aos $10,7L$ com uma altura de $0,8L$.

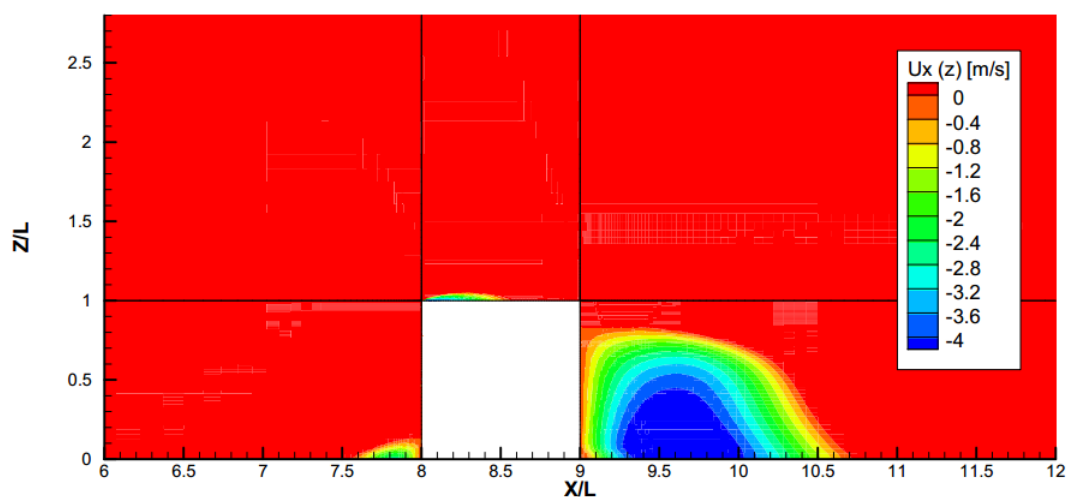


Figura 7.10: Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ Realizable

Neste modelo, tal como no anterior, a zona de recirculação no tecto do cubo é muito pequena, logo é necessário uma análise mais pormenorizada dessa secção do escoamento, como se encontra na figura 7.9. No tecto do cubo a bolha tem cerca de $0,55L$, a partir da aresta, com uma altura de $0,05L$

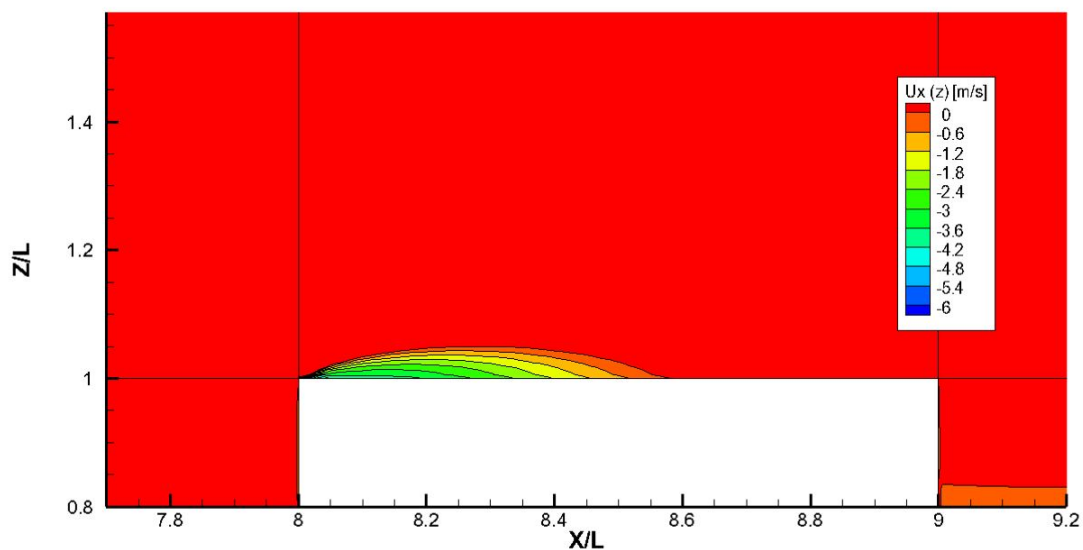


Figura 7.11: Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ Realizable

As zonas de recirculação no modelo $k - \omega$ SST, como é visível na figura 7.12, apresentam formas e tamanhos ligeiramente diferentes dos outros dois modelos anteriores. A montante do cubo a bolha de recirculação é mais comprida começando aos $7,15L$, logo tem um comprimento de $0,85L$ e com uma altura de $0,2L$. A jusante do cubo a zona de recirculação é apenas um bocadinho mais comprida com $1,75L$ desde a face de trás do cubo, com uma altura $\approx 0,8L$.

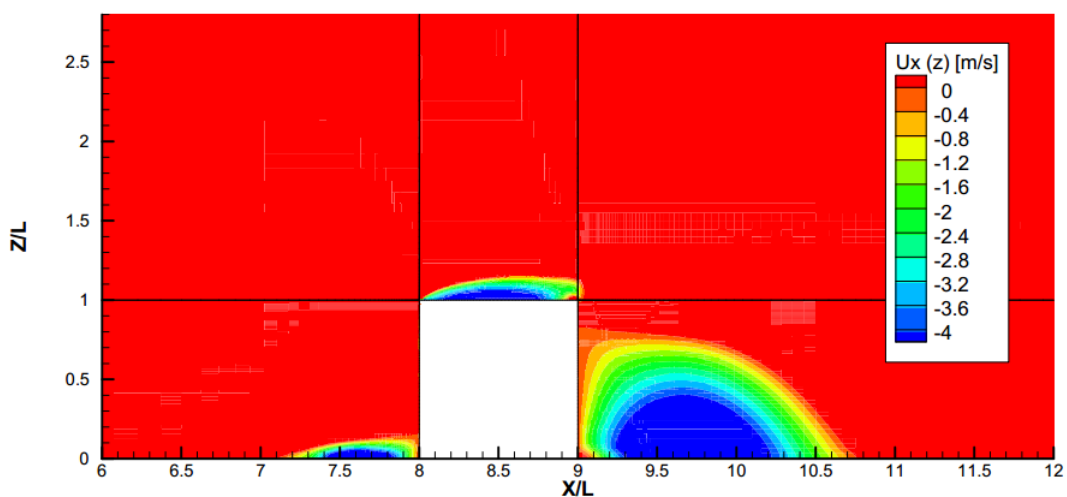


Figura 7.12: Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo I - Modelo $k - \omega$ SST

A zona de recirculação do tecto do cubo é muito diferente, como se demonstra em pormenor na figura 7.13, das representadas pelos modelos anteriores. Neste modelo a zona de recirculação vai desde a aresta do cubo até 90% da face do tecto onde descola

mas volta a recolar já na face de trás do cubo. Esta bolha tem cerca de $0,15L$ desde a face do tecto do cubo.

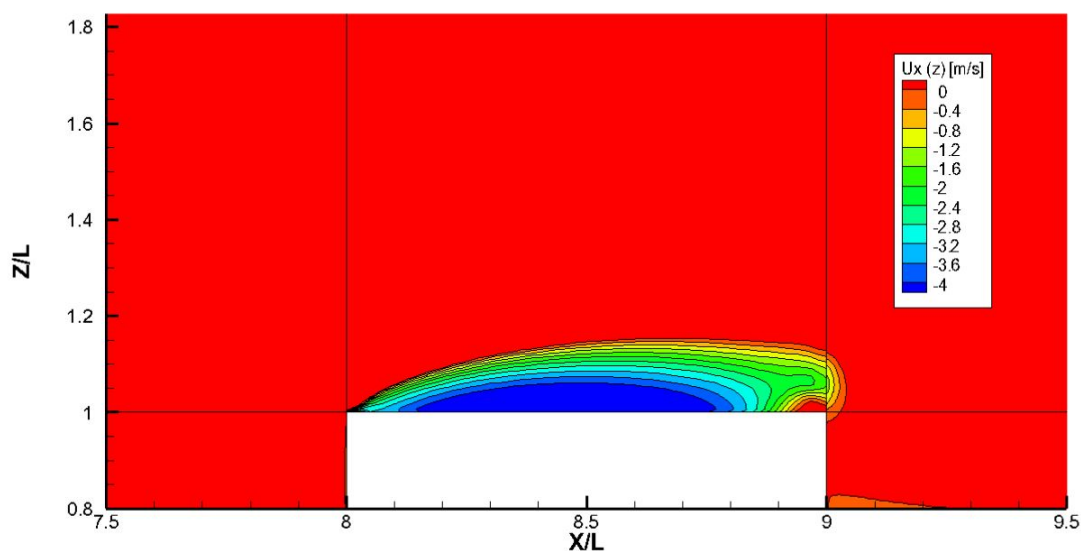


Figura 7.13: Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo I - Modelo $k - \omega$ SST

Como foi dito anteriormente, os resultados obtidos nesta secção são comparados com os obtidos por Hoxey et al.(2002) [21] e encontram-se na tabela 7.3. Verificam-se que os erros são significativos mas é necessário ter em atenção que se tratam de valores de uma ordem de grandeza pequena. Apesar do erro, todos os valores encontram-se dentro da mesma gama de valores, com excepção da altura do ponto de estagnação na face da frente do cubo.

Tabela 7.3: Comparação resultados com Hoxey et al.(2002) [21]

| | | Modelo $k - \varepsilon$ <i>standard</i> | | Modelo $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> | | Modelo $k - \omega$ SST | | Hoxey et al. (2002) [21] |
|-------|--------|---|----------|---|----------|----------------------------|----------|-----------------------------|
| | | X/L | Erro [%] | X/L | Erro [%] | X/L | Erro [%] | X/L |
| Mont. | Comp. | 0,55 | 26,7 | 0,4 | 46,7 | 0,85 | 13,3 | 0,75 |
| | Altura | 0,15 | 70 | 0,12 | 76 | 0,2 | 60 | 0,5 |
| Jus. | Comp. | 1,7 | 21,4 | 1,7 | -21,4 | 1,75 | 25 | 1,4 |
| | Altura | 0,8 | - | 0,8 | - | 0,8 | - | - |
| Tecto | Comp. | 0,5 | 12,3 | 0,55 | 3,5 | 0,9 | 57,9 | 0,57 |
| | Altura | 0,035 | - | 0,05 | - | 0,15 | - | - |

7.2.5 Coeficientes Pressão

Os coeficientes de pressão para cada face do cubo são calculados a partir da equação 3.3, $C_p = (p_s - p_0)/(0,5\rho\bar{u}^2)$, e serão representados para cada modelo de turbulência segundo a representação da figura 7.14, desta forma é possível verificar os coeficientes em todas as faces do cubo.

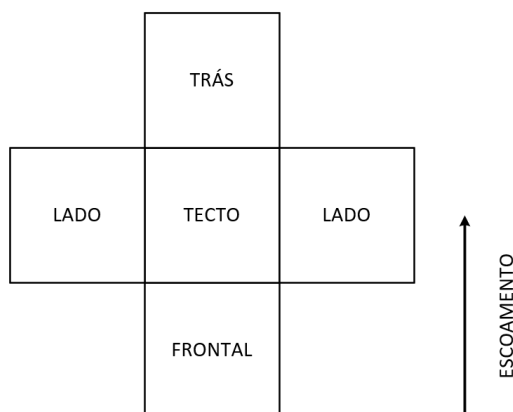


Figura 7.14: Planificação do cubo

Os resultados retirados desta secção serão depois comparados com os resultados dos trabalhos anteriormente referidos [21, 46], que se encontram na figura 7.18, e com os limites permitidos dos coeficientes pelo EC1, referidos na secção 4.4.

Relativamente aos resultados obtidos neste trabalho, com o modelo $k - \varepsilon$ *standard e realizable*, que se encontram nas figuras 7.15 e 7.16 respectivamente, a distribuição dos coeficientes de pressão é muito semelhante.

Na face frontal, na secção central ($Y/L = 0,5$) no sentido do escoamento os valores variam entre $0,4 < c_p < 1$ praticamente sempre crescente, com excepção na parte inferior da face, e os resultados são simétricos relativamente a esta mesma secção. Na mesma face mas a meia altura, a distribuição dos coeficientes varia muito pouco e que é crescente das arestas para o centro da face onde $0,6 < c_p < 0,8$. Estes resultados, comparados com os resultados de [21, 46] que se encontram na figura 7.18, são semelhantes, e encontram-se dentro dos parâmetros do EC1, que diz que os valores não podem ultrapassar de $c_p > 1$ (ver tabela 4.2).

Na face do tecto do cubo, na secção central ($Y/L = 0,5$) no sentido do escoamento, os valores vão desde $c_{p,min} = -2$ mesmo na aresta mas aos 5%, a partir da mesma aresta, o coeficiente já se encontra entre $-1,4 < c_p < -1,1$ e a partir vai sempre crescendo até $c_{p,max} = -0,1$. Nos resultados de [21, 46] no cubo em escala real, o $c_{p,min} = -1$ aos 12,5% do tecto que vai crescendo até $c_{p,max} = -0,4$ mesmo no limite do tecto. Os resultados retirados dos dois modelos encontram-se dentro dos parâmetros do EC1 (ver tabela 4.3) onde nos primeiros 10% do tecto os valores não podem ultrapassar $c_p < -2,5$ e que no limite do tecto estes podem chegar a $c_p = +0,2$.

As faces laterais do cubo desdes dois modelos, $k-\varepsilon$ *standard* e *realizable*, são simétricas entre elas. A meia altura, nos primeiros 10% no sentido do escoamento, os valores são muito baixo que vão entre $-1,8 < c_p < -0,7$ mas nos restantes 90% permanecem quase constantes com valores entre $-0,5 < c_p < -0,3$. Estes últimos 90% da secção no sentido do escoamento, vão de encontro com os resultados de [21, 46] e ficam muito abaixo dos limites máximos do EC1 (ver tabela 4.2), mas os valores de [21, 46] têm um pico no valor de $c_p = -1$ a 12,5% da aresta o que é semelhante ao resultado obtido.

A face de trás do cubo os coeficientes de pressão são praticamente constantes com $-0,3 < c_p < -0,1$ que vão de encontro aos resultados obtidos por [21, 46] com $-0,5 < c_p < -0,4$.

Os resultados obtidos a partir do modelo $k-\omega$ SST, que se encontram na figura 7.17, são ligeiramente diferentes, aqui na face frontal a área com coeficientes entre $0,8 < c_{p,max} < 1$ é consideravelmente menor mas o sentido de crescimento dos coeficientes é igual aos outros modelos.

Nas faces laterais e do tecto os coeficientes são praticamente constantes com $-0,5 < c_p < -0,3$ em toda a face. Por fim na face de trás os valores pouco variam entre $-0,5 < c_p < -0,1$.

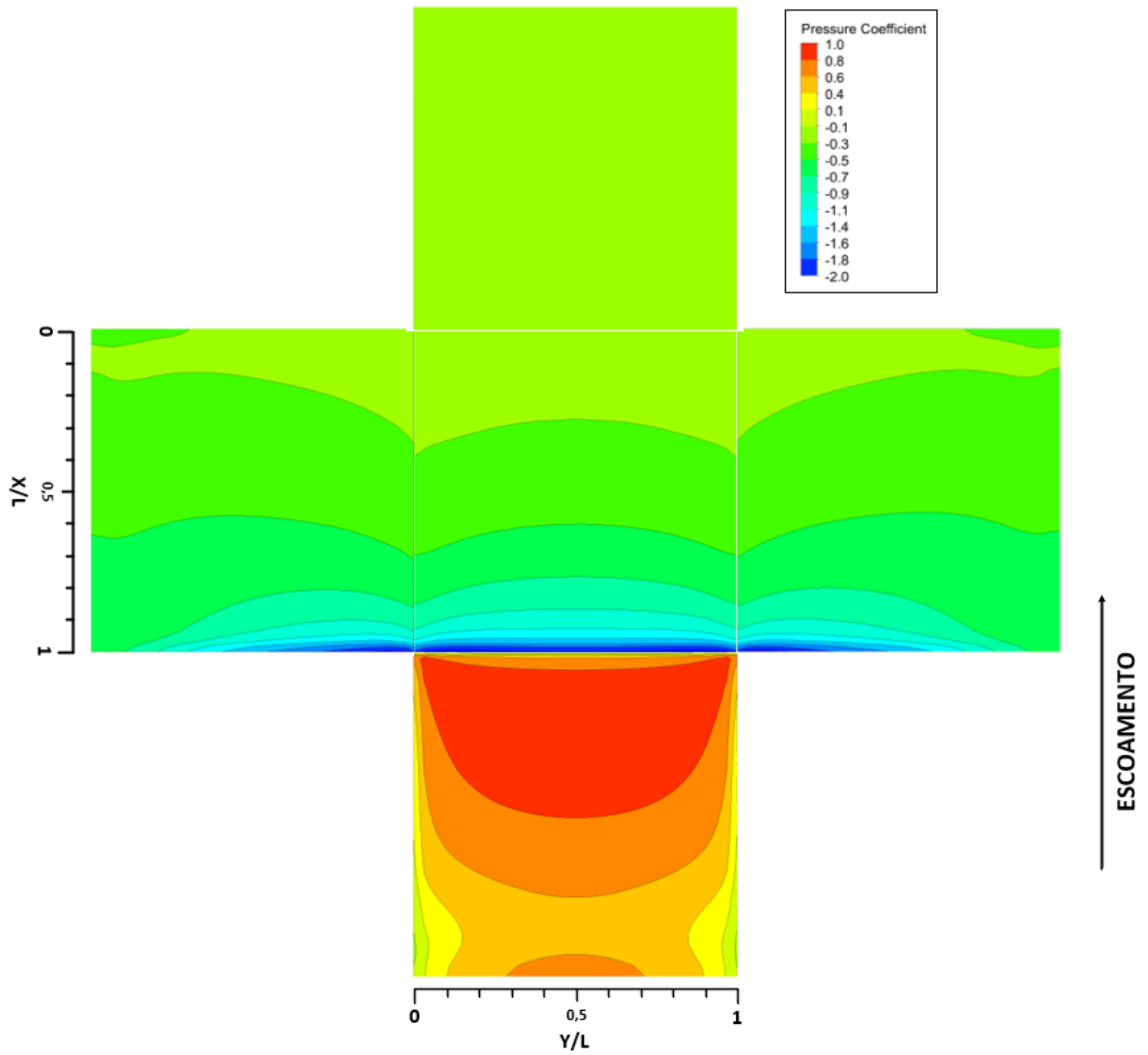
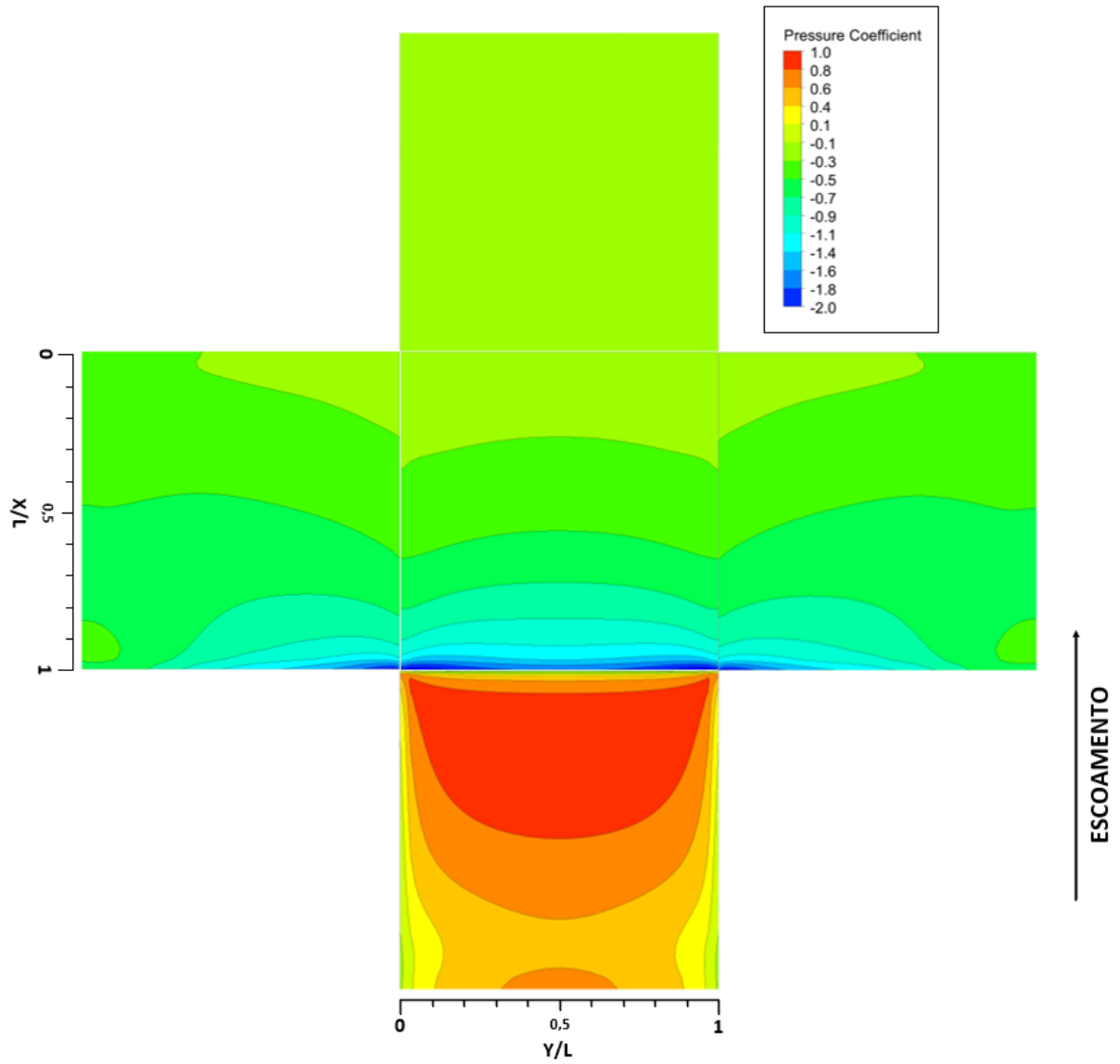


Figura 7.15: C_p - Terreno Tipo I - Modelo $k - \epsilon$ Standard

Figura 7.16: C_p - Terreno Tipo I - Modelo $k - \varepsilon$ Realizable

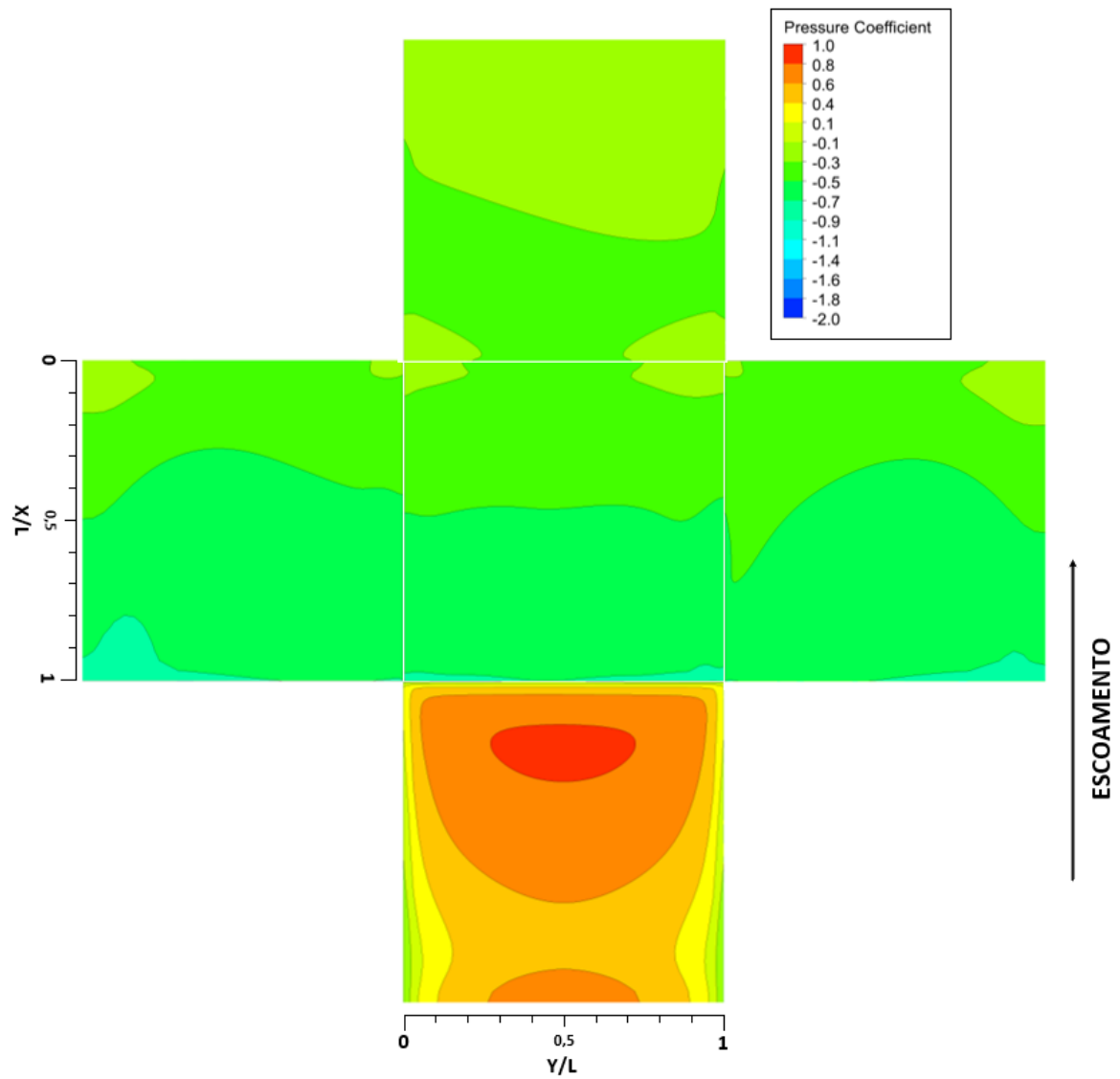
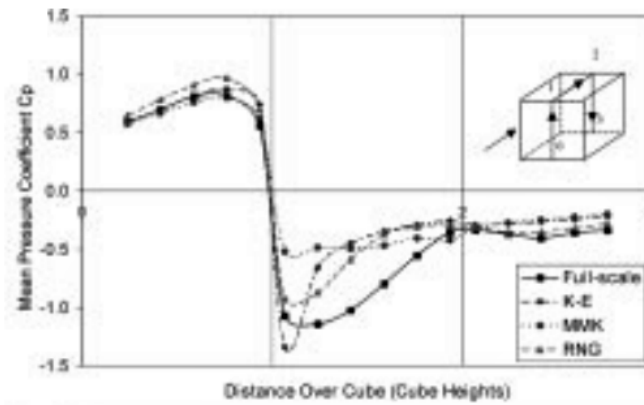
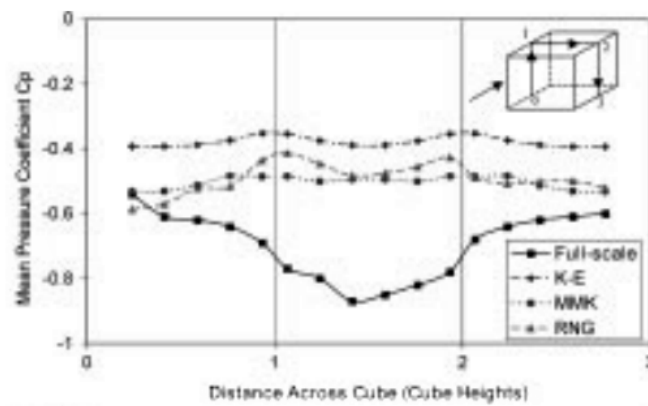


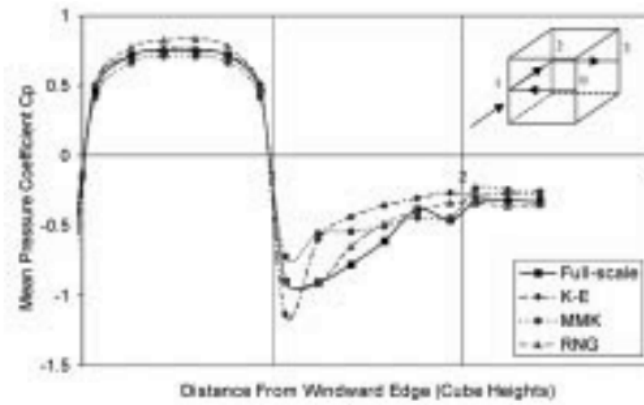
Figura 7.17: C_p - Terreno Tipo I - Modelo $k - \omega$ SST



(a) Secção central vertical no sentido do escoamento



(b) Secção central transversal



(c) Secção a meia altura

Figura 7.18: Coeficientes de pressão [46]

7.3 Terreno tipo II

7.3.1 Estabilidade da CLA

Para os testes de estabilidade do terreno tipo II, serão usados os meus parâmetros que foram utilizados para o terreno tipo I na secção anterior: estabilidade do perfil de velocidade de entrada, de forma adimensional, U/U_b , a energia cinética turbulenta, k , a sua taxa de dissipação, ε ou ω , e a intensidade de turbulência ao longo do domínio computacional na direção do escoamento, x^+ . Os dados serão retirados de cinco planos X , como se mostra na figura 7.1 da secção anterior, na entrada do domínio computacional, $X = 0$, à distância onde se encontraria o cubo caso não se tivesse em domínio vazio, $X = 8L$, na saída do domínio computacional, $X = 28L$, e em dois planos intermédios, por forma a ver-se o desenvolvimento dos parâmetros, $X = 4L$ e $X = 18L$.

Para o domínio computacional do terreno tipo II, os gráficos para análise de estabilidade encontram-se na tabela 7.4.

Na primeira linha da tabela 7.4 tem-se o desenvolvimento do **perfil de velocidade de forma adimensional**, U/U_b , ao longo do domínio computacional. O comportamento dos três modelos de turbulência não varia muito, com exceção entre $0 < Z/L < 0,5$ onde o modelo $k - \omega$ SST conseguiu manter um bocadinho melhor o perfil. À altura onde se encontraria o cubo, $Z/L = 1$ todos os modelos foram capazes de estabilizar e não perder muito rigor do perfil de velocidades.

Na comparação da **energia cinética turbulenta**, k , que se encontra na segunda linha da tabela 7.4, os três modelos de turbulência comportam-se de maneiras diferentes.

Tal como aconteceu para o terreno tipo I, no modelo $k - \varepsilon$ *standard* existe uma grande perda de k ao longo do domínio computacional onde para $X = 0L$, $k = 3,6[m^2/s^2]$ perde cerca de 75% até $X = 28L$, $k = 0,9[m^2/s^2]$. Até ao plano onde se encontraria o cubo existe uma perda de 44% com $k = 2[m^2/s^2]$ para $X = 8L$.

No modelo $k - \varepsilon$ *realizable* há uma perda muito acentuada não só ao longo do domínio como na primeira metade da altura do domínio. Na altura onde se encontraria o cubo, $Z/L = 1$ há uma perda de 22,2% entre os planos $X = 0l$ e $X = 8L$.

No modelo $k - \omega$ SST a tendência de k é uma perda considerável ao longo do domínio até $Z/L = 2$ e a partir daí k estabiliza e as perdas são menores ou quase nulas, mas à altura e plano onde se encontraria o cubo, a perda é nula, uma vez que para $Z/L = 1$, $k_{0L} = 3,6[m^2/s^2]$ e $k_{8L} = 3,6[m^2/s^2]$.

Na terceira linha da tabela encontra-se a **taxa de dissipação** de cada modelo de turbulência utilizado, onde para o modelo $k - \varepsilon$ *standard* a taxa de dissipação turbulenta, ε , não só se vai perdendo ao longo do domínio computacional como ao longo da altura, mas com perdas mínimas. À altura e plano onde se encontraria o cubo, $Z/L = 1$ e $X = 8L$, há

uma perda de 15% com $\varepsilon_{X=8L} = 0,17[m^2/s^3]$ e $\varepsilon_{X=0L} = 0,2[m^2/s^3]$.

Para o modelo $k - \varepsilon$ *realizable* a taxa de dissipação turbulenta, ε , vai-se perdendo em altura como a mesma tendência imposta mas vai ganhando ε ao longo do domínio computacional.

No modelo $k - \omega$ SST a taxa de dissipação específica, ω , vai crescendo consideravelmente ao longo do domínio computacional no sentido do escoamento mas vai-se perdendo em altura com a mesma tendência imposta no *inlet*.

Por fim, na última linha da tabela 7.1 tem-se a **intensidade de turbulência** calculada a partir da equação 2.18, $TI = \sqrt{2k/3}/U_b$. O seu comportamento para os três modelos de turbulência tem a mesma tendência que os gráficos de k como era esperado.

Tabela 7.4: Estabilidade - Terreno Tipo II

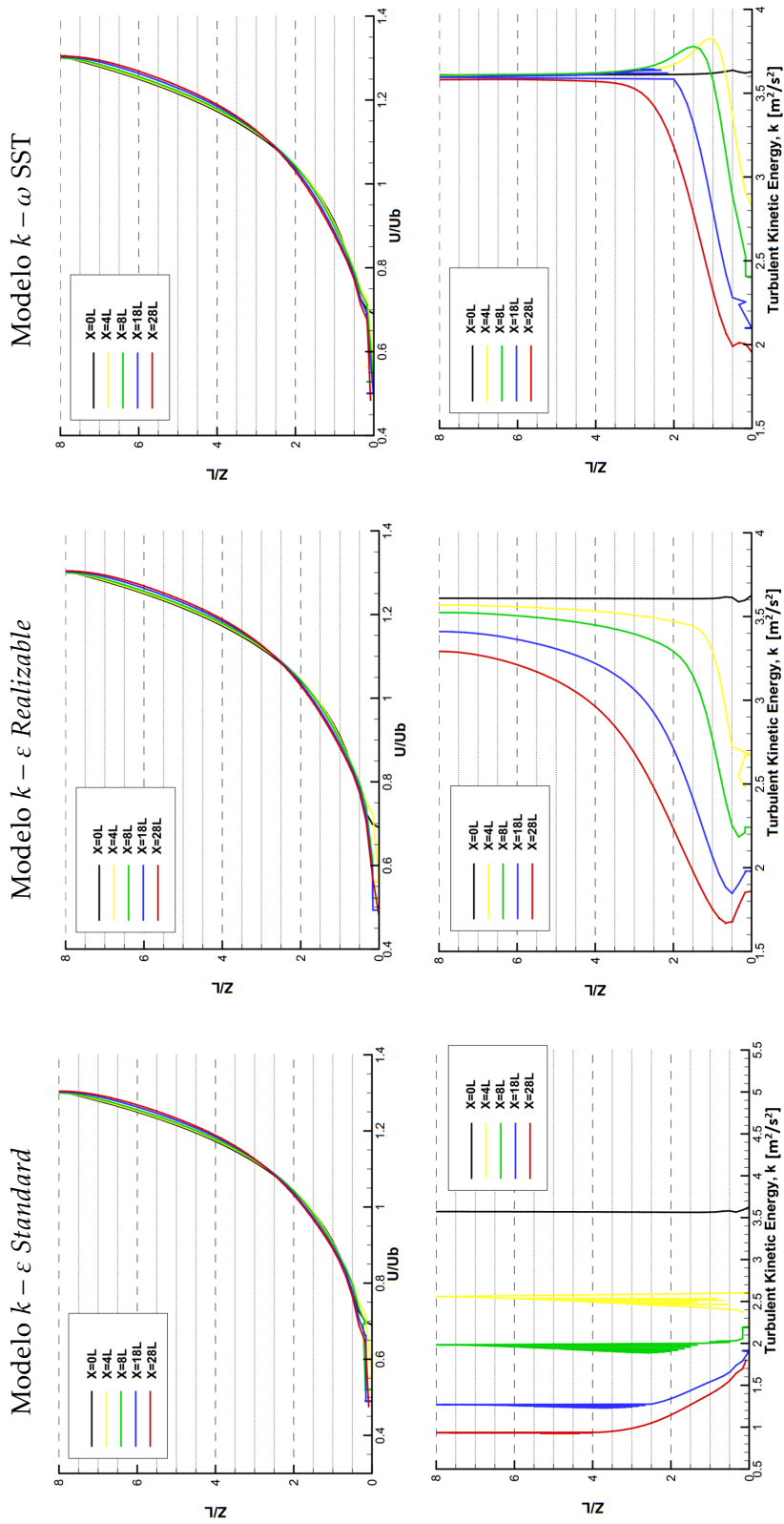
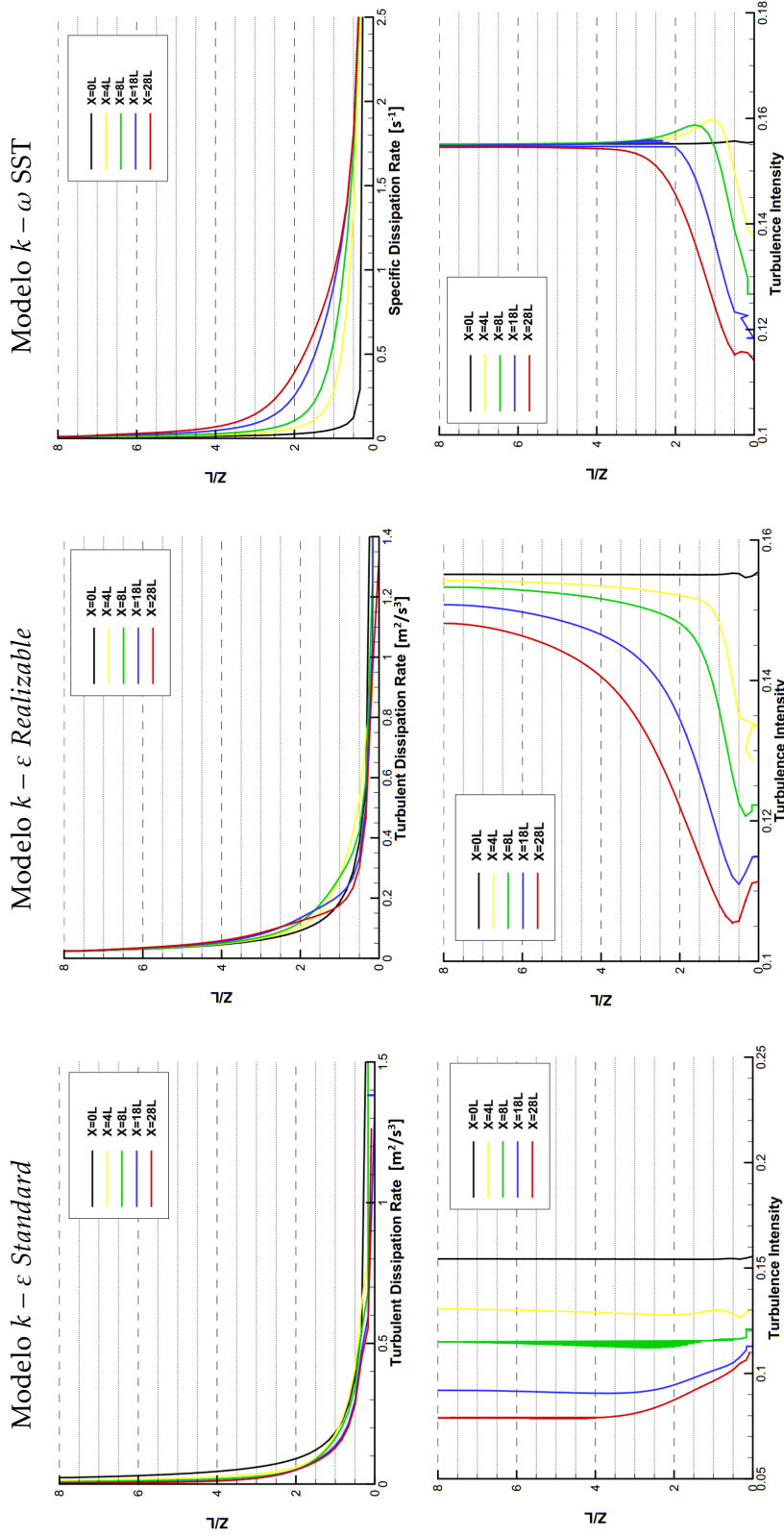


Tabela 7.4: (Continuação)



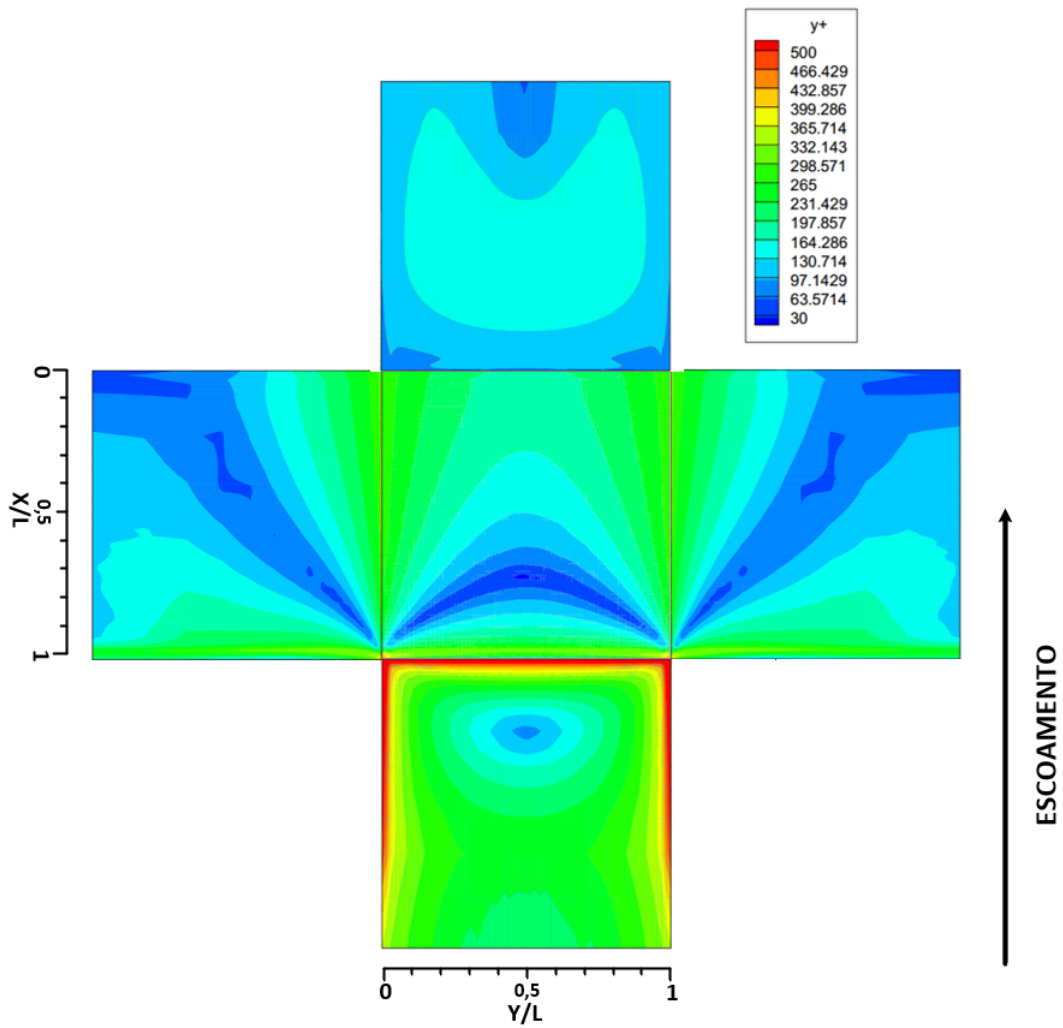
7.3.2 Verificação de y^+

Para a análise da distância à parede adimensional, y^+ , por forma a garantir que se encontra na *log-law region* (ver secção 5.3.3), isto é $30 < y^+ < 500$, nos três modelos de turbulência para o terreno tipo II as faces do cubo serão apresentadas como se encontra na figura 7.3, onde em cima se encontra o cubo na forma planificada e por baixo duas perspectivas isométricas. Desta forma é possível garantir que se consegue observar todas as faces do cubo.

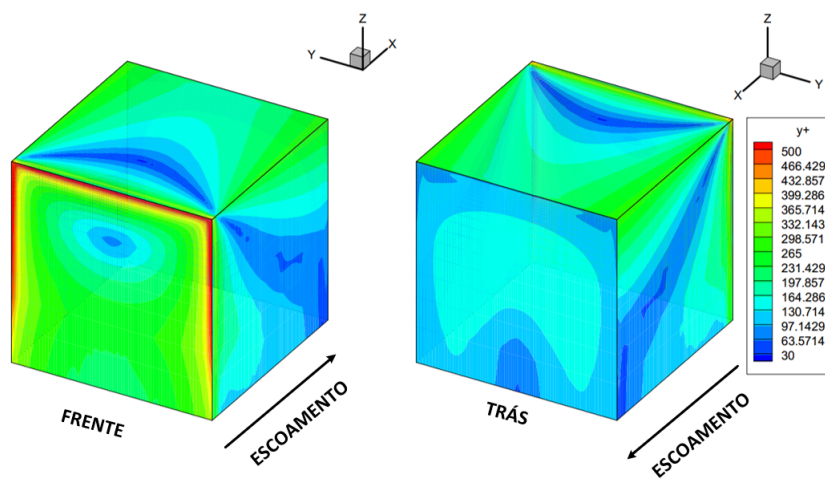
Tal como aconteceu para o terreno tipo I, nos três modelos de turbulência o padrão do y^+ na face frontal é muito semelhante, nas periferias desta mesma face todos os modelos têm y^+ no seu limite máximo ou chega mesmo a ultrapassar por pouco, mas a área é ainda mais pequena relativamente ao resto da face, o que se pode considerar desprezável, e há uma pequena mancha a meia largura na parte superior da face onde y^+ é baixo. Nas restantes faces dos três modelos os valores encontram-se dentro dos parâmetros chegando a ser menores que $y^+ < 300$.

No modelo $k - \omega$ SST, nas faces do tecto e trás do cubo, o padrão do y^+ já é mais simétrico do que nos resultados do terreno tipo I mas continua a não ser completamente simétrico e isto deve-se ao mesmo factor, o escoamento a jusante do cubo não ser completamente simétrico (ver secção 7.3.3).

Por forma a obter-se estes resultados, a altura da primeira célula das malhas nas faces do cubo foi de aproximadamente entre 1 e 2 [cm].

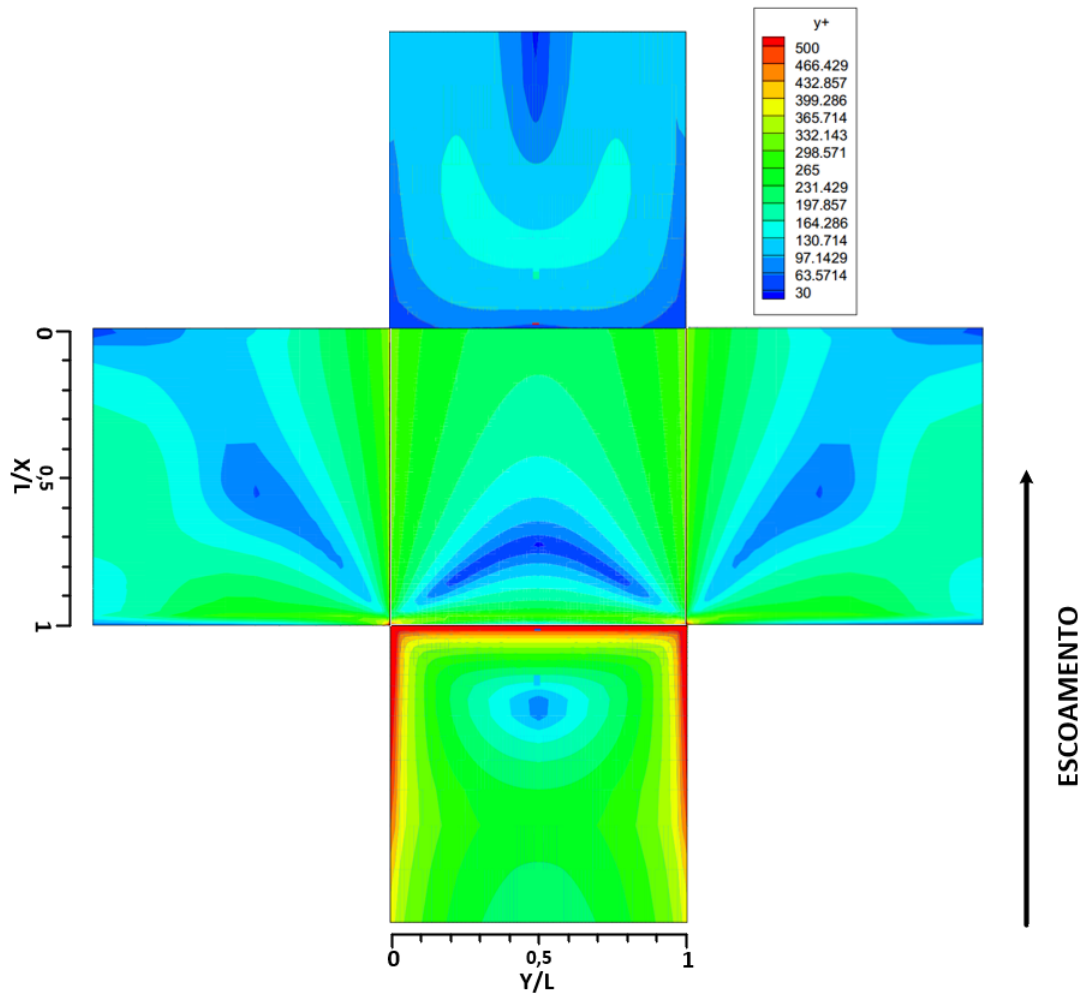


(a) Planificação

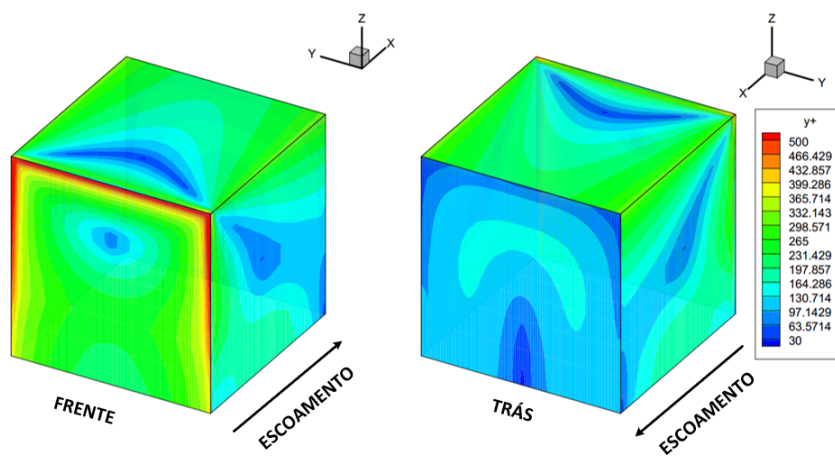


(b) Perspectivas isométricas

Figura 7.19: y^+ - Modelo $k - \epsilon$ Standard

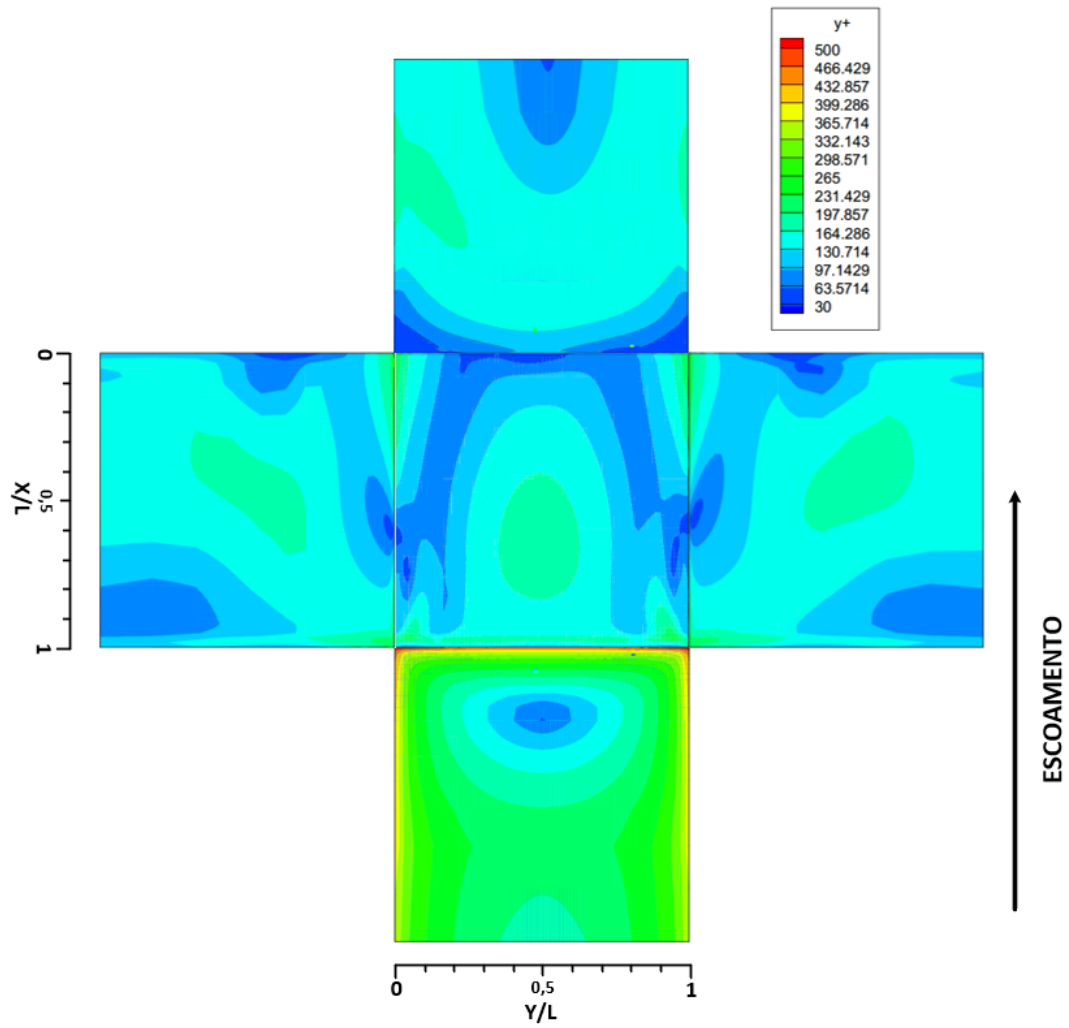


(a) Planificação

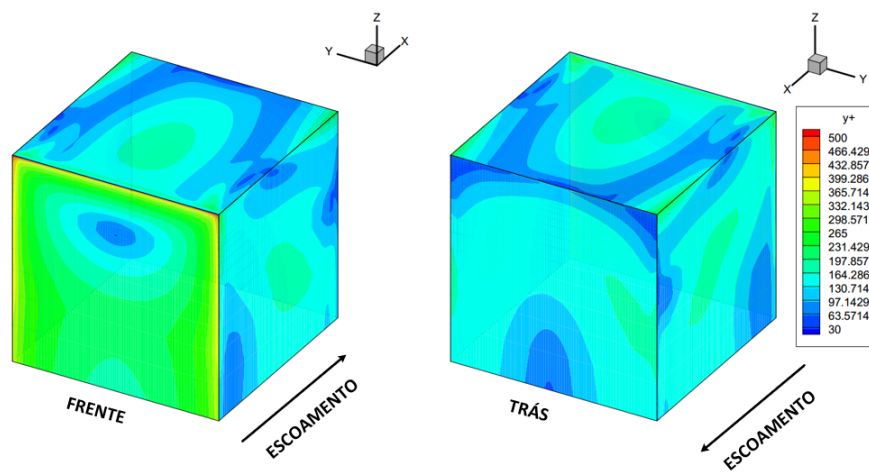


(b) Perspectivas isométricas

Figura 7.20: y^+ - Modelo $k - \epsilon$ Realizable



(a) Planificação



(b) Perspectivas isométricas

Figura 7.21: y^+ - Modelo $k - \omega$ SST

7.3.3 Campo de Velocidades

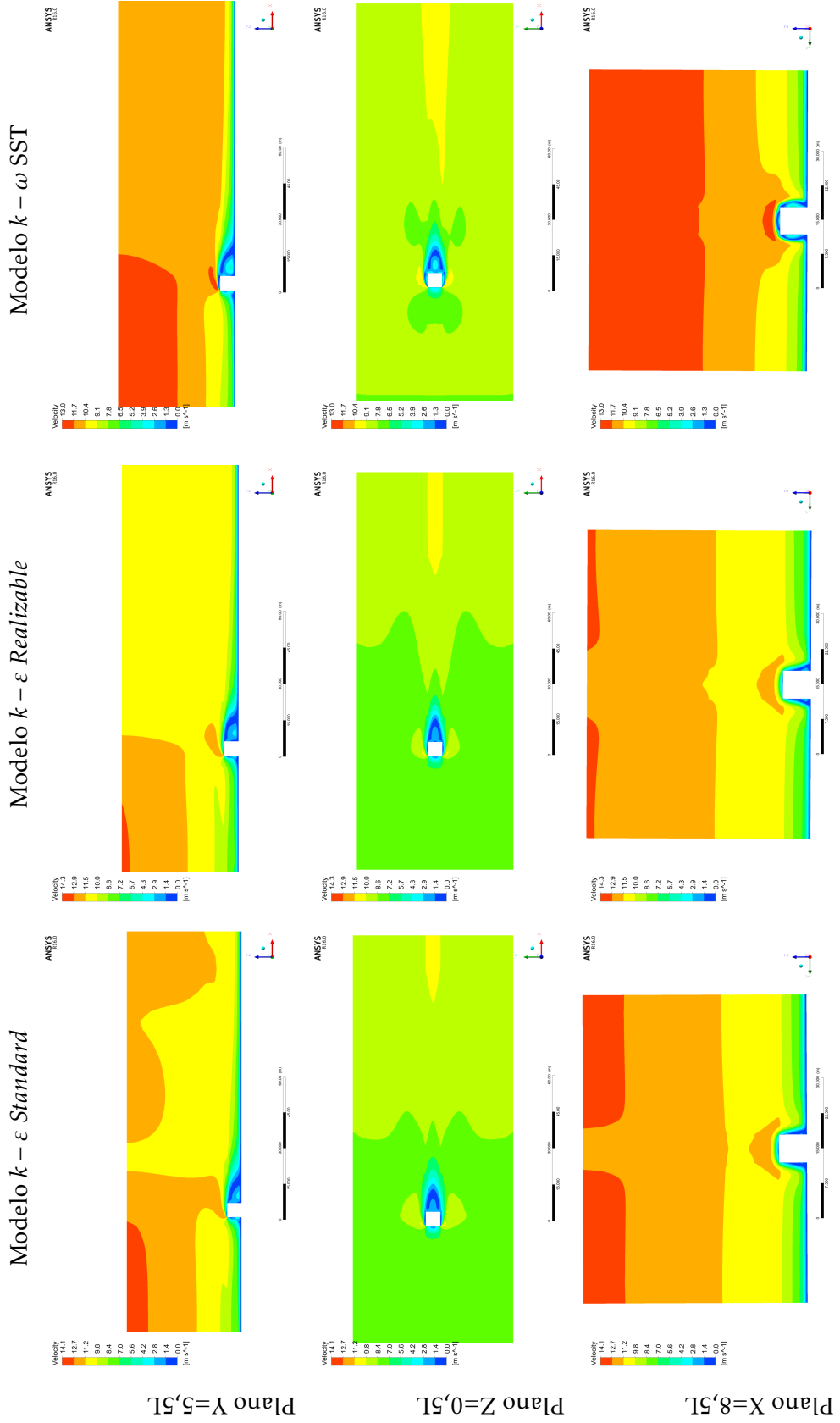
Na tabela 7.5 encontra-se o desenvolvimento do perfil de velocidade ao longo do domínio e na forma como incide no cubo, para cada modelo de turbulência utilizado. Em cada linha da tabela tem-se os planos que intermédios do cubo, isto é plano $X=8,5L=51$ [m], $Y=5,5L=33$ [m] e $Z=0,5L=3$ [m], respectivamente. Os planos encontram-se representados na figura 7.7 da secção anterior. Faz-se notar que o sentido do escoamento é no sentido positivo de x^+ .

No modelo $k - \varepsilon$ *standard* a partir dos planos $Y=5,5L$ e $X=8,5L$ retira-se que possivelmente a altura do domínio computacional pode não estar alta o suficiente para garantir que a parede não está a interferir com o escoamento em torno do cubo, mas a partir do plano $Z=0,5L$ observa-se que as paredes laterais do domínio estão longe o suficiente.

A partir do plano $Z=0,5L$, observa-se que o escoamento nos modelos $k - \varepsilon$ *standard* e *realizable* é simétrico segundo o plano Y o que sugere que uma análise do tipo *steady state* é suficiente para este tipo de caso.

No modelo $k - \omega$ SST, a partir dos planos apresentados, as fronteiras do domínio parecem estar longe o suficiente do cubo para não perturbar e influenciar o escoamento. Na zona a jusante do cubo, como se verifica no plano $Z=0,5L$, o escoamento não é completamente simétrico mas, como já se referiu anteriormente, o número de Reynolds é tão elevado que esta assimetria do escoamento não garante que mesmo se se realizasse a simulação do tipo transiente se iria ver a libertação de vórtices ou mesmo a esteira de Von Karman.

Tabela 7.5: Campo de Velocidades - Terreno Tipo II



7.3.4 Comprimentos de Recirculação

Nas figuras seguintes encontram-se representadas no plano $Y=5,5L$, que corresponde ao plano que corta ao meio todo o domínio no sentido do escoamento, apenas se encontra representado a velocidade x negativa, $U_x(z) < 0$, desta forma é possível retirar de forma mais precisa o tamanho das bolhas de recirculação como os pontos de estagnação.

Na figura 7.22 é possível observar-se o resultado do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ *standard*. A montante do cubo a bolha de recirculação começa a $X/L=7,55$, ou seja tem um comprimento de $0,55L$, e tem uma altura de $0,25L$. A jusante do cubo a zona de recirculação é consideravelmente maior com um comprimento que vai de $X/L=9$ até $X/L=10,8$ e tem uma altura de $0,85L$.

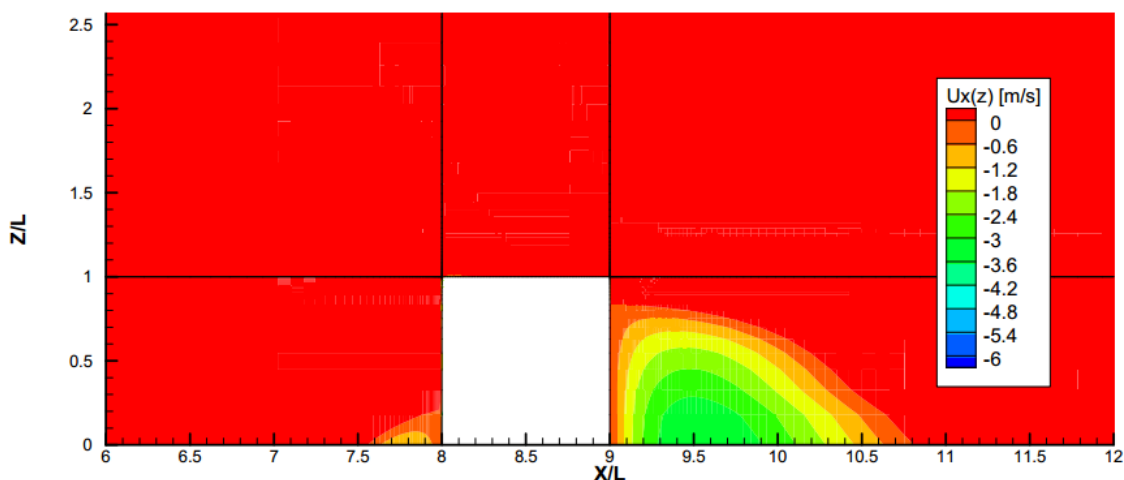


Figura 7.22: Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo II - Modelo $k - \varepsilon$ *Standard*

Como a partir da figura 7.22 não se consegue observar se existe uma bolha de recirculação no tecto do cubo, encontra-se na figura 7.23 essa secção de forma mais pormenorizada. Como se pode observar, a altura da bolha é mínima com $0,01L$ e um comprimento de $0,25L$.

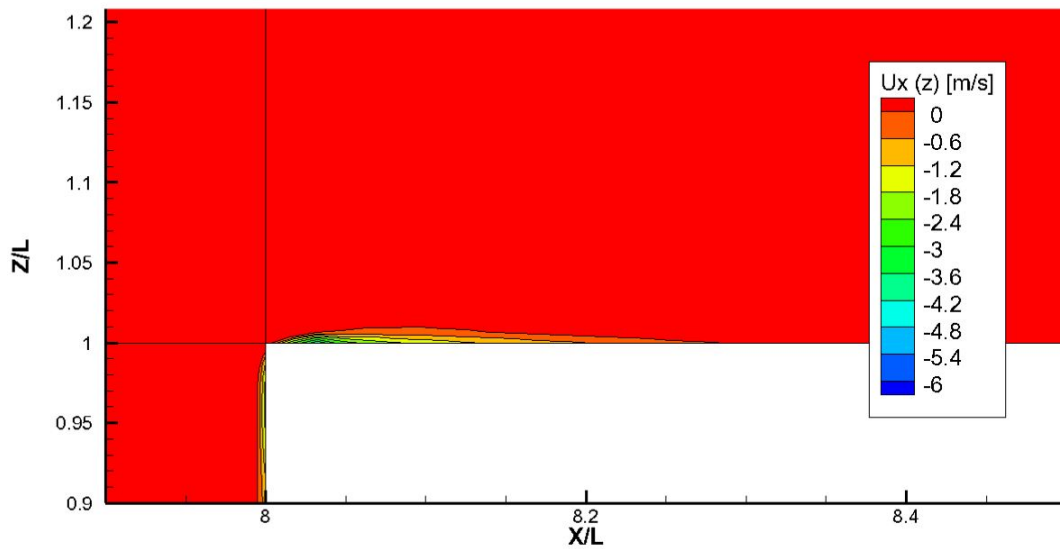


Figura 7.23: Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo II - Modelo $k - \epsilon$ Standard

Com o modelo $k - \epsilon$ *realizable* a bolha de recirculação a montante do cubo é muito semelhante ao do modelo de turbulência anterior, como se observa na figura 7.24. Aqui a bolha tem cerca de $0,4L$ de comprimento e $0,2L$ de altura. A jusante a zona de recirculação tem cerca de $1,7L$ de comprimento e $0,9L$ de altura.

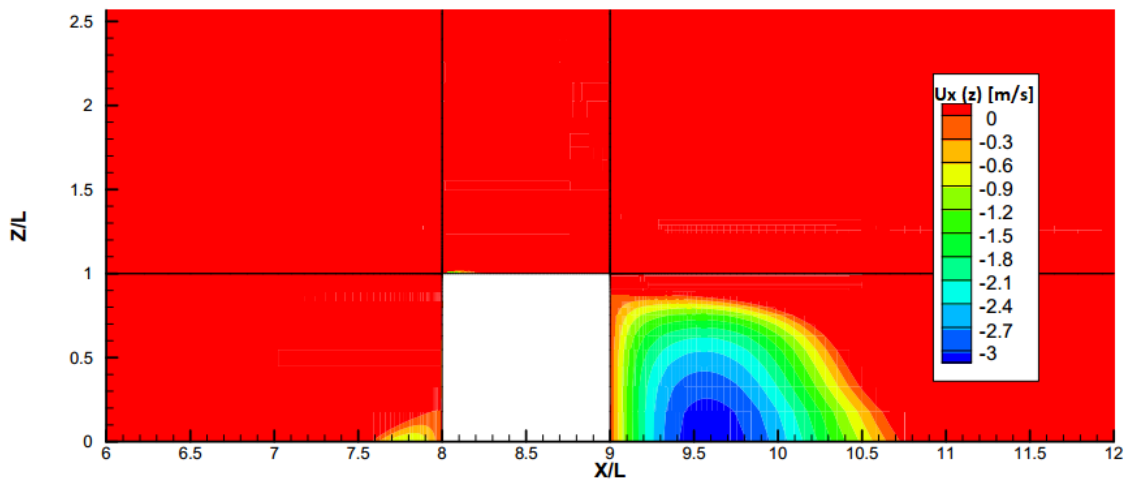


Figura 7.24: Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo II - Modelo $k - \epsilon$ Realizable

Tal como aconteceu com o modelo $k - \epsilon$ *standard*, na figura 7.24 não é possível visualizar a bolha de recirculação no tecto do cubo. Na figura 7.25 encontra-se essa zona ampliada e é possível observar-se que a bolha tem apenas uma altura de $0,01L$ e um comprimento de $0,25L$.

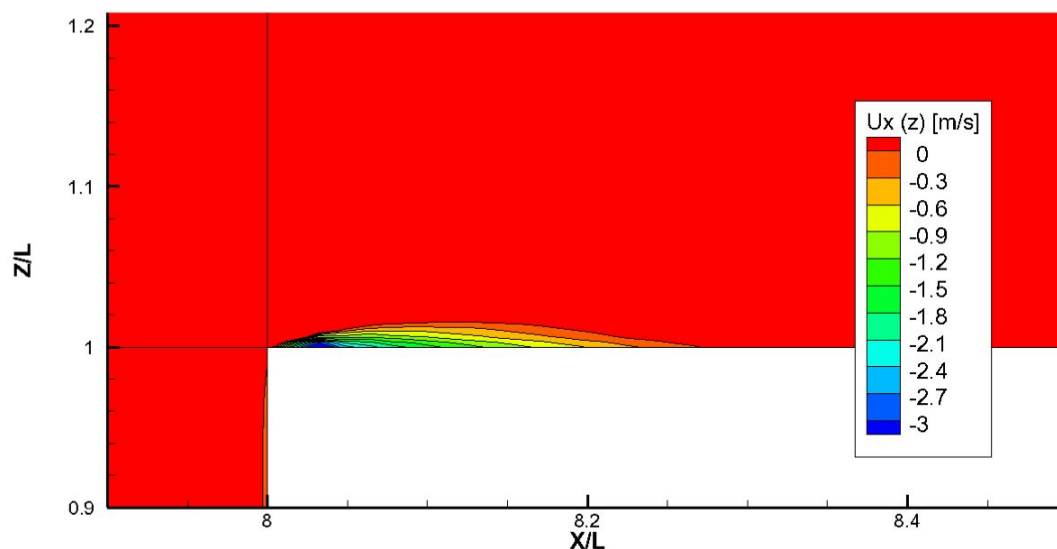


Figura 7.25: Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo II - Modelo $k - \epsilon$ Realizable

Por fim, no modelo de turbulência $k - \omega$ SST a zona de recirculação a montante do cubo tem um comprimento de $0,55L$ e uma altura de $0,2L$, e a jusante a bolha tem um comprimento de $1,9L$ e uma altura de $0,9L$. No tecto do cubo para se observar se a zona de recirculação volta a descolar ampliou-se essa zona como se encontra na figura 7.27.

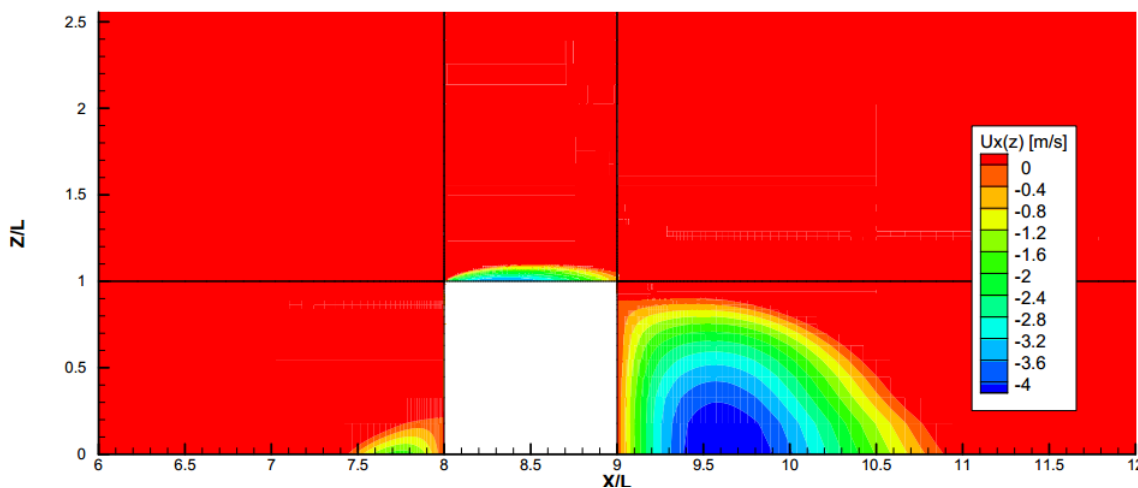


Figura 7.26: Velocidade x no sentido negativo do escoamento - Terreno Tipo II - Modelo $k - \omega$ SST

Na figura 7.27 observa-se que a bolha de recirculação já não volta a descolar no tecto mas tem uma altura de $0,1L$, o que é muito diferente dos outros dois modelos utilizados anteriormente.

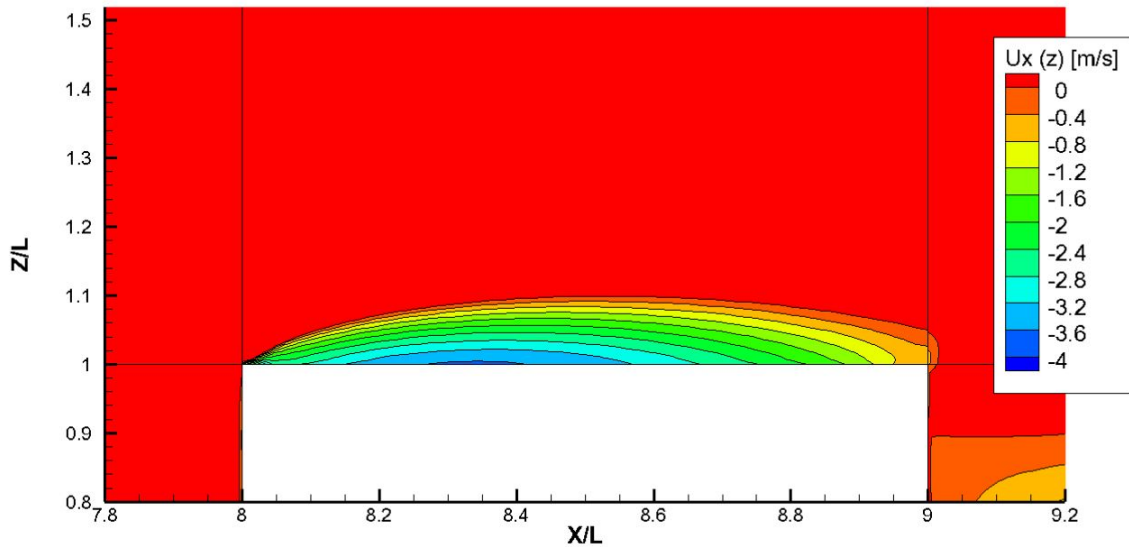


Figura 7.27: Velocidade x no sentido negativo do escoamento no tecto do cubo - Terreno Tipo II - Modelo $k - \omega$ SST

7.3.5 Coeficientes Pressão

Os coeficientes de pressão para cada face do cubo são calculados a partir da equação 3.3, $C_p = (p_s - p_0)/(0,5\rho\bar{u}^2)$, e serão representados para cada modelo de turbulência segundo a representação da figura 7.14 que se encontra na secção anterior. Desta forma é possível verificar os coeficientes em todas as faces do cubo.

Verificar-se-á se os resultados obtidos estão dentro dos limites permitidos dos coeficientes pelo EC1, referidos na secção 4.4.

Relativamente aos resultados obtidos neste trabalho, com o modelo $k - \varepsilon$ *standard e realizable*, que se encontram nas figuras 7.28 e 7.29 respectivamente, a distribuição dos coeficientes de pressão é praticamente igual.

Na face frontal, na secção central ($Y/L = 0,5$), os valores começam com $c_p = 0,4$ e vão crescendo em altura até $c_p = 1$. Na mesma face mas a meia altura, a distribuição dos coeficientes é praticamente constante com uma pequena variação de $0,6 < c_p < 0,8$. Estes resultados encontram-se dentro dos parâmetros do EC1 (ver tabela 4.2), que diz que os valores não podem ultrapassar de $c_p > 1$.

Na face do tecto do cubo, na secção central ($Y/L = 0,5$) no sentido do escoamento, os valores vão desde $c_{p,min} = -2$ mesmo na aresta mas aos 5%, a partir da mesma aresta, o coeficiente já se encontra entre $-1,4 < c_p < -0,7$ e a partir vai sempre crescendo até $c_{p,max} = -0,1$. Os resultados retirados dos dois modelos encontram-se dentro dos parâmetros do EC1 (ver tabela 4.3) onde nos primeiros 10% do tecto os valores não podem ultrapassar $c_p < -2,5$ e que no limite do tecto estes podem chegar a $c_p = +0,2$.

As faces laterais do cubo desdes dois modelos, $k - \varepsilon$ *standard e realizable*, são simétricas entre elas. Apenas existe uma pequena área onde os valores se encontram entre $-2 < c_p <$

$-0,7$ de resto tem apenas uma variação entre $-0,7 < c_p < -0,3$. Estes resultados ficam muito abaixo dos limites máximos do EC1 (ver tabela 4.2).

A face de trás do cubo os coeficientes de pressão são praticamente constantes com $-0,3 < c_p < -0,1$.

Os resultados obtidos a partir do modelo $k - \omega$ SST, que se encontram na figura 7.30, são ligeiramente diferentes, aqui na face frontal o coeficiente de pressão máximo é menor, com $c_{p,max} = 0,8$, mas a tendência geral é a mesma.

Nas faces laterais e do tecto os coeficientes são praticamente constantes com $-0,7 < c_p < -0,1$ em toda a face. Por fim na face de trás os valores pouco variam entre $-0,3 < c_p < -0,1$.

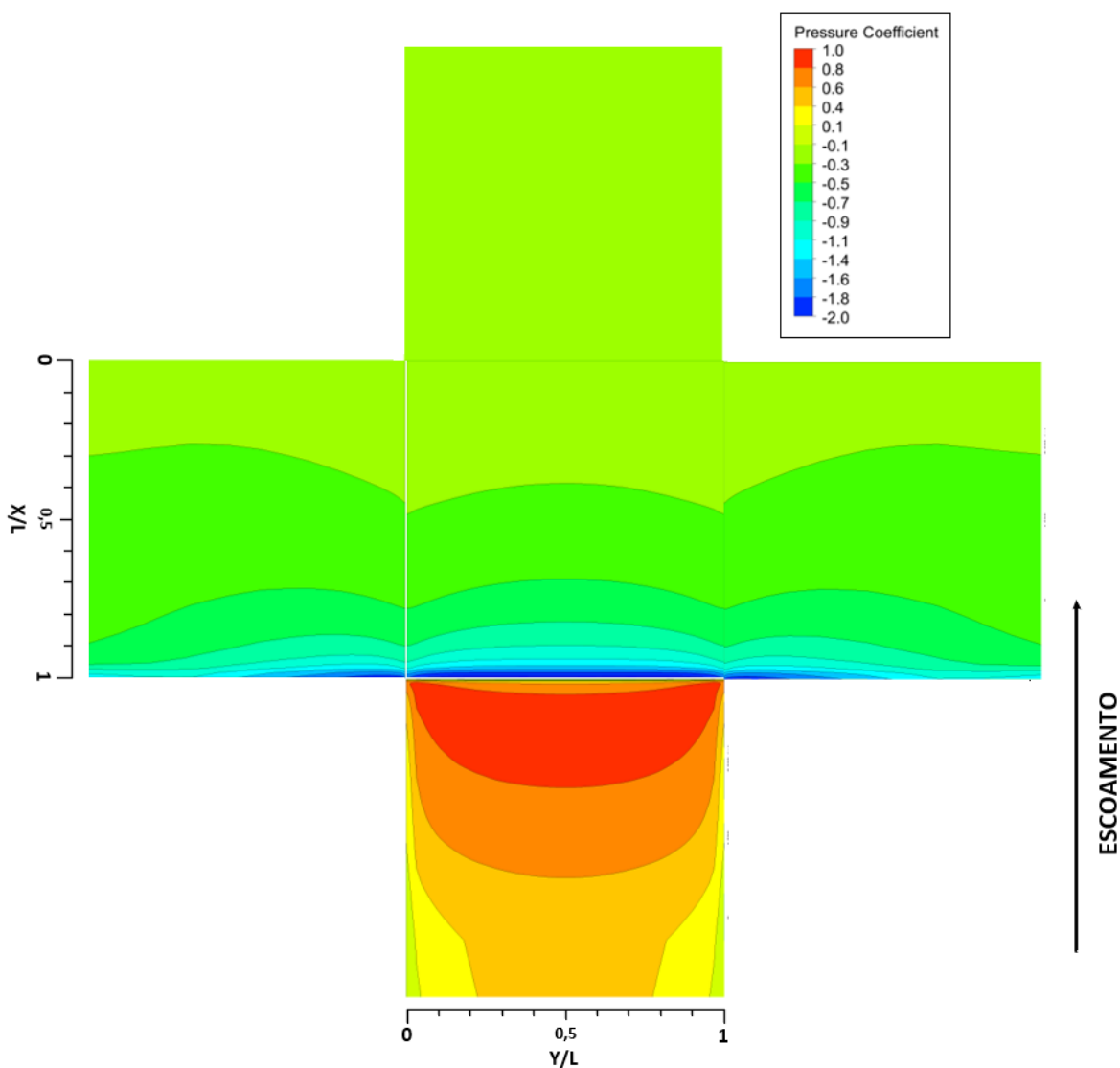


Figura 7.28: C_p - Terreno Tipo II - Modelo $k - \epsilon$ Standard

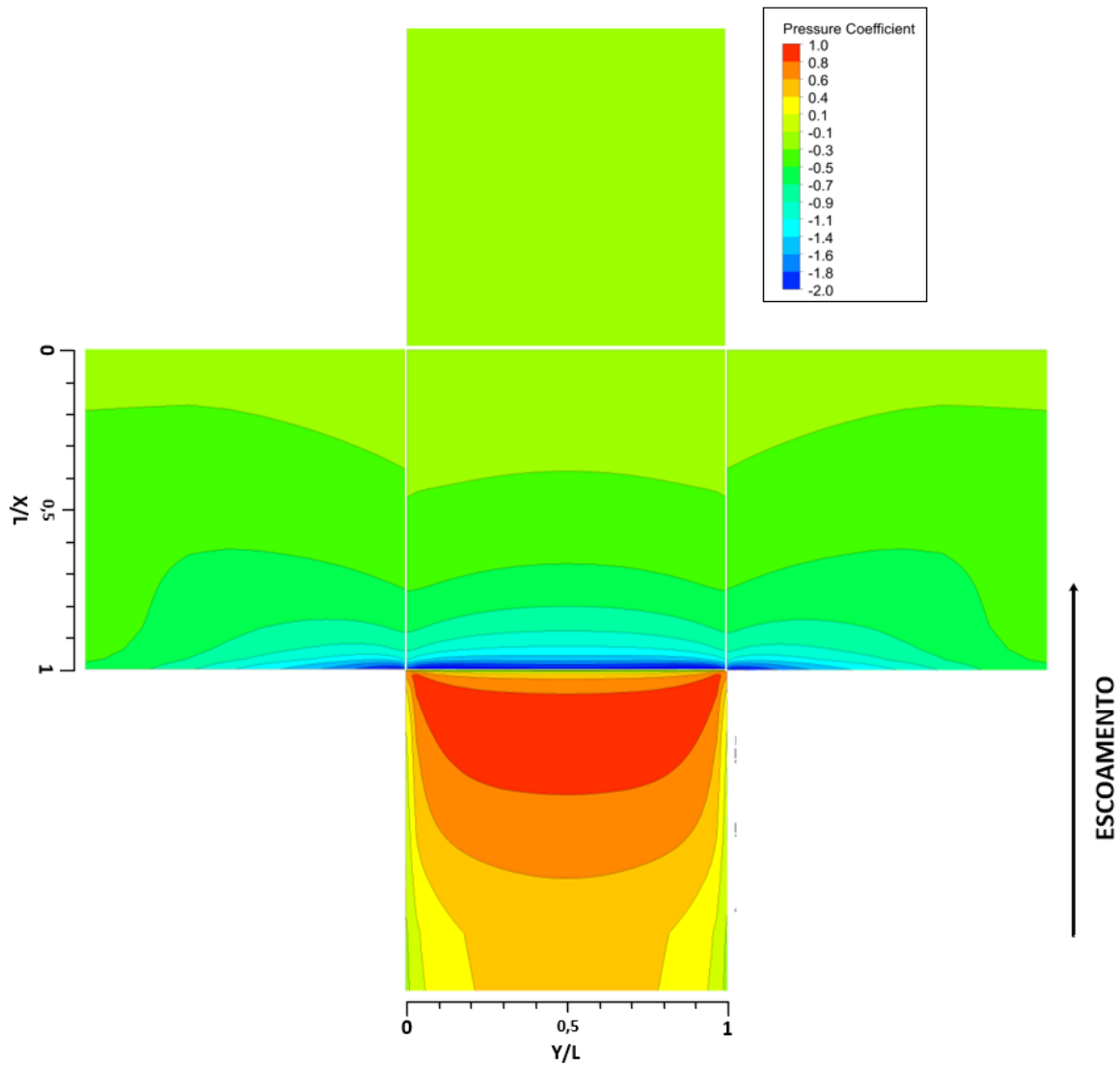


Figura 7.29: C_p - Terreno Tipo II - Modelo $k - \epsilon$ Realizable

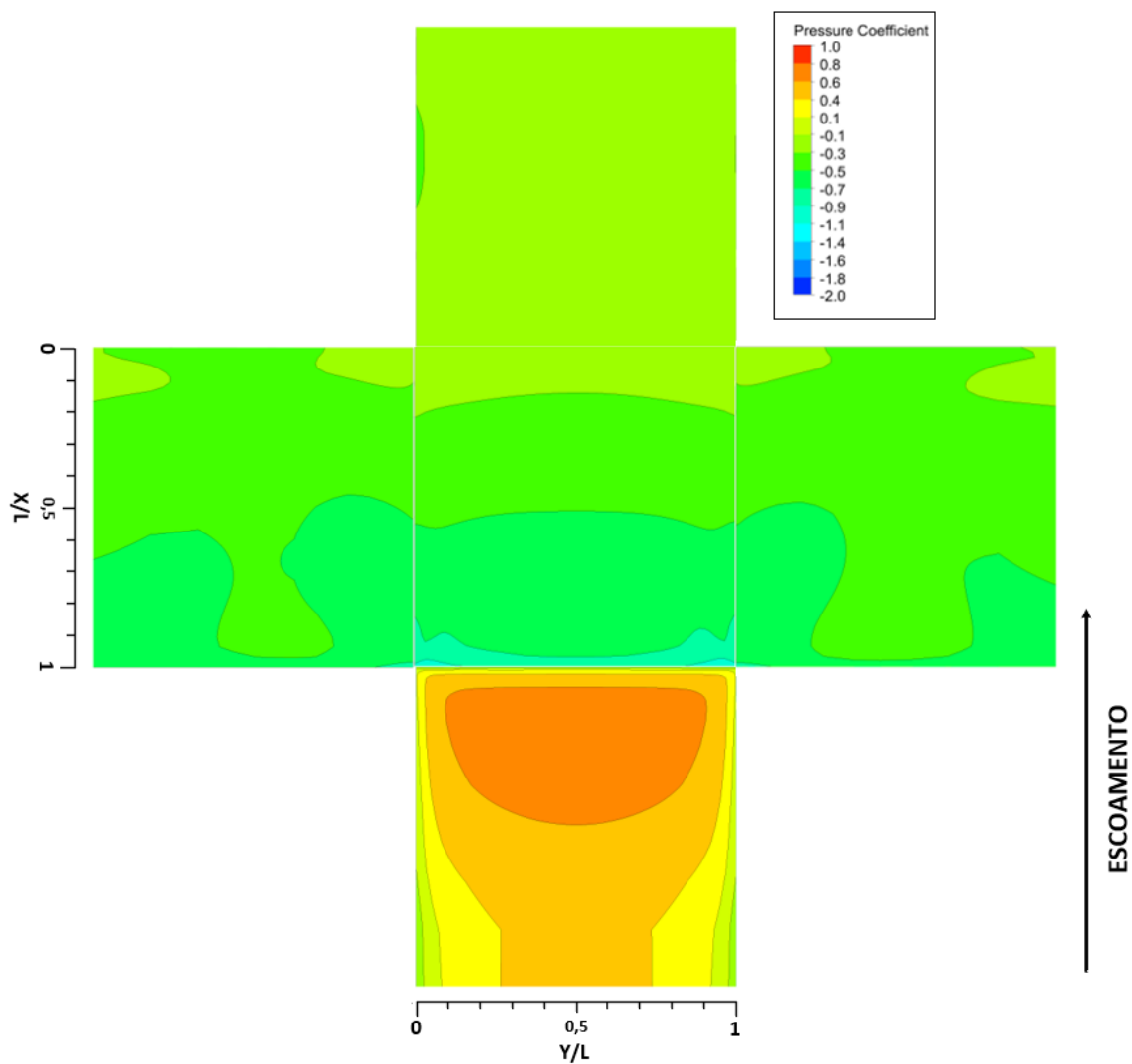


Figura 7.30: C_p - Terreno Tipo II - Modelo $k - \omega$ SST

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para esta dissertação o principal objetivo foi criar uma base para o estudo da interação aerodinâmica pela ação do vento em edifícios a partir de um *software* comercial ANSYS Fluent.

Por forma a atingir este fim, o trabalho foi dividido em três partes. A primeira foi a caracterização da temática e definição de alguns princípios básicos, nos capítulos 2 e 3, onde se começa por explicar o que é uma camada limite atmosférica e quais os princípios para a criar, de seguida dá-se maior ênfase no escoamento em torno de um edifício e introduz-se o conceito de coeficiente de pressão.

Após esta introdução teórica da temática, encontra-se no capítulo 4 uma pequena apresentação da formulação regulamentar Eurocódigo 1, que fornece orientações à determinação das ações do vento. Neste capítulo encontram-se os perfis de velocidade, para cada terreno existente, que serão utilizados no caso de estudo e ainda os limites dos coeficientes de pressão do edifício.

Antes de se realizar o caso de estudo foi necessário uma revisão bibliográfica dedicada ao modelo computacional, que se encontra no capítulo 5. Aqui foram revistos todos os parâmetros necessários para a realização de uma correta simulação numérica, desde a geometria do domínio computacional ao *setup* da simulação. Por fim foram aplicados todos os conhecimentos para a realização do caso de estudo, no capítulo 6, e análise dos resultados, no capítulo 7.

Para o estudo da interação aerodinâmica pela ação do vento em edifícios foram analisados dois tipos de terreno, I e II, com três modelos de turbulência, $k - \varepsilon$ *standard*, $k - \varepsilon$ *realizable* e $k - \omega$ SST em torno de um cubo de 6[m], por forma a representar um edifício.

Desenvolveu-se um domínio computacional grande o suficiente para se testar o escoamento em torno do cubo e garantir assim que as fronteiras do domínio não interferiam

com o escoamento. Ao utilizar-se um *software* comercial, como o ANSYS Fluent, é necessário adaptar o *software* ao caso de estudo e para isso foram utilizadas Função definida pelo utilizador, do inglês *User-Defined Function* (UDF) e assim definiram-se as condições de entrada do domínio computacional, o perfil de velocidade do escoamento e os parâmetros de turbulência de cada modelo escolhido.

Após a análise dos resultados concluiu-se que é possível adaptar um *software* comercial para simular o escoamento do vento em torno de um edifício mas com algumas limitações.

A primeira limitação provem da capacidade de estabilidade das condições impostas na entrada do domínio computacional, isto é, a forma como o ANSYS Fluent lida com a Lei de Parede e as funções de rugosidade, limitando assim parâmetros fundamentais para uma simulação numérica correta, tal como o tamanho da malha junto a uma parede e isto tem consequências no cálculo do y^+ .

Uma outra limitação encontrada foi a forma como escoamento a jusante do cubo foi modelada. Como se trata de uma simulação com um número de Reynolds elevado, o programa não consegue reproduzir corretamente a flutabilidade periódica da esteira do edifício. A vantagem é que se pode fazer uma simulação do tipo estacionária a desvantagem é que isto pode comprometer a precisão dos resultados.

Os resultados retirados do terreno tipo I com o cubo foram comparados com o trabalho realizado no Instituto de Investigação Silsoe e, apesar do erros calculados serem elevados, os resultados apresentados são satisfatórios, uma vez que todos eles estão na mesma ordem de grandeza de valores e é necessário ter em atenção que primeiro esta simulação foi realizada em *software* comercial, isto é, há parâmetros que não se conseguem ajustar, segundo o teste no cubo de Silsoe foi realizado ao ar livre, logo não há controlo total no perfil de velocidade incidente do vento e terceiro, este trabalho é apenas uma base para se começar a continuar desenvolver a problemática aqui apresentada.

Como trabalho futuro seria interessante reproduzir o caso de estudo noutra *software*, ou caso se queira continuar com o ANSYS Fluent, tentar adaptar ou utilizar outros modelos de turbulência e verificar qual se adapta melhor a cada parâmetro.

Realizar o caso de estudo do terreno tipo II em túnel de vento por forma a comparar e verificar se os resultados retirados desta dissertação se encontram no melhor caminho.

Neste trabalho foi feito o estudo do escoamento em torno de um só edifício cubico e como trabalho futuro poder-se-ia utilizar outras geometrias, quer sejam elas tipo paralelepipedicas ou mesmo do tipo pirâmide ou ainda mesmo curvilínea, ou apenas conjugar e estudar a disposição de vários objetos e ainda o ângulos que estes fazem com o escoamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Ansys Fluent Reference Guide*. Ansys, Inc. Release 16.0. 2015.
- [2] W. D. Baines. “Effects of velocity distribution on wind loads and flow patterns on buildings”. Em: *Proc. of Wind effects on Buildings and Structure* 1 (1963), pp. 197–225.
- [3] T. Berk, T. Medjnoun e B. Ganapathisubramani. “Entrainment effects in periodic forcing of the flow over a backward-facing step”. Em: *Physical Review Fluids* 2.7 (2017), p. 074605.
- [4] B. Blocken, J. Carmeliet e T. Stathopoulos. “CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95.9-11 (2007), pp. 941–962.
- [5] B. Blocken, T. Stathopoulos e J. Carmeliet. “CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems”. Em: *Atmospheric environment* 41.2 (2007), pp. 238–252.
- [6] J. G. S. F. Branco. “Estudo sobre a aplicabilidade de modelos de distribuição da velocidade do vento em terreno montanhoso”. Em: (1991).
- [7] I. Castro e J. Graham. “Numerical wind engineering: the way ahead?” Em: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings* 134.3 (1999), pp. 275–277.
- [8] J. E. Cermak. “Applications of fluid mechanics to wind engineering—a Freeman Scholar lecture”. Em: *Journal of Fluids Engineering* 97.1 (1975), pp. 9–38.
- [9] M. Cindori, F. Juretić, H. Kozmar e I. Džijan. “Steady RANS model of the homogeneous atmospheric boundary layer”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 173 (2018), pp. 289–301.
- [10] N. J. Cook. “Designers guide to wind loading of building structures. Part 1”. Em: (1986).
- [11] L. Davidson e S.-H. Peng. “Hybrid LES-RANS modelling: a one-equation SGS model combined with $k-\omega$ model for predicting recirculating flows”. Em: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 43.9 (2003), pp. 1003–1018.
- [12] C. Dyrbye e S. O. Hansen. *Wind loads on structures*. 1997.
- [13] N. EN. “1-2. Eurocódigo 1—Ações em estruturas”. Em: *Parte 1.2* (1991), pp. 1–1.

- [14] J. H. Ferziger e M. Perić. *Computational methods for fluid dynamics*. Vol. 3. Springer, 2002.
- [15] J Franke, C Hirsch, A. Jensen, H. Krüs, M Schatzmann, P. Westbury, S. Miles, J. Wisse e N. Wright. “Recommendations on the use of CFD in wind engineering”. Em: *Cost action C*. Vol. 14. 2004, p. C1.
- [16] J. Franke, A. Hellsten, K. H. Schlunzen e B. Carissimo. “The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary”. Em: *International Journal of Environment and Pollution* 44.1-4 (2011), pp. 419–427.
- [17] Y Gao e W. Chow. “Numerical studies on air flow around a cube”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93.2 (2005), pp. 115–135.
- [18] J. Garratt. “The Atmospheric Boundary Layer Cambridge University Press Cambridge 316”. Em: (1992).
- [19] D. Hargreaves e N. G. Wright. “On the use of the $k-\varepsilon$ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer”. Em: *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 95.5 (2007), pp. 355–369.
- [20] U. Högström. “Von Karman’s constant in atmospheric boundary layer flow: Reevaluated”. Em: *Journal of the atmospheric sciences* 42.3 (1985), pp. 263–270.
- [21] R. Hoxey, P. Richards e J. Short. “A 6 m cube in an atmospheric boundary layer flow-Part 1. Full-scale and wind-tunnel results”. Em: *Wind and structures* 5.2_3_4 (2002), pp. 165–176.
- [22] P. Hu, Y. Li, Y. Han, S. C. Cai e X. Xu. “Numerical simulations of the mean wind speeds and turbulence intensities over simplified gorges using the SST $k-\omega$ turbulence model”. Em: *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 10.1 (2016), pp. 359–372.
- [23] M Kato e B. Launder. “The Modeling of Turbulent Flow around Stagnation and Vibrating Square Cylinders”. Em: *Proceedings of the 9th Symposium on Turbulent Shear Flow, Kyoto, Japan*. Vol. 1618. 1993, p. 1014.
- [24] S Kawamoto. “An improved $k-\varepsilon-\varphi$ turbulence model for wind load estimation”. Em: *9th CFD Symp*. 1995, pp. 197–198.
- [25] B. Launder e M Kato. “Modeling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder: ASME Fluids Engineering Conference 1993”. Em: *USA, Washington, DC* (1993).
- [26] B. E. Launder e D. B. Spalding. “The numerical computation of turbulent flows”. Em: *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*. Elsevier, 1983, pp. 96–116.
- [27] M. Lopes. “Aplicação numérica e experimental de métodos de simulação da camada limite atmosférica para o estudo da acção do vento sobre edifícios”. Tese de doutoramento. Master thesis - Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal, 2008.

- [28] F. R. Menter. "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". Em: *AIAA journal* 32.8 (1994), pp. 1598–1605.
- [29] A Mochida, Y Tominaga, S Murakami, R Yoshie, T Ishihara e R Ooka. "Comparison of various ke models and DSM applied to flow around a highrise building-report on AU cooperative project for CFD prediction of wind environment". Em: *Wind and Structures* 5.2-4 (2002), pp. 227–244.
- [30] S Murakami, A Mochida, Y Hayashi e S Sakamoto. "Numerical study on velocity-pressure field and wind forces for bluff bodies by k- ϵ , ASM and LES". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 44.1-3 (1992), pp. 2841–2852.
- [31] S. Murakami. "Comparison of various turbulence models applied to a bluff body". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 46 (1993), pp. 21–36.
- [32] S. Murakami. "Current status and future trends in computational wind engineering". Em: *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 67 (1997), pp. 3–34.
- [33] S. Murakami. "Overview of turbulence models applied in CWE–1997". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74 (1998), pp. 1–24.
- [34] S. Murakami e A. Mochida. "3D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k- ϵ model". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 31.2-3 (1988), pp. 283–303.
- [35] S. Murakami, A. Mochida e Y. Hayashi. "examining the k- ϵ model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of the turbulence structure around a cube". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 35 (1990), pp. 87–100.
- [36] S. Murakami, A. Mochida e K. Hibi. "Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 25.3 (1987), pp. 291–305.
- [37] Y Nakamura. "Bluff-body aerodynamics and turbulence". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 49.1-3 (1993), pp. 65–78.
- [38] K Nozawa e T Tamura. "Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90.10 (2002), pp. 1151–1162.
- [39] A. Parente, C. Górlé, J Van Beeck e C. Benocci. "Improved k- ϵ model and wall function formulation for the RANS simulation of ABL flows". Em: *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 99.4 (2011), pp. 267–278.
- [40] D. A. Paterson e C. J. Apelt. "Simulation of flow past a cube in a turbulent boundary layer". Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 35 (1990), pp. 149–176.

- [41] L Prandtl. “On Motion of Fluids with Very Little”. Em: *Verhandlungen des dritten internationalen Mathematiker-Kongresses in Heidelberg* (1904), p. 484.
- [42] J. Revuz. “Numerical simulation of the wind flow around a tall building and its dynamic response to wind excitation”. Tese de doutoramento. University of Nottingham, 2011.
- [43] P. Richards e S. Norris. “LES modelling of unsteady flow around the Silsoe cube”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 144 (2015), pp. 70–78.
- [44] P. J. Richards e S. E. Norris. “Appropriate boundary conditions for computational wind engineering: Still an issue after 25 years”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 190 (2019), pp. 245–255.
- [45] P. Richards e R. Hoxey. “Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model”. Em: *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 46 (1993), pp. 145–153.
- [46] P. Richards, A. Quinn e S Parker. “A 6 m cube in an atmospheric boundary layer flow-Part 2. Computational solutions”. Em: *Wind and Structures* 5.2_3_4 (2002), pp. 177–192.
- [47] H. Schlichting e K. Gersten. *Boundary-layer theory*. Springer, 2016.
- [48] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang e J. Zhu. “A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows”. Em: *Computers & Fluids* 24.3 (1995), pp. 227–238.
- [49] E. Simiu e R. H. Scanlan. “Wind effects on structures: fundamentals and applications to design”. Em: (1996).
- [50] T Stathopoulos e R Storms. “Wind environmental conditions in passages between buildings”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 24.1 (1986), pp. 19–31.
- [51] T. Stathopoulos e A Baskaran. “Boundary treatment for the computation of three-dimensional wind flow conditions around a building”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 35 (1990), pp. 177–200.
- [52] S Swaddiwudhipong e M. Khan. “Dynamic response of wind-excited building using CFD”. Em: *Journal of Sound and Vibration* 253.4 (2002), pp. 735–754.
- [53] F Tessicini, N Li e M. Leschziner. “Large-eddy simulation of three-dimensional flow around a hill-shaped obstruction with a zonal near-wall approximation”. Em: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28.5 (2007), pp. 894–908.
- [54] F Tessicini, L Temmerman e M. Leschziner. “Approximate near-wall treatments based on zonal and hybrid RANS–LES methods for LES at high Reynolds numbers”. Em: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 27.5 (2006), pp. 789–799.

-
- [55] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa e T. Shirasawa. “AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings”. Em: *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 96.10-11 (2008), pp. 1749–1761.
- [56] Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu e G. van Heijst. “CFD simulation of the near-neutral atmospheric boundary layer: New temperature inlet profile consistent with wall functions”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 191 (2019), pp. 91–102.
- [57] M Tsuchiya, S Murakami, A Mochida, K Kondo e Y Ishida. “Development of a new $k-\varepsilon$ model for flow and pressure fields around bluff body”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67 (1997), pp. 169–182.
- [58] H. K. Versteeg e W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, 2007.
- [59] D. C. Wilcox et al. *Turbulence modeling for CFD*. Vol. 2. DCW industries La Canada, CA, 1998.
- [60] V. Yakhot, S. Orszag, S. Thangam, T. Gatski e C. Speziale. “Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique”. Em: *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 4.7 (1992), pp. 1510–1520.
- [61] Y. Yang, M. Gu, S. Chen e X. Jin. “New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97.2 (2009), pp. 88–95.
- [62] Y. Yang, Z. Xie e M. Gu. “Consistent inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer for the SST $k-\omega$ model”. Em: *Wind and Structures* 24.5 (2017), pp. 465–480.
- [63] A. C. Yunus. *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications (Si Units)*. Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2010.



UDF - TERRENO TIPO I E II

Listagem I.1: UDF - Terreno tipo I

```
1 /* PERFIL UM */
2
3 /* início da UDF */
4 #include "udf.h"
5
6
7 /* constantes - definidas para o perfil do tipo DOIS */
8 #define ZO 0.01 /* Comprimento de rugosidade -EC1 [m] */
9 #define ZMIN 1 /* Altura mínima - EC1 [m] */
10 #define ZOII 0.05 /* Comprimento de rugosidade do terreno tipo II -EC1 [m] */
11 #define Ub 27 /* Valor de referência da velocidade do vento - EC1 [m/s] */
12 #define co 1 /* Coeficiente de orografia - EC1 [m/s] */
13 #define ki 1 /* Coeficiente de turbulência - EC1 [m/s] */
14 #define Kvk 0.4 /* Constante de Von Karman */
15 #define kr 0.19 /* Coeficiente de terreno */
16
17
18
19
20 /* VELOCIDADE */
21
22 /* perfil de velocidade U(z) */
23 /* U(z)=Ub*cr*co */
24 /* cr - coeficiente de rugosidade - cr=kr*ln(z/ZO) */
25 /* kr - coeficientet de terreno - kr=0.19*((ZO/ZOII)^0.07) */
26 DEFINE_PROFILE(z_velocity_I,t,i)
27 {
28 real x[ND_ND];
29 real z;
```

```

30 face_t f;
31
32
33 begin_f_loop(f,t)
34 {
35 F_CENTROID(x,f,t);
36 z = x[2];
37
38 if(z<ZMIN)
39 F_PROFILE(f,t,i) = co*Ub*kr*log(ZMIN/Z0) ;
40 if(z>=ZMIN)
41 F_PROFILE(f,t,i) = co*Ub*kr*log(z/Z0) ;
42 }
43 end_f_loop(f,t)
44 }
45
46
47
48 /* TURBULÊNCIA */
49
50 /* Parâmetro Kappa - Energia cinética turbulenta */
51 /* Kappa = (3/2)*[U(z)*Iu(z)]^2 */
52 /* Iu(z)=ki/(co*ln(z/Z0)) */
53
54 DEFINE_PROFILE(kappa_I,t,i)
55 {
56 real x[ND_ND];
57 real z;
58 face_t f;
59
60
61 begin_f_loop(f,t)
62 {
63 F_CENTROID(x,f,t);
64 z = x[2];
65
66 if(z<ZMIN)
67 F_PROFILE(f,t,i) = (3/2)*((co*Ub*kr*log(ZMIN/Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0)))*((co*Ub*kr*log(ZMIN/
↪ Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0))) ;
68 if(z>=ZMIN)
69 F_PROFILE(f,t,i) = (3/2)*((co*Ub*kr*log(z/Z0))*(ki/log(z/Z0)))*((co*Ub*kr*log(z/Z0))*(ki/
↪ log(z/Z0))) ;
70 }
71 end_f_loop(f,t)
72 }
73
74 /* Parâmetro Epsilon - Taxa de dissipação de energia turbulenta */
75 /* Epsilon = [Ub*kr*Kvk]^3/(Kvk*z) */
76 DEFINE_PROFILE(epsilon_I,t,i)
77 {

```

```

78 real x[ND_ND];
79 real z;
80 face_t f;
81
82
83 begin_f_loop(f,t)
84 {
85 F_CENTROID(x,f,t);
86 z = x[2];
87
88 if(z<ZMIN)
89 F_PROFILE(f,t,i) = (Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*ZMIN) ;
90 if(z>=ZMIN)
91 F_PROFILE(f,t,i) = (Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*z) ;
92 }
93 end_f_loop(f,t)
94 }
95
96 /* Parâmetro Omega - Turbulent frequency */
97 /* Omega = Epsilon/Kappa */
98
99 DEFINE_PROFILE(omega_I,t,i)
100 {
101 real x[ND_ND];
102 real z;
103 face_t f;
104
105
106 begin_f_loop(f,t)
107 {
108 F_CENTROID(x,f,t);
109 z = x[2];
110
111 if(z<ZMIN)
112 F_PROFILE(f,t,i) = ((Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*ZMIN))/((3/2)*((co*Ub*kr*log
    ↪ (ZMIN/Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0)))*((co*Ub*kr*log(ZMIN/Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0)))) ;
113 if(z>=ZMIN)
114 F_PROFILE(f,t,i) = ((Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*z))/((3/2)*((co*Ub*kr*log(z/
    ↪ Z0))*(ki/log(z/Z0)))*((co*Ub*kr*log(z/Z0))*(ki/log(z/Z0)))) ;
115 }
116 end_f_loop(f,t)
117 }

```

Listagem I.2: UDF - Terreno tipo II

```

1 /* PERFIL DOIS */
2
3 /* início da UDF */
4 #include "udf.h"
5

```

ANEXO I. UDF - TERRENO TIPO I E II

```

6
7  /* constantes - definidas para o perfil do tipo D0IS */
8  #define Z0 0.05 /* Comprimento de rugosidade -EC1 [m] */
9  #define ZMIN 2 /* Altura mínima - EC1 [m] */
10 #define Z0II 0.05 /* Comprimento de rugosidade do terreno tipo II -EC1 [m] */
11 #define Ub 27 /* Valor de referência da velocidade do vento - EC1 [m/s] */
12 #define co 1 /* Coeficiente de orografia - EC1 [m/s] */
13 #define ki 1 /* Coeficiente de turbulência - EC1 [m/s] */
14 #define Kvk 0.4 /* Constante de Von Karman */
15 #define kr 0.19 /* Coeficiente de terreno */
16
17
18
19
20 /* VELOCIDADE */
21
22 /* perfil de velocidade U(z) */
23 /* U(z)=Ub*cr*co */
24 /* cr - coeficiente de rugosidade - cr=kr*ln(z/Z0) */
25 /* kr - coeficientet de terreno - kr=0.19*((Z0/Z0II)^0.07) */
26 DEFINE_PROFILE(z_velocity_II,t,i)
27 {
28 real x[ND_ND];
29 real z;
30 face_t f;
31
32
33 begin_f_loop(f,t)
34 {
35 F_CENTROID(x,f,t);
36 z = x[2];
37
38 if(z<ZMIN)
39 F_PROFILE(f,t,i) = co*Ub*kr*log(ZMIN/Z0) ;
40 if(z>=ZMIN)
41 F_PROFILE(f,t,i) = co*Ub*kr*log(z/Z0) ;
42 }
43 end_f_loop(f,t)
44 }
45
46
47
48 /* TURBULÊNCIA */
49
50 /* Parâmetro Kappa - Energia cinética turbulenta */
51 /* Kappa = (3/2)*[U(z)*Iu(z)]^2 */
52 /* Iu(z)=ki/(co*ln(z/Z0)) */
53
54 DEFINE_PROFILE(kappa_II,t,i)
55 {

```

```

56 real x[ND_ND];
57 real z;
58 face_t f;
59
60
61 begin_f_loop(f,t)
62 {
63 F_CENTROID(x,f,t);
64 z = x[2];
65
66 if(z<ZMIN)
67 F_PROFILE(f,t,i) = (3/2)*((co*Ub*kr*log(ZMIN/Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0)))*((co*Ub*kr*log(ZMIN/
↪ Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0))) ;
68 if(z>=ZMIN)
69 F_PROFILE(f,t,i) = (3/2)*((co*Ub*kr*log(z/Z0))*(ki/log(z/Z0)))*((co*Ub*kr*log(z/Z0))*(ki/
↪ log(z/Z0))) ;
70 }
71 end_f_loop(f,t)
72 }
73
74 /* Parâmetro Epsilon - Taxa de dissipação de energia turbulenta */
75 /* Epsilon = [Ub*kr*Kvk]^3/(Kvk*z) */
76 DEFINE_PROFILE(epsilon_II,t,i)
77 {
78 real x[ND_ND];
79 real z;
80 face_t f;
81
82
83 begin_f_loop(f,t)
84 {
85 F_CENTROID(x,f,t);
86 z = x[2];
87
88 if(z<ZMIN)
89 F_PROFILE(f,t,i) = (Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*ZMIN) ;
90 if(z>=ZMIN)
91 F_PROFILE(f,t,i) = (Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*z) ;
92 }
93 end_f_loop(f,t)
94 }
95
96 /* Parâmetro Omega - Turbulent frequency */
97 /* Omega = Epsilon/Kappa */
98
99 DEFINE_PROFILE(omega_II,t,i)
100 {
101 real x[ND_ND];
102 real z;
103 face_t f;

```

ANEXO I. UDF - TERRENO TIPO I E II

```
104
105
106 begin_f_loop(f,t)
107 {
108 F_CENTROID(x,f,t);
109 z = x[2];
110
111 if(z<ZMIN)
112 F_PROFILE(f,t,i) = ((Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*ZMIN))/((3/2)*((co*Ub*kr*log
    ↪ (ZMIN/Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0)))*((co*Ub*kr*log(ZMIN/Z0))*(ki/log(ZMIN/Z0)))));
113 if(z>=ZMIN)
114 F_PROFILE(f,t,i) = ((Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)*(Ub*kr*Kvk)/(Kvk*z))/((3/2)*((co*Ub*kr*log(z/
    ↪ Z0))*(ki/log(z/Z0)))*((co*Ub*kr*log(z/Z0))*(ki/log(z/Z0)))));
115 }
116 end_f_loop(f,t)
117 }
```