

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

KARINE KLIPPEL

**ESTUDO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM MICROESCALA NO CENTRO
DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Vitória
2020

KARINE KLIPPEL

**ESTUDO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM MICROESCALA NO CENTRO
DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Elisa Valentim Goulart

Coorientadores: Prof. Dr. Gilberto Fisch

Prof. Dr. Neyval Costa Reis Jr.

Vitória

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ESTUDO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM MICROESCALA NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Karine Klippel

Banca Examinadora:

Elisa Valentim

Profª. Drª. Elisa Valentim Goulart
Orientadora - PPGEA/CT/UFES

Gilberto Fisch

Prof. Dr. Gilberto Fisch
Coorientador - DCTA/IAE

Neyval Costa Reis Jr.

Prof. Dr. Neyval Costa Reis Jr.
Coorientador - PPGEA/CT/UFES

Bruno Furieri

Prof. Dr. Bruno Furieri
Examinador Interno - PPGEA/CT/UFES

Cayo Prado J. Francisco

Prof. Dr. Cayo Prado Fernandes Francisco
Examinador Externo - DCTA/IAE

Ramon Silva Martins

Prof. Dr. Ramon Silva Martins
Examinador Externo - DEM/UVV

Diogo Costa Buarque
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória/ES, 02 de março 2020.

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

K65e Klippel, Karine, 1993-
Estudo do escoamento atmosférico em microescala no
Centro de Lançamento de Alcântara por meio de simulações
numéricas / Karine Klippel. - 2020.
103 f. : il.

Orientadora: Elisa Valentim Goulart.
Coorientadores: Gilberto Fisch, Neyval Costa Reis Junior.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Atmosfera. 2. Ar - Poluição. 3. Turbulência atmosférica. 4.
Fluidodinâmica computacional. 5. Veículos espaciais. I. Goulart,
Elisa Valentim. II. Fisch, Gilberto. III. Reis Junior, Neyval
Costa. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. V. Título.

CDU: 628

Aos meus pais, Tânia (in memoriam) e David.

AGRADECIMENTOS

Esses anos de mestrado foram muito intensos, marcados por mudanças, alegrias e tristezas em minha vida. Não teria conseguido passar por tudo isso se não fosse a segurança e a coragem dada por Deus e pelos amigos que Ele colocou em minha vida. Por isso, hoje é muito difícil resumir meu profundo agradecimento apenas em poucas palavras. Espero que todos sintam meu sincero afeto nessa pequena frase: muito obrigada!

A Deus pelas imensuráveis bênçãos e pelo infinito cuidado.

Ao meu querido esposo Dani por me incentivar, por estudar comigo, por lutar comigo, pela parceria de todos os dias e pela ajuda com a dissertação.

À minha querida irmã e seu esposo pelo apoio, pela força, pelas visitas, pela alegria que trazem à minha vida e pela ajuda com a dissertação.

Ao meu querido pai por sempre ter lutado por meus estudos e por se preocupar comigo mesmo passando por situações difíceis.

À minha orientadora Elisa pelas orientações, pelo apoio, pela confiança, pela atenção e por ser muito mais que uma orientadora.

Ao meu coorientador Gilberto pela fundamental ajuda ao longo de todo o trabalho e por ter me proporcionado experiências inesquecíveis como conhecer o Centro de Lançamento de Alcântara.

Aos professores Bruno e Cayo pelo tempo gasto comigo e pela ajuda com minhas tantas dúvidas.

Aos professores Jane e Neyval, que foram fundamentais para a minha formação.

Aos meus colegas do Nqualiar, Vitor, Victoria, Jefferson, Jamily, Adrielle, Nathalia, Yasmin, Felipe, Larissa, Maressa, Alexandre, Igor, Philipe, Yossimar, que se tornaram amigos para a vida toda. Obrigada pelo apoio, pela ajuda e pelas brincadeiras.

Aos meus amigos Larisse e Vinícius por serem tão especiais e pela ajuda também com a dissertação.

Ao CNPq pelo suporte financeiro necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

*"De um lado a poesia, o verbo, a saudade
Do outro a luta, a força e a coragem pra chegar no fim."
O Teatro Mágico*

RESUMO

O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) é a principal base de lançamento de foguetes do Brasil. O local de preparação e lançamento dos veículos espaciais (SPL) está posicionado a 150 metros da costa, sobre uma falésia irregular de aproximadamente 40 metros de altura. O escoamento atmosférico no SPL é influenciado pela falésia, pela variação de rugosidade (oceano - continente) e pelos prédios como a torre móvel de integração (TMI) e a torre de escape, o que pode afetar a segurança das operações na plataforma e a dispersão de gases tóxicos emitidos durante os lançamentos. Gases tóxicos, como o cloreto de hidrogênio (HCl), constituem-se um importante impacto do lançamento do veículo lançador de satélites no CLA. O vento é um dos principais fatores que influenciam a dispersão atmosférica, determinando o transporte dos contaminantes. Portanto, a compreensão do padrão do escoamento ao redor dos prédios do SPL e o entendimento de suas modificações devido à topografia da região são importantes para estabelecer as condições nas quais o CLA está exposto e fornecer o embasamento necessário para estudos de dispersão de poluentes. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar o escoamento atmosférico no CLA em microescala, por meio de simulações numéricas, incluindo o detalhamento da topografia e das condições meteorológicas da região. Para isso, foram consideradas três diferentes configurações: terreno simplificado (caso 1), terreno complexo com superfície lisa (caso 2) e terreno complexo com rugosidade superficial característica (caso 3). O vento incidente foi obtido a partir de dados de reanálise FNL, considerando condição de neutralidade atmosférica. Para o caso 3 também foram avaliadas diferentes direções do vento incidente: 45°, 70° e 90°. O modelo de turbulência utilizado foi o $\kappa - \varepsilon$ realizável, baseado nas equações médias de Navier Stokes (RANS). As soluções das equações foram obtidas pelo programa ANSYS Fluent 19.0, utilizando o método dos volumes finitos. Os resultados das simulações numéricas apresentaram boa concordância com as medições em campo para o caso com geometria mais complexa (caso 3). A topografia e a direção do vento incidente influenciaram o padrão de escoamento no SPL. A falésia foi um dos principais elementos responsáveis pela modificação do escoamento, especialmente para o caso 1, onde foi representada como um degrau de 90°. As regiões turbulentas ao longo do domínio foram acentuadas ou atenuadas de acordo com a direção do vento incidente. Para as direções de 45° e 70°, o local de lançamento dos foguetes foi afetado principalmente pela esteira turbulenta da torre de escape. Para a direção do vento de 90°, a esteira da TMI gerou maior interferência no local. Também foi realizada uma simulação numérica da dispersão de HCl considerando um caso hipotético de lançamento abortado, com taxa de emissão de 29,4 kg/s durante 5 minutos. Os resultados apontaram concentrações de HCl perigosas para curta exposição, principalmente próximo à fonte. A pluma do poluente foi transportada pelo vento e levou cerca de 10 minutos para sair do domínio.

Palavras-chave: escoamento em terreno complexo, dinâmica dos fluidos computacional (CFD), turbulência atmosférica, lançamento de foguetes, dispersão atmosférica.

ABSTRACT

The Alcântara Launch Center (CLA) is the main Brazilian gateway to space. The launch pad area (SPL) is positioned 150 meters from the coast, on an irregular cliff, approximately 40 meters high. The atmospheric flow in the SPL is influenced by the cliff, the roughness change (ocean-continent) and the buildings like the mobile integration tower (TMI) and the exit tower, which can affect the safety of operations on the platform and the dispersion of toxic gases emitted during the launching. Toxic gases, like hydrogen chloride (HCl), are an important impact of the launching at the CLA. The flow field is one of the main factors that influence atmospheric dispersion, determining the efficiency of the transport of the contaminants. Therefore, understanding the flow pattern around the SPL buildings and the changes caused by the topography are important to establish the conditions in which the CLA is exposed and provide the necessary background for studies on pollutant dispersion. In this context, the objective of this work was to study the atmospheric flow in the CLA, through numerical simulations, including the topography and the meteorological conditions of the region. For this, three different configurations were considered: simplified terrain (case 1), smooth complex terrain (case 2) and roughness complex terrain (case 3). The incident flow was obtained from re-analysis data, considering a neutral atmospheric condition. Regarding case 3, the directions of the incident flow were: 70, 45 and 90°. The numerical model used was the realizable $\kappa - \varepsilon$, based on the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations. The solutions to the equations were obtained by ANSYS Fluent 19.0, using the finite volume method. The results of the numerical simulations presented a good agreement with the field measurements for the most complex geometry (case 3). The topography and incident wind direction influenced the flow pattern in the SPL. The cliff was the major responsible for changing the flow, especially for case 1, where it has been represented by a step. The regions with greater turbulence along the domain were accentuated or attenuated according to the direction of the incident wind. For 70 and 45° directions, the rocket launch site was mainly affected by the turbulent wake behind the exit tower. While the 90° wind direction, the wake generated by the TMI interfered the most at the launch site. A numerical simulation of HCl dispersion was also performed considering a hypothetical case of aborted launch, with an emission rate of 29.4 kg/s for 5 minutes. The results pointed out dangerous HCl concentrations for short exposure, mainly close to the source. The plume of the pollutant was carried by the wind and took about 10 minutes to leave the domain.

Keywords: atmospheric flow over complex terrain, computational fluid dynamics (CFD), atmospheric turbulence, rocket launch, atmospheric dispersion.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CLI	Camada Limite Interna
CLP	Camada Limite Planetária
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
SPL	Setor de Preparação e Lançamento
TA	Torre Anemométrica
TE	Torre de escape
TIN	<i>triangulated irregular network</i>
TMI	Torre Móvel de Integração

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos

A_0, A_S	constantes empíricas
a_P, a_{nb}	coeficientes linearizados
C	número de Courant
C_1, C_2, C_s	constantes empíricas
c	concentração do contaminante (massa/massa)
C_μ	constante empírica do modelo $\kappa - \varepsilon$
D_{ij}	termo de transporte difusivo das tensões de Reynolds (N/m ² .s)
D_m	difusividade molecular do contaminante no fluido (m ² /s)
E	constante empírica
ER	erro relativo (%)
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
h_e	altura do elemento de rugosidade (m)
I	intensidade da turbulência (%)
K_S^+	altura adimensional da rugosidade
K_S	altura física de rugosidade (m)
l	comprimento característico (m)
N	número de faces da célula da malha computacional
nb	identificação das células vizinhas da malha computacional
p	pressão estática (N/m ²)
P_{ij}	termo de produção das tensões de Reynolds (N/m ² .s)
P_κ	termo de produção de energia cinética turbulenta (N/m ² .s)
P	ponto central do elemento da malha computacional
S_{ij}	tensor deformação por cisalhamento (s ⁻¹)

S	termo fonte (kg/s.m ³)
Sc	número de Schmidt
t	tempo (s)
\bar{U}	velocidade média (m/s)
u_i	componente instantânea da velocidade na direção i (m/s)
\bar{u}_i	velocidade média na direção i (m/s)
u'_i	flutuação da velocidade na direção i (m/s)
u^*	velocidade de fricção (m/s)
u^+	velocidade adimensional
x_i	componente i do vetor posição (m)
z_0	comprimento de rugosidade aerodinâmica (m)
z	altura (m)
l	escala de comprimento da turbulência (m)

Símbolos Gregos

$\alpha, \alpha^*, \hat{\alpha}_0$	constantes empíricas
$\beta, \beta^*, \hat{\beta}_0$	constantes empíricas
γ	expoente da lei exponencial
$\hat{\gamma}_0$	constante empírica
Γ_ϕ	coeficiente de difusão característico
δ_{ij}	operador delta de Kronecker
δ	espessura da camada limite (m)
ΔB	constante empírica
ε	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (m ² /s ³)
ε_{ij}	taxa de destruição das tensões de Reynolds pela ação viscosa (m ² /s ³)
κ_*	constante de von Kármán
μ	viscosidade dinâmica do fluido (N.s/m ²)

μ_{turb}	viscosidade turbulenta (N.s/m ²)
Π_{ij}	termo de transporte das tensões de Reynolds devido às interações turbulentas pressão-deformação (N/s.m ²)
ρ	massa específica do fluido (kg/m ³)
$\sigma_{\omega}, \sigma_{\omega,1}, \sigma_{\omega,2}$	constantes empíricas
$\sigma_{\kappa}, \sigma_{\kappa,1}, \sigma_{\kappa,2}$	constantes empíricas
τ_{ij}	soma dos tensores de tensão molecular e de Reynolds (N/m ²)
τ_{ij}^{turb}	tensor das tensões de Reynolds (N/m ²)
ϕ	quantidade escalar genérica
ω	taxa de dissipação específica da turbulência (s ⁻¹)
ω	velocidade angular (rad/s)

Subscritos

i, j, k índices de direção

Sobrescritos

' flutuações turbulentas

- valores médio-temporais

+ adimensional

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Imagem aérea do CLA. A figura indica a localização da torre móvel de integração (TMI).	20
Figura 1.2 – Setor de preparação e lançamento (SPL). Na imagem estão identificadas a torre móvel de integração (TMI), a torre de escape e a casa de apoio.	21
Figura 3.1 – Esquema da Camada Limite Planetária (CLP) como a parte inferior da atmosfera.	26
Figura 3.2 – Representação esquemática do campo de escoamento ao redor de um obstáculo. Vista do plano central.	27
Figura 3.3 – Representação do perfil de velocidades perturbado na esteira.	28
Figura 3.4 – Resultados dos experimentos de túnel de vento de Pires et al. (2010).	30
Figura 3.5 – Esquema do desenvolvimento da camada limite interna (CLI) sobre a falésia costeira.	30
Figura 3.6 – Localização dos sensores utilizados nas medições de Medeiros et al. (2013).	32
Figura 3.7 – Modelo topográfico do CLA construído para os ensaios de túnel de vento de Wittwer et al. (2016) e Wittwer et al. (2018).	34
Figura 3.8 – Modelo do CLA utilizado nos ensaios de túnel de vento por Faria, Avelar e Fisch (2019)	35
Figura 3.9 – Esquema de formação da nuvem de exaustão de um foguete	35
Figura 3.10–Resultado da simulação da nuvem de exaustão de um VLS lançado no CLA. A figura apresentada a topografia da região em um grid de 100 x 100 km, com resolução de 100 m, e os vetores velocidade.	36
Figura 4.1 – Identificação do domínio de estudo. L e W são, respectivamente, o comprimento e a largura do domínio.	39
Figura 4.2 – Geometria simplificada utilizada no caso 1.	40
Figura 4.3 – Curvas de nível obtidas a partir dos dados da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA)	40
Figura 4.4 – Superfície elaborada para o caso 3, formada por elementos triangulares.	41
Figura 4.5 – Fotos da vegetação do CLA	42
Figura 4.6 – Prédios do setor de preparação e lançamento (SPL) considerados no domínio computacional	42
Figura 4.7 – Geometria utilizada no caso 3, composta pela topografia, os prédios do CLA e a elevação da superfície representando a vegetação. A geometria 1 possui as mesmas dimensões apresentadas.	43
Figura 4.8 – Representação esquemática da variação randômica da velocidade em torno da média em um tempo t.	45
Figura 4.9 – Comportamento da lei de parede para superfícies lisas e rugosas.	52

Figura 4.10–Identificação das condições de contorno no domínio computacional para direção do vento de 45° e 70°	54
Figura 4.11–Identificação das condições de contorno no domínio computacional para direção do vento de 90°	55
Figura 4.12–Perfil de velocidade U adotado na entrada do modelo. h_{TMI} é a altura da TMI (33 metros) e \bar{U} é a velocidade média de entrada (11,5 m/s).	56
Figura 4.13–Esquema de um volume de controle.	59
Figura 4.14–Visualização da malha construída para o caso 3: a) visão geral, b) visão aproximada da TMI, c) visão aproximada da falésia.	60
Figura 4.15–Identificação da torre anemométrica (TA) e dos pontos de medição dos experimentos de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012).	62
Figura 4.16–Pontos de medições dos experimentos de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012).	63
Figura 4.17–Dados da torre anemométrica do CLA em 20 de setembro de 2008, às 00:00 horas.	63
Figura 5.1 – Modelo topográfico do Centro de Lançamento de Alcântara desenvolvido para as simulações numéricas. Na imagem é indicada a localização da torre móvel de integração (TMI).	64
Figura 5.2 – Fotografia aérea do domínio de estudo. Na imagem é indicada a localização da torre móvel de integração (TMI).	65
Figura 5.3 – Modelo topográfico do CLA: variação de altitude ao longo do domínio. Na imagem é indicada a localização da torre móvel de integração (TMI).	65
Figura 5.4 – Comparação entre as velocidades medidas na torre anemométrica do CLA e calculadas nas simulações numéricas pelos modelos $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM para o caso 3a. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m) e \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s).	68
Figura 5.5 – Comparação entre as direções do vento medidas na torre anemométrica e calculadas nas simulações numéricas pelos modelos $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM para o caso 3a. As linhas tracejadas representam a direção média para cada cenário. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m).	68
Figura 5.6 – Comparação dos campos de velocidade ao redor da TMI para os modelos: a) $\kappa - \varepsilon$ realizável e b) RSM.	69
Figura 5.7 – Comparação dos campos de energia cinética turbulenta ao redor da TMI para os modelos: a) $\kappa - \varepsilon$ realizável e b) RSM.	69
Figura 5.8 – Linhas de correntes na direção do escoamento passando pela falésia: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a. A indica o ponto mais alto da falésia e B indica o ponto mais baixo logo após a falésia.	71
Figura 5.9 – Energia cinética turbulenta ao redor da falésia: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.	72
Figura 5.10–Linhas de correntes na direção do escoamento ao redor da TMI: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.	74

Figura 5.11–Vetores velocidade no plano XZ passando pela TMI: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.	75
Figura 5.12–Energia cinética turbulenta ao redor da TMI: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.	77
Figura 5.13–Localização dos perfis traçados ao longo do domínio.	78
Figura 5.14–Perfis de velocidade u média ao longo do plano xz para os casos 1, 2 e 3a nas posições: a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, e) T5, f) T6. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m) e \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s).	79
Figura 5.15–Comparação entre as velocidades medidas na torre anemométrica do CLA e calculadas nas simulações numéricas para os casos 1, 2 e 3a. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m) e \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s).	80
Figura 5.16–Campos de velocidade média no plano horizontal xy em z/h_{TMI} igual a 0,1: a) caso 3a; b) caso 3b; c) caso 3c. z é a altura do plano a partir da altitude de 40 metros e h_{TMI} é a altura da TMI.	82
Figura 5.17–Linhas de corrente ao redor da TMI e da torre de escape no plano horizontal xy em z/h_{TMI} igual a 0,1: a) caso 3a; b) caso 3b; c) caso 3c. z é a altura do plano a partir da altitude de 40 metros e h_{TMI} é a altura da TMI.	83
Figura 5.18–Linhas de corrente passando pela TMI e pela torre de escape: a,b) caso 3a; c,d) caso 3b; e,f) caso 3c.	85
Figura 5.19–Perfis de velocidade média (u), intensidade da turbulência (I) e energia cinética turbulenta (ETC) nos pontos D1, D2 e D3. h_{TMI} é a altura da TMI, \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s) e ECT_{med} é a ECT média na entrada do domínio ($5,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$).	87
Figura 5.20–Concentração de HCl em $z = 44$ metros para o tempo de simulação de: a) 10 s, b) 150 s, c) 300 s e d) 450 s.	90
Figura 5.21–Pluma de HCl no plano longitudinal à direção do escoamento.	91
Figura 5.22–Concentração ao longo do tempo em diferentes pontos do domínio em 0, 50, 100, 200, 300 e 1000 m de distância da fonte de emissão, na direção da pluma de HCl.	91
Figura 5.23–Isosuperfícies de concentrações críticas de HCl no instante 300 s: a) 5 ppmv, b) 35 ppmv, c) 50 ppmv e d) 1000 ppmv.	92
Figura A.1 –Perfis transversais de velocidade e energia cinética turbulenta (ECT) em $x = 5h_{TMI}$ à jusante da TMI e $z = h_{TMI}/2$ para os casos 1 a 3: a, d) velocidade e ECT para o caso 1; b, e) velocidade e ECT para o caso 2; c, f) velocidade e ECT para o caso 3. h_{TMI} é a altura da TMI igual a 33 metros.	102
Figura A.2–Perfis verticais de velocidade em $y = 760$ m (plano que passa pela TMI) para os casos 1, 2 e 3: a, b, c) caso 1 em $5h_{TMI}$ à montante, no centro e $5h_{TMI}$ à jusante da TMI; d, e, f) caso 2 em $5h_{TMI}$ à montante, no centro e $5h_{TMI}$ à jusante da TMI; g, h, i) caso 3 em $5h_{TMI}$ à montante, no centro e $5h_{TMI}$ à jusante da TMI. h_{TMI} é a altura da TMI igual a 33 metros.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Composição básica dos gases de combustão do propelente sólido do Veículo Lançador de Satélites (VLS).	22
Tabela 4.1 – Esquemas de discretização espacial e acoplamento pressão-velocidade utilizados nas simulações numéricas.	59
Tabela 4.2 – Número de nós e de elementos das malhas computacionais utilizadas nos casos 1 a 3.	61
Tabela 5.1 – Comparação entre as medições de campo (U_{med}) e os resultados das simulações numéricas (U_{sim}) para o caso 3a utilizando os modelos $\kappa - \varepsilon$ e RSM. ER é o erro relativo entre os resultados, dado em %	67
Tabela 5.2 – Comparação entre as medições de campo (U_{med}) e os resultados das simulações numéricas (U_{sim}) para os casos 1, 2 e 3a utilizando o modelo $\kappa - \varepsilon$. ER é o erro relativo entre os resultados, dado em %	80
Tabela 5.3 – Efeitos da exposição ao cloreto de hidrogênio (HCl) na saúde humana. . . .	88
Tabela A.1 – Número de nós e de elementos em cada malha computacional do teste de sensibilidade. A malha escolhida para o desenvolvimento deste trabalho está destacada em vermelho.	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS	24
2.1	OBJETIVO GERAL	24
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	CAMADA LIMITE PLANETÁRIA E TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA	25
3.2	ESCOAMENTO AO REDOR DE OBSTÁCULOS ISOLADOS	27
3.3	ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA	28
3.4	DISPERSÃO ATMOSFÉRICA NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE AL- CÂNTARA	35
3.5	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
4	METODOLOGIA	39
4.1	CASOS SIMULADOS	39
4.2	MODELAGEM MATEMÁTICA	43
4.2.1	Equações governantes	43
4.2.2	Tratamento da turbulência	44
4.2.2.1	Equações médias e o problema de fechamento	45
4.2.2.2	Modelos de viscosidade turbulenta - fechamento de primeira ordem	47
4.2.2.2.1	<i>Modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ realizável</i>	47
4.2.2.3	Modelo das tensões de Reynolds (RSM) - fechamento de segunda ordem	49
4.2.2.3.1	<i>Modelo linear de pressão-deformação</i>	50
4.2.3	Tratamento próximo à parede	51
4.2.4	Condições de contorno	54
4.2.5	Representação da fonte de emissão	57
4.3	MÉTODOS NUMÉRICOS	58
4.3.1	Método dos Volumes Finitos	58
4.3.2	Malhas computacionais	60
4.3.3	Parâmetros das simulações e recursos computacionais	61
4.4	VALIDAÇÃO	61
4.4.1	Experimentos de campo	62
4.4.2	Torre anemométrica	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64

5.1	MODELO TOPOGRÁFICO	64
5.2	VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA	66
5.3	ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA	70
5.3.1	Influência da topografia e da rugosidade superficial	70
5.3.2	Influência da direção do vento incidente no escoamento atmosférico do CLA	81
5.4	ESTUDO DE CASO DA DISPERSÃO DE HCL NO CLA	88
6	CONCLUSÕES	93
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A – TESTE DE SENSIBILIDADE DAS MALHAS COM- PUTACIONAIS	101

1 INTRODUÇÃO

O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) é a principal porta de acesso do Brasil ao espaço (Figura 1.1). Ele está localizado na região nordeste do país, no município de Alcântara, estado do Maranhão. A base possui algumas vantagens operacionais, dentre as quais destaca-se sua proximidade à linha do Equador ($2^{\circ}18'S$), que consiste em um dos fatores preponderantes para a operação de veículos suborbitais (foguetes de sondagem) e orbitais (veículos lançadores de satélites). Além disso, a região apresenta baixa densidade demográfica, o que favorece a segurança e a implantação de diversos sítios de lançamento, e possui facilidades de suporte logístico, devido à sua localização em relação a capital São Luís e a importantes centros de operações espaciais como o Centro Espacial de Kourou, na Guiana Francesa (FAB, 2020).

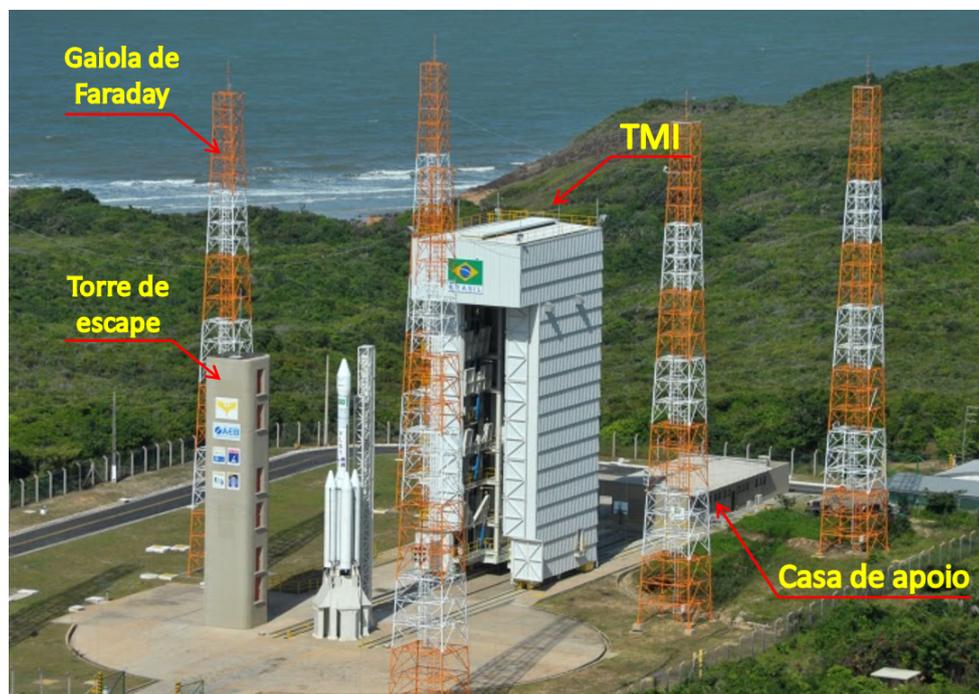
Figura 1.1 – Imagem aérea do CLA. A figura indica a localização da torre móvel de integração (TMI).



O setor de preparação e lançamento (SPL) dos veículos espaciais, visto na Figura 1.2, é o local onde as atividades operacionais associadas ao lançamento dos foguetes são conduzidas. O SPL está posicionado a cerca de 150 metros da costa litorânea, sobre uma falésia irregular de, aproximadamente, 40 metros de altura (Figura 1.1). Sendo assim, alguns pontos importantes para o escoamento atmosférico no SPL são observados: mudança de rugosidade (superfície lisa do oceano para a superfície rugosa do continente) e variação abrupta de topografia causada pela falésia. Em consequência disso, o escoamento do oceano em direção ao continente é perturbado e as características da camada limite planetária são modificadas. Uchida e Ohya (2003) salientam que acelerações locais do vento e zonas de separação da camada limite podem ser formadas em escoamentos sobre topografias complexas. Essas circunstâncias podem afetar a segurança das

operações na plataforma, incluindo a dispersão de gases tóxicos emitidos durante o lançamento dos veículos espaciais.

Figura 1.2 – Setor de preparação e lançamento (SPL). Na imagem estão identificadas a torre móvel de integração (TMI), a torre de escape e a casa de apoio.



Fonte: Adaptado de AEB (2019)

O SPL é composto por edificações necessárias às operações e à segurança do lançamento de foguetes. Dentre elas destacam-se a torre móvel de integração (TMI), a torre de escape e a casamata, instaladas próximas ao local de lançamento. A TMI consiste em uma estrutura metálica de 33 metros de altura na qual o veículo espacial é preparado e testado. Na sequência, o prédio é deslocado por, aproximadamente, 55 metros e o foguete entra em estado de lançamento. Acoplado à TMI está a torre de escape, um prédio de concreto de, aproximadamente, 25 metros de altura conectado a um túnel subterrâneo utilizado para a evacuação dos trabalhadores em caso de emergência. Por último, a casamata, localizada a cerca de 220 metros do local de lançamento, consiste no prédio de controle avançado das operações, responsável pela supervisão e pelo controle de todas as ações nas proximidades do lançador (FAB, 2020).

O escoamento ao redor de um prédio é dominado pela turbulência mecânica gerada por cisalhamento. Dessa forma, sua presença modifica os padrões de escoamento, levando à formação de regiões características, dentre as quais pode-se incluir as zonas de separação da camada limite, zonas de recirculação e a esteira turbulenta. Sistemas mais complexos podem conter também o chamado vórtice de ferradura. As regiões de escoamento separado são observadas nas laterais e no topo do obstáculo. Uma intensa zona de recirculação é formada à jusante do prédio. A esteira turbulenta atrás dele é a região na qual o escoamento lentamente retorna às suas condições não perturbadas (ARYA, 1999).

Um dos principais impactos relacionados ao lançamento de foguetes está na alta taxa de liberação de poluentes que podem causar riscos à saúde humana. Os motores dos foguetes lançados no CLA, incluindo o veículo lançador de satélites (VLS), funcionam a partir da queima de propelente sólido à base de perclorato de amônio aluminizado. Conforme mostra a Tabela 1.1, o resultado da queima desse combustível é a emissão de gases tóxicos como o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂) e o cloreto de hidrogênio (HCl), além de material particulado composto por óxido de alumínio (Al₂O₃). O HCl corresponde a 21,6% (massa/massa) dos gases de combustão do propelente sólido (MOREIRA; TRINDADE, 2010). O poluente consiste em um gás incolor e corrosivo, com odor pungente e sufocante, e é um irritante potencialmente grave do trato respiratório humano (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1998).

Tabela 1.1 – Composição básica dos gases de combustão do propelente sólido do Veículo Lançador de Satélites (VLS).

Produto	% massa/massa
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃ sólido)	28,2
Monóxido de carbono (CO)	27,6
Cloreto de hidrogênio (HCl)	21,6
Nitrogênio (N ₂)	8,4
Vapor de água (H ₂ O)	7,0
Dióxido de carbono (CO ₂)	4,4
Hidrogênio (H ₂)	2,8

Fonte: Moreira e Trindade (2010)

Iriart e Fisch (2016) e Schuch e Fisch (2017) concluíram que o vento é um dos principais fatores meteorológicos que influenciam na dispersão de poluentes no CLA. Sendo assim, a compreensão do padrão do escoamento ao redor dos prédios do SPL e de sua modificação devido às características geográficas da região é importante para estabelecer as condições às quais o CLA está exposto e fornecer o embasamento necessário para estudos de dispersão dos poluentes emitidos durante os lançamentos de foguetes.

O escoamento atmosférico no CLA foi estudado por meio de diferentes abordagens. Medições em campo forneceram a base para o entendimento dos padrões do escoamento na região e para a realização de estudos experimentais de túnel de vento e de simulações numéricas (ROBALLO; FISCH, 2008; MAGNAGO; FISCH; MORAES, 2010; GISLER; FISCH; CORREA, 2011; MARCIOTTO; FISCH; MEDEIROS, 2012; MEDEIROS et al., 2013; COUTO; FISCH, 2018; RAMOS; FERNANDEZ; FISCH, 2018).

Nos estudos envolvendo ensaios de túnel de vento, simplificações foram empregadas na representação da meteorologia e da geometria do CLA (ROBALLO; FISCH; GIRARDI, 2009; PIRES et al., 2010; PIRES et al., 2009; FARIA; AVELAR; FISCH, 2019). Devido às limitações dos experimentos, os ensaios alcançaram números de Reynolds menores do que o característico para

a região. Em relação à geometria, os experimentos consideraram a mudança abrupta da topografia causada pela falésia, porém, representando-a como um degrau com diferentes inclinações.

Sabe-se, no entanto, que a falésia da região é muito irregular e heterogênea, assim como todo terreno do CLA. Diante disso, Wittwer et al. (2016) conduziram um estudo inicial em túnel de vento analisando a influência da topografia real do CLA no escoamento atmosférico. Os autores reforçaram a importância de se utilizar modelos topográficos nesse tipo de estudo, pois concluíram que simplificações no terreno podem levar a resultados menos precisos. Dessa forma, mais estudos nesse sentido são necessários para compreender melhor o padrão de escoamento no CLA.

O escoamento em terrenos complexos têm sido estudado por diversos autores a fim de entender os efeitos da topografia na velocidade do vento e prever, por exemplo, a dispersão de poluentes nessas regiões (HANJALIĆ; KENJEREŠ, 2005; BALOGH; PARENTE; BENOCCI, 2012; YIM; FUNG; NG, 2014; BLOCKEN et al., 2015; LIU et al., 2016; YAN et al., 2016; YANG; PAKULA; SOTIROPOULOS, 2018; TANG et al., 2019; SHARMA; WARUDKAR; AHMED, 2020). Muitos desses estudos têm empregado a técnica de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), em especial, os modelos de turbulência RANS $\kappa - \epsilon$, apresentando bons resultados em comparação às medições em campo (BALOGH; PARENTE; BENOCCI, 2012; TANG et al., 2019; GANT; TUCKER, 2018; YAN et al., 2016; BLOCKEN et al., 2015).

Embora poucos trabalhos tenham sido realizados por meio de simulações numéricas considerando a região do CLA (PIRES et al., 2011; SOUZA; FISCH; GOULART, 2015), a complementação das informações utilizando métodos computacionais é importante, pois possibilita a realização de novas análises, além da descrição espacial dos campos de velocidade e de turbulência que definem o escoamento.

Em relação à dispersão dos poluentes emitidos no lançamento de foguetes no CLA, muitos trabalhos foram desenvolvidos utilizando modelos de mesoescala como o WRF-Chem e o CMAQ (IRIART; FISCH, 2016; SCHUCH; FISCH, 2017; NASCIMENTO; SOUZA; MOREIRA, 2019; NASCIMENTO et al., 2014). No entanto, a técnica de dinâmica dos fluidos computacional tem sido bastante empregada em estudos da dispersão de poluentes, incluindo em terrenos complexos (HANJALIĆ; KENJEREŠ, 2005; TEWARI et al., 2010; TOMINAGA; STATHOPOULOS, 2013; GANT; TUCKER, 2018). À vista disso, o presente trabalho se propôs a empregar a técnica de CFD no estudo do escoamento atmosférico e da dispersão de HCl no CLA, identificando os campos de velocidade e de concentração do poluente no SPL em microescala.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara em microescala, por meio de simulações numéricas, incluindo o detalhamento da topografia e das condições meteorológicas da região.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os principais elementos topográficos e as condições meteorológicas relevantes para o escoamento no CLA;
- Investigar a influência de simplificações na geometria que representa o CLA e da vegetação no escoamento atmosférico na região;
- Analisar a influência de diferentes direções do vento incidente no escoamento atmosférico no CLA;
- Realizar um estudo de caso da dispersão de HCl emitido durante um lançamento abortado, considerando um caso hipotético com condições meteorológicas e ventos característicos do CLA.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos relacionados à camada limite planetária e à turbulência atmosférica, destacando a importância da topografia no escoamento atmosférico. Na sequência, são abordadas as características do escoamento ao redor de um obstáculo, já que o domínio de estudo incluiu os prédios que compõem o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Por fim, a presente pesquisa é contextualizada por meio da apresentação dos estudos realizados no CLA envolvendo o escoamento atmosférico e a dispersão de poluentes na região.

3.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA E TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

De acordo com Stull (1988), a troposfera se estende da superfície da Terra até uma altitude média de 11 km, no entanto, apenas os quilômetros mais baixos, onde encontra-se a camada limite planetária (CLP), são diretamente afetados pela superfície adjacente.

A CLP é formada como uma consequência de interações entre a atmosfera e a superfície adjacente via processos turbulentos em escalas de tempo curtas (ARYA, 1999). Pode-se definir, portanto, que a CLP é a parte da troposfera diretamente influenciada pela presença da Terra e que responde às forçantes da superfície (arrasto, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificação do escoamento devido à topografia) numa escala de tempo de cerca de uma hora ou menos (STULL, 1988).

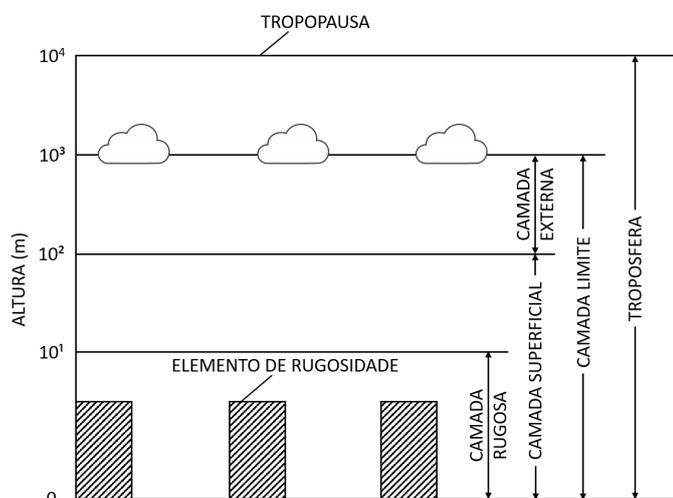
Um esquema da CLP como a parte inferior da troposfera é mostrado na Figura 3.1. A espessura da camada limite planetária varia no tempo e no espaço, de centenas de metros a alguns quilômetros (STULL, 1988). Essa variação é influenciada pelas condições atmosféricas ao longo do dia (aquecimento e resfriamento da superfície), pela intensidade do vento, pela rugosidade e topografia da superfície, entre outros fatores (ARYA, 1999).

O escoamento na atmosfera é influenciado pelas tensões de cisalhamento e pelas forças de empuxo. Essas influências são limitadas à CLP. Portanto, o fenômeno da dispersão de poluentes é estudado nessa parte da troposfera, onde os principais processos de transporte e remoção dos poluentes ocorrem mais frequentemente. Na região acima da CLP, chamada de atmosfera livre, o escoamento é influenciado apenas pelos gradientes horizontais de pressão e pelas forças de Coriolis (SEINFELD; PANDIS, 2006).

A camada limite planetária é quase continuamente turbulenta ao longo de toda a sua extensão (STULL, 1988). A turbulência caracteriza a natureza aparentemente caótica do escoamento de fluidos, que se manifesta na forma de flutuações altamente irregulares, quase aleatórias, temporais e espaciais na velocidade, temperatura e concentrações escalares em torno de seus valores médios. Na atmosfera ela pode ser observada, por exemplo, através das rajadas de vento que fazem as árvores balançarem e da dispersão de poluentes lançados por chaminés (ARYA,

1999).

Figura 3.1 – Esquema da Camada Limite Planetária (CLP) como a parte inferior da atmosfera.



Fonte: Adaptado de Arya (1999)

Dessa forma, a turbulência consiste em um importante processo de transporte intrínseco à CLP que deve ser estudado. A turbulência dentro da CLP está associada a um alto número de Reynolds, da ordem de 10^6 a 10^7 , ou seja, os efeitos da viscosidade molecular no escoamento são muito pequenos para suavizar as perturbações e, por isso, há a formação de vórtices turbulentos, que consistem em movimentos de rotação de diferentes tamanhos, dispostos de forma randômica (ARYA, 1999).

Grande parte da turbulência da CLP é gerada por forçantes provenientes da superfície como aquecimento solar, arrasto e obstáculos (STULL, 1988). A topografia também exerce um papel fundamental no escoamento atmosférico na camada limite planetária. Acelerações locais do vento e zonas de separação podem ser identificados em escoamento atmosféricos sobre terrenos complexos (UCHIDA; OHYA, 2003).

Dessa forma, muitos estudos foram realizados para conhecer o campo de velocidades e suas modificações em terrenos topográficos, bem como para encontrar a melhor forma de representá-los (KIM; PATEL; LEE, 2000; UCHIDA; OHYA, 2003; PROSPATHOPOULOS; VOUTSINAS, 2006; TAMURA; OKUNO; SUGIO, 2007; BALOGH; PARENTE; BENOCCI, 2012; BLOCKEN et al., 2015; LIU et al., 2016; YAN et al., 2016; YANG; PAKULA; SOTIROPOULOS, 2018; TANG et al., 2019; SHARMA; WARUDKAR; AHMED, 2020).

Sharma, Warudkar e Ahmed (2020), por exemplo, identificaram vantagens na instalação de turbinas eólicas no topo de um morro em relação à uma superfície plana devido à aceleração do escoamento e aos efeitos da turbulência no local. Blocken et al. (2015) verificaram que um terreno irregular e montanhoso ao redor de um canal estreito produz condições ambientais eólicas complexas, podendo afunilar o escoamento, aumentando a velocidade do vento no canal, ou reduzir a velocidade, de acordo com a direção do vento.

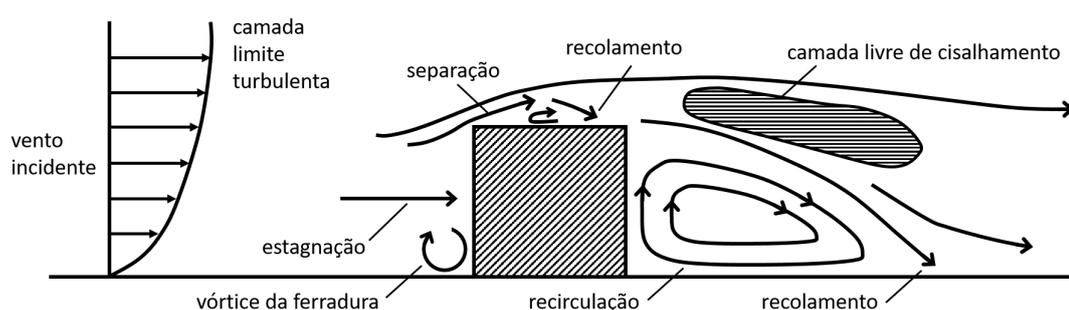
Boa parte dos trabalhos foi desenvolvido por meio de simulações numéricas, utilizando modelos RANS $\kappa - \varepsilon$, tendo obtido boa concordância com ensaios de túnel de vento e medições em campo (KIM; PATEL; LEE, 2000; PROSPATHOPOULOS; VOUTSINAS, 2006; BALOGH; PARENTE; BENOCCI, 2012; BLOCKEN et al., 2015; YAN et al., 2016; GANT; TUCKER, 2018; TANG et al., 2019; SHARMA; WARUDKAR; AHMED, 2020). Estes trabalhos ressaltam a importância de se inserir a rugosidade superficial da região de estudo, bem como uma função de parede para melhor calcular os efeitos na região próxima à superfície e reduzir o número de células de malha necessárias imediatamente adjacentes ao solo (YAN et al., 2016).

3.2 ESCOAMENTO AO REDOR DE OBSTÁCULOS ISOLADOS

O escoamento ao redor de um obstáculo é muito complexo. A partir dos estudos realizados no decorrer dos anos, como por exemplo os estudos de Woo, Peterka e Cermak (1977), Meroney (1982), Peterka, Meroney e Kothari (1985) e Murakami (1993), observou-se que esse tipo de escoamento é caracterizado por apresentar estruturas turbulentas com forte tridimensionalidade, instabilidade e anisotropia produzidas pela tensão de cisalhamento da interação do fluido com o obstáculo.

Conforme mostra a Figura 3.2, o escoamento ao redor de um obstáculo é constituído por algumas estruturas típicas: a região de vento incidente, a região de estagnação, as zonas de fluxo reverso, o chamado vórtice de ferradura, as zonas de separação e de recolamento, a região de recirculação e a esteira turbulenta.

Figura 3.2 – Representação esquemática do campo de escoamento ao redor de um obstáculo. Vista do plano central.

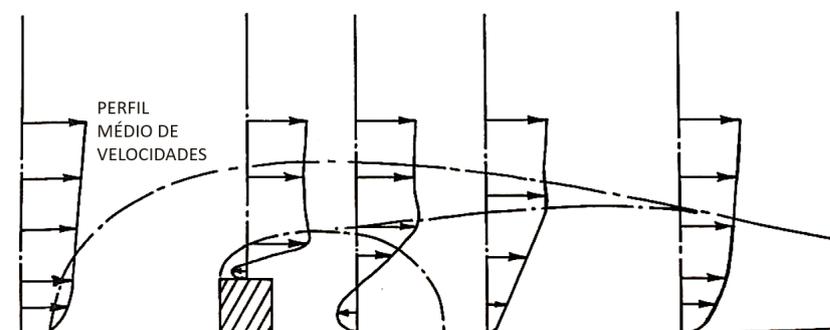


Fonte: Adaptado de Murakami (1993)

O vento incidente provoca a formação de uma alta pressão na face frontal do obstáculo. Na região onde a pressão é máxima, a velocidade do escoamento é nula, constituindo, assim, a zona de estagnação. Da zona de estagnação para baixo, o fluido escoava em direção ao solo e retorna na direção oposta ao vento incidente, criando um fluxo reverso. Pela interação entre o vento incidente e o fluxo reverso há a geração de um movimento lateral. Esse movimento propaga um vórtice em torno do obstáculo, que tem a forma semelhante a uma ferradura (vórtice da ferradura) (SANTOS, 2000).

O vento incidente é lateralmente acelerado quando colide com o obstáculo, levando o escoamento para longe do obstáculo, ao invés de permitir que ele o contorne suavemente. Dessa forma, há a separação da camada limite nas arestas da parede frontal. A separação da camada limite persiste até o seu recolamento, que depende da velocidade do escoamento e da relação entre a altura e o comprimento do obstáculo. Essa região, chamada de região de recirculação, é caracterizada por intenso movimento circulatório, baixa velocidade, baixa pressão e alta intensidade de turbulência. A jusante da zona de recolamento, o escoamento ainda é perturbado pelo obstáculo, produzindo uma região de esteira. Nessa região, os níveis de turbulência ainda são mais altos do que no escoamento não perturbado e a velocidade na direção principal é menor que do escoamento não perturbado (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Representação do perfil de velocidades perturbado na esteira.



Fonte: Adaptado de Arya (1999)

3.3 ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA

Devido a importância para as atividades de segurança em lançamento de foguetes, a questão do escoamento atmosférico tem sido bastante estudado pelo grupo de Turbulência e Dispersão Atmosférica do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IEA) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA). A seguir, faz-se uma síntese dos principais resultados já obtidos pelo grupo.

Roballo e Fisch (2008) investigaram o comportamento do escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara por meio de medições realizadas na torre anemométrica local. A torre anemométrica (TA) possui 70 metros de altura e seis níveis de medição: 6,0, 10,0, 16,3, 28,5, 43,0 e 70,0 metros. Ela está localizada numa distância de, aproximadamente, 200 metros da falésia, próxima do setor de preparação e lançamento. Os dados de vento foram coletados em dois períodos: 1995 a 1999 e 2004 a 2005, a partir de sensores de direção e velocidade do vento instalados nos seis níveis verticais da TA.

Os resultados apontaram que a direção predominante do vento esteve no intervalo entre $22,6^\circ$ e $67,5^\circ$ (NE). Os perfis de velocidade apresentaram um comportamento sazonal e dependente das

condições do tempo (seco ou chuvoso). Apesar disso, verificou-se que, no geral, a estrutura do vento é similar para as diferentes épocas do ano. Considerando o perfil de velocidade logarítmico¹, a velocidade de atrito (u^*) variou de $0,32 \pm 0,13$ m/s (período chuvoso) à $0,46 \pm 0,14$ m/s (período seco), enquanto que o comprimento de rugosidade superficial (z_0) obteve os valores de $0,19 \pm 0,32$ m (período chuvoso) e $0,06 \pm 0,05$ m (período seco). Considerando a lei de potência da velocidade², o expoente (γ) variou de 0,19 a 0,27 ao longo dos meses do ano, sendo maior no período chuvoso e menor na época seca. Observou-se também que, no período seco, as velocidades intensas do vento misturam bem a camada limite superficial, não havendo variação vertical da estabilidade atmosférica e prevalecendo a neutralidade na região.

Roballo, Fisch e Girardi (2009) estudaram o escoamento atmosférico no CLA por meio de ensaios em túnel de vento, considerando a presença da falésia da região. Para simular a camada limite planetária no túnel de vento foram inseridas *spires* na entrada da seção de testes, além de elementos de rugosidade. A falésia foi representada utilizando um aparato em forma de um degrau com diferentes inclinações (70 e 90°). Além disso, em alguns casos considerou-se a presença da vegetação à jusante da falésia por meio da inserção de elementos de rugosidade.

As medições foram realizadas utilizando um anemômetro de fio quente e foram comparadas com as medições em campo de Roballo e Fisch (2008). Os valores de γ que mais se aproximaram dos medidos foram a partir da falésia com inclinação de 90° e sem a representação da vegetação. Os elementos inseridos no túnel representaram uma rugosidade maior do que a observada sobre a superfície do CLA. Verificou-se também que o número de Reynolds obtido nos experimentos (na ordem de 10^4) é menor do que o calculado a partir das medições na torre anemométrica do local (na ordem de 10^7). Dessa forma, foi constatada a necessidade de se utilizar um túnel de vento que permita a obtenção de números de Reynolds mais altos. No entanto, nos experimentos puderam ser observadas características típicas do escoamento após o degrau: separação da camada limite, formação de zona de recirculação e recolamento.

Dando continuidade ao trabalho de Roballo, Fisch e Girardi (2009), Pires et al. (2010) realizaram experimentos de túnel de vento utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas (do inglês *Particle Image Velocimetry - PIV*). Também foram realizadas medições de velocidade com anemômetro de fio quente. Foi desenvolvido um modelo simplificado, em escala 1:1000, considerando a falésia, representada por um degrau de 90°. Na sequência foi adicionado um prédio, representando a TMI de 50 metros.

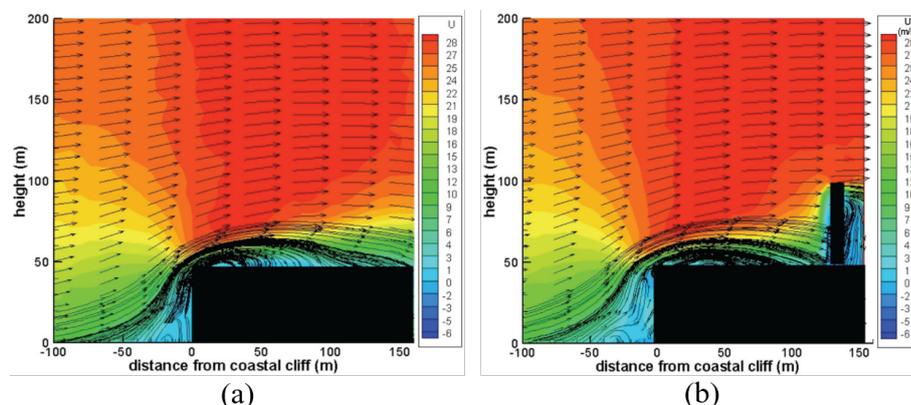
As imagens do campo de escoamento obtido por Pires et al. (2010) podem ser vistas na Figura 3.4. Observou-se que o escoamento é modificado ao passar pela falésia, formando uma região de recirculação (Figura 3.4a). A presença da TMI também alterou o escoamento, criando uma zona

¹ O perfil de velocidade logarítmico é dado por: $u(z) = \left(\frac{u^*}{\kappa_*}\right) \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$; onde u^* é a velocidade de atrito (m/s), d é o deslocamento do perfil (m) e z_0 é o comprimento de rugosidade superficial (m).

² A lei de potência é dada por $\frac{u(z_r)}{u(z)} = \left(\frac{z_r}{z}\right)^\gamma$; onde z_r é altura de referência (m) e γ é o expoente adimensional que depende da rugosidade superficial e da estabilidade atmosférica (ARYA, 1999).

de separação e vórtices à jusante do obstáculo (Figura 3.4b).

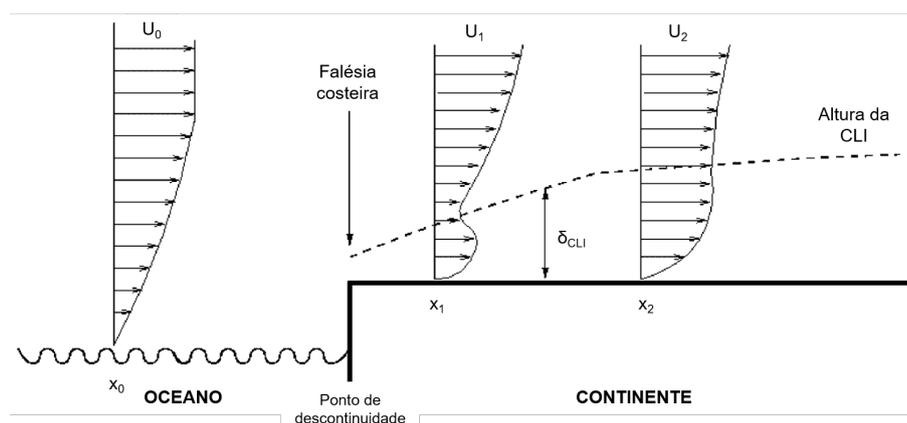
Figura 3.4 – Resultados dos experimentos de túnel de vento de Pires et al. (2010).



Fonte: Pires et al. (2010)

Pires et al. (2011) apresentaram um modelo numérico para estudar a camada limite interna (CLI), conhecida também como camada superficial, em escoamentos sobre falésias costeiras de diferentes alturas e formas geométricas (Figura 3.5). Foi utilizado um código DNS (do inglês *Direct Numerical Simulation*) bidimensional para a solução das equações de conservação (escritas usando a formulação velocidade-vorticidade), adaptado para a geometria da falésia (degrau). Além disso, foram consideradas variações na velocidade do vento incidente com número de Reynolds na ordem de 10^5 a 10^7 .

Figura 3.5 – Esquema do desenvolvimento da camada limite interna (CLI) sobre a falésia costeira.



Fonte: Adaptado de Pires et al. (2011)

Os resultados mostraram que a altura da CLI é influenciada pela velocidade de entrada e pela configuração da falésia. Para uma falésia de 90° , o aumento na velocidade incidente provoca a redução na altura da CLI, mas aumenta a intensidade da vorticidade ao seu redor. Para falésias de mesma altura e inclinações diferentes, a vorticidade máxima não é alterada, mas com o aumento do ângulo de inclinação, a altura da CLI sofre pequena redução. Para uma falésia de 90° e

velocidade de entrada constante, quanto maior a altura da falésia maior é a altura da CLI e a intensidade da vorticidade máxima.

Pires et al. (2009) apresentaram uma síntese dos ensaios de túnel de vento e das simulações numéricas realizadas até então considerando o Centro de Lançamento de Alcântara. Os trabalhos mostraram que o perfil de vento é modificado ao passar pela falésia. À jusante da falésia há uma diminuição da velocidade, associada aos altos valores de flutuação, principalmente próximo à superfície. A intensidade de turbulência é maior próximo ao solo e nas proximidades da falésia. Verificou-se ainda que a estrutura geométrica da falésia afeta a altura da camada limite interna que alcança a TMI. Uma forte zona de recirculação é formada à jusante da falésia e uma vorticidade negativa foi observada acima da falésia e da TMI.

Magnago, Fisch e Moraes (2010) analisaram a estrutura turbulenta do escoamento no CLA a partir de medições de um anemômetro sônico, instalado no local em agosto de 1999 (período seco do ano). Os valores medidos para a componente u do vento foram bem maiores do que para as demais componentes (v e w). Isso se deve à forte intensidade e persistência dos ventos horizontais na região. Também devido aos fortes ventos, há uma mistura turbulenta local e a geração de turbulência se dá basicamente de forma mecânica. Os resultados indicam que o CLA possui características de neutralidade durante todo o dia, não havendo um ciclo diurno característico da estabilidade atmosférica na região.

As condições de neutralidade do CLA também foram observadas por Ramos, Fernandez e Fisch (2018). A partir de dados de radiossondagem obtidos no período de 1 a 25 de março de 2010, os autores concluíram que a camada limite planetária (CPL) sobre o CLA tem um gradiente vertical de temperatura próximo à neutralidade, principalmente em dias secos. Nesses dias, a CLP apresenta ventos intensos até uma altura de 500 metros.

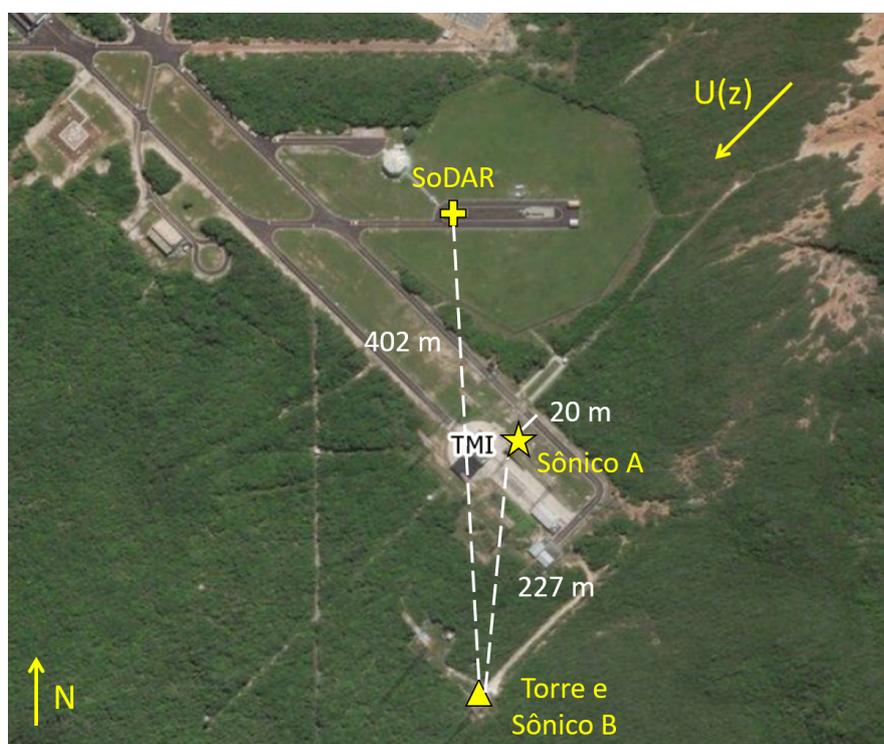
Gisler, Fisch e Correa (2011) realizaram análises estatísticas dos valores de intensidade e direção do vento medidos no CLA, no período de 1995 a 1999. Os autores consideraram dois meses do ano: março (estação seca) e setembro (estação chuvosa). Foram utilizadas as medições em 6 níveis da torre anemométrica. Os resultados apontaram que a direção predominante do vento é nordeste (NE), com 40% de frequência de ocorrência no período seco e 33% no período chuvoso. Os valores de intensidade do vento se mostraram dependentes da altura, com média de 6,4 m/s para o período seco e 4,1 m/s para o período chuvoso. Quanto às análises estatísticas, os dados se ajustaram bem às distribuições normal e de Weibull para as velocidades entre 3,0 e 8,0 m/s (período chuvoso) e entre 3,0 e 9,0 m/s (período seco). Ambas as distribuições falharam em representar as velocidades do vento superiores à 10,0 m/s.

Marcioito, Fisch e Medeiros (2012) apresentaram dados de vento (direção e velocidade) e de turbulência obtidos durante a campanha experimental Murici II. Os experimentos foram realizados no período de 17 a 25 de setembro de 2008 (estação seca). Um dos principais objetivos do trabalho foi ampliar a compreensão dos processos que governam o regime de vento da região. Para isso, foram coletados dados de 10 anemômetros instalados na região numa altura de 10

metros. Foi calculada a intensidade da turbulência assim como outros parâmetros. No geral, os parâmetros calculados apresentaram ciclos diurnos fortemente marcados, com exceção de 4 dias, o que pode ser justificado devido à ação de sistemas sinóticos na região nesses dias. Os resultados apontaram que a direção do vento predominante é leste-nordeste, com direção média de 40° , de acordo com o regime de ventos alísios. As magnitudes média, mínima e máxima do vento foram de 6,0, 3,0 e 9,0 m/s, respectivamente. A intensidade de turbulência foi associada principalmente ao cisalhamento do vento e seu valor esteve entre 13% e 27%.

Medeiros et al. (2013) também analisaram dados da campanha Murici II, realizada em setembro de 2008. Foram obtidos dados de dois anemômetros sônicos (A e B) instalados em um local aberto (sônico A) e em um local com vegetação ao redor (sônico B, localizado junto à torre anemométrica). Além de dados da torre anemométrica e de um Sodar (também localizado em uma região aberta). A localização dos sensores está apresentada na Figura 3.6. Os autores verificaram que a turbulência não é horizontalmente homogênea na região do Centro de Lançamento de Alcântara. Além disso, observou-se ciclos diários diferentes para o vento e para os parâmetros de turbulência (energia cinética turbulenta (ECT), velocidade de fricção (u^*) e empuxo). Os resultados mostraram direção uniforme na altura da torre e horizontalmente em toda a extensão do experimento. Os ventos predominantes foram do setor norte-nordeste-leste (NNE), com 70% do tempo com ventos vindo de nordeste, o que se assemelha ao obtido por Gisler, Fisch e Correa (2011) e Roballo e Fisch (2008).

Figura 3.6 – Localização dos sensores utilizados nas medições de Medeiros et al. (2013).



Fonte: Adaptado de Medeiros et al. (2013)

A velocidade média do vento foi mais forte no anemômetro sônico B do que no sônico A, mas a velocidade de fricção e a energia cinética turbulenta foram mais fracas. O termo de produção de cisalhamento e o termo de produção/destruição de empuxo foram menores no sônico B do que no sônico A. Em ambos os anemômetros a velocidade do vento, a ECT e o empuxo se aproximam mais à noite, quando a camada é fracamente estável. O regime de escoamento observado no sônico B é menos neutro do que no sônico A. Segundo os autores, mudança na rugosidade superficial, mudanças no aquecimento da superfície e uma lacuna na vegetação natural podem ser as causas da variação dos parâmetros de turbulência. Por fim, analisando-se os dados da torre anemométrica e do sodar, concluiu-se que quanto menor a altura menos homogêneo espacialmente é o vento.

Souza, Fisch e Goulart (2015) investigaram o comportamento do escoamento atmosférico no CLA a partir de simulações numéricas, utilizando a técnica de dinâmica dos fluidos computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics - CFD*). A geometria foi desenvolvida com a presença da falésia de 40 metros e da TMI, em uma escala geométrica de 1:1000. O modelo de turbulência adotado foi o $\kappa - \omega$ SST, baseado em códigos RANS. Os resultados apresentaram boa concordância com os dados de radiossondagem e apontaram a separação do escoamento incidindo na falésia e na TMI, além da formação de estruturas de vórtices à jusante dos obstáculos. A zona de recirculação após a falésia se estendeu até a TMI.

Wittwer et al. (2016) estudaram o escoamento atmosférico no CLA por meio de ensaios de túnel de vento, considerando um modelo topográfico do CLA (Figura 3.7). Diferentes direções do vento incidente foram simuladas: 60, 90 e 120°. Além disso, a fim de comparação, os autores desenvolveram um modelo simplificado considerando uma falésia de 40 metros, representada por um degrau. Perfis de velocidade foram medidos em diferentes pontos ao longo do plano longitudinal central dos modelos.

Considerando o modelo topográfico os resultados mostraram que os perfis de velocidade não variam consideravelmente longitudinalmente. A localização do ponto de máxima velocidade foi a mesma para as três direções simuladas, mas seu módulo e sua localização na altura variaram. Para a configuração da falésia como um degrau, a evolução longitudinal dos perfis apresentou mudanças significativas, o que se deve à descontinuidade causada pela topografia (falésia). Os autores concluíram que simplificações podem conduzir a resultados que não refletem a situação real. Ainda reforçam a importância de se utilizar modelos topográficos que reproduzam melhor o local de estudo.

Couto e Fisch (2018) estudaram as características do escoamento na região do CLA a partir de dados observacionais, avaliando as diferenças espaciais nas características do vento médio e de seu ciclo diário. Para isso, utilizaram os dados de duas torres anemométricas (com 60 metros de distância entre elas) instaladas no local, de 72 e 100 metros de altura, respectivamente, distantes 600 metros do litoral. Além disso, os autores avaliaram dados de reanálise meteorológica para a região.

Figura 3.7 – Modelo topográfico do CLA construído para os ensaios de túnel de vento de Wittwer et al. (2016) e Wittwer et al. (2018).



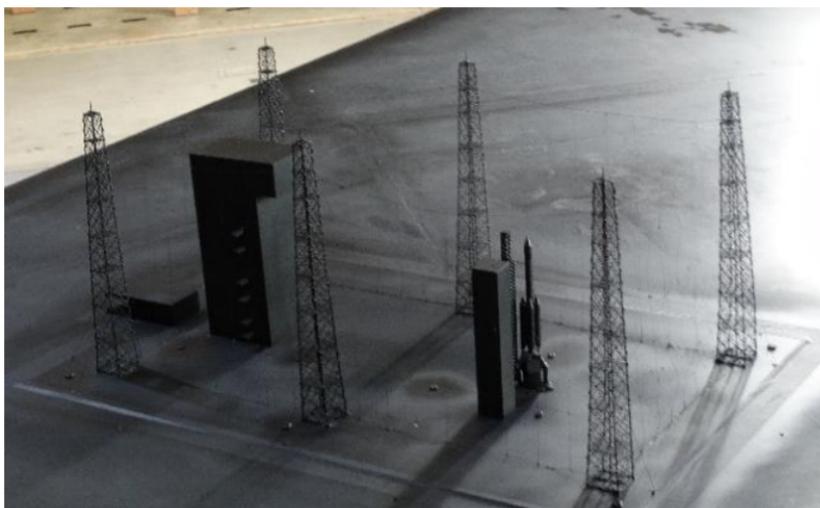
Fonte: Wittwer et al. (2018)

De forma geral, observou-se um padrão diário dos ventos de nordeste a leste-nordeste, assim como apontado nos trabalhos anteriores. Os dados de reanálise apresentaram um ciclo similar, mas com a direção deslocada em certos horários e com ventos menos intensos. Os resultados mostraram que as torres anemométricas possuem, na média, características próximas, indicando uma homogeneidade horizontal do vento no CLA. Porém, quando abrangendo-se uma área maior, como no caso de Medeiros et al. (2013), essa homogeneidade não é mais encontrada.

Faria, Avelar e Fisch (2019) realizaram uma investigação experimental do escoamento atmosférico no CLA. Os ensaios foram conduzidos em túnel de vento por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas e de um anemômetro de fio quente. Os autores desenvolveram um modelo em escala reduzida (1:120) representando a geometria do local (Figura 3.8). Foram testadas diferentes intensidades e ângulos de incidência do vento, além de diferentes inclinações da falésia costeira. Considerou-se uma atmosfera neutra, com perfil de velocidades de entrada definido pela lei de potência, com expoente γ de 0,11.

Os resultados apontaram uma intensidade de turbulência menor que a encontrada nos experimentos de campo de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012), com valores mais altos próximo ao chão, decrescendo com a altura. A partir da técnica PIV verificou-se a formação de vórtices e uma desaceleração do escoamento atrás da TMI e da torre de escape na maioria dos casos estudados. Houve uma variação na quantidade de vórtices de acordo com a incidência do vento e com a inclinação da falésia. Concluiu-se, portanto, que o padrão dos vórtices atrás das estruturas da TMI e da torre de escape é fortemente influenciado pelo ângulo de incidência do vento.

Figura 3.8 – Modelo do CLA utilizado nos ensaios de túnel de vento por Faria, Avelar e Fisch (2019)

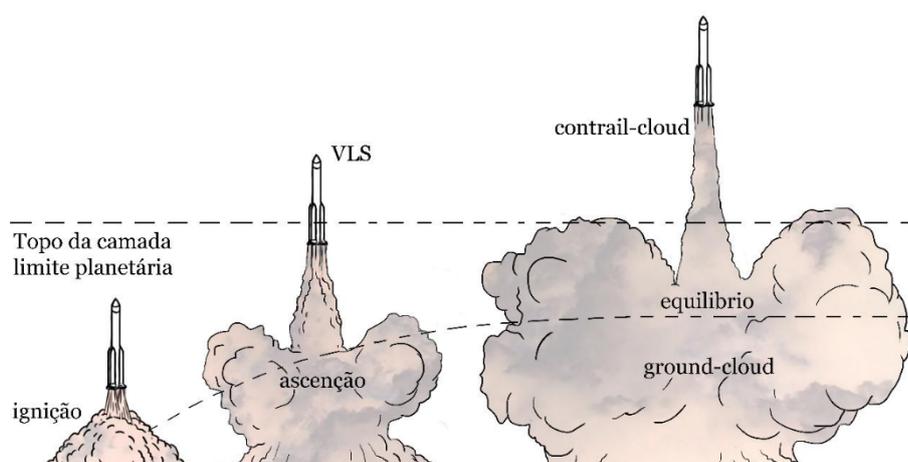


Fonte: Faria, Avelar e Fisch (2019)

3.4 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA

A dispersão de poluentes emitidos no lançamento de veículos espaciais no Centro de Lançamento de Alcântara foi estudada por alguns autores utilizando modelos de mesoescala. Moreira et al. (2011) desenvolveram um modelo operacional (Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes - MSDEF) para simular as nuvens de exaustão de foguetes (Figura 3.9). O MSDEF promove a descrição da evolução temporal do campo de concentração de emissões contínuas, de curto prazo ou instantâneas. Dessa forma, pode-se simular emissões de lançamentos normais e abortados (testes ou explosões). Alguns fenômenos são considerados no modelo: velocidade de deposição, reações químicas de primeira ordem, deposição seca e úmida, além do efeito do aumento da pluma. O modelo permite incluir também a topografia da região.

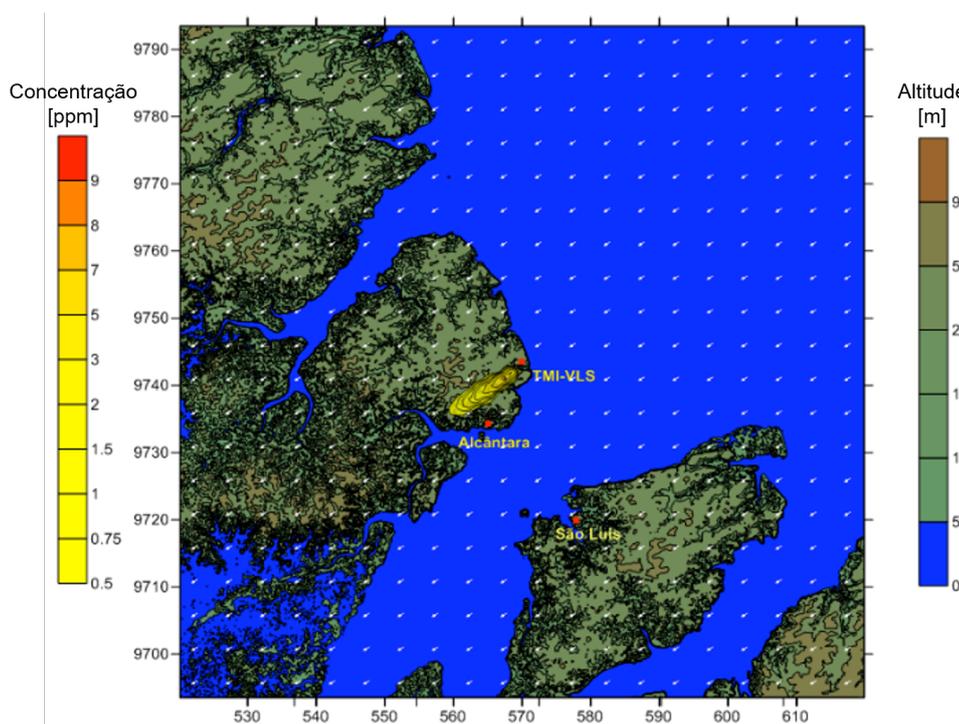
Figura 3.9 – Esquema de formação da nuvem de exaustão de um foguete



Fonte: Schuch (2017)

Os autores realizaram um estudo de caso considerando a região do CLA. A Figura 3.10 mostra a pluma formada na simulação, que considerou a topografia e os ventos predominantes do local.

Figura 3.10 – Resultado da simulação da nuvem de exaustão de um VLS lançado no CLA. A figura apresentada a topografia da região em um grid de 100 x 100 km, com resolução de 100 m, e os vetores velocidade.



Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2011)

Nascimento, Souza e Moreira (2019) também utilizaram o modelo MSDEF para simular a dispersão e o impacto de uma nuvem de exaustão de cloreto de hidrogênio (HCl), formada durante um lançamento de foguete abortado. Considerou-se uma hipotética interrupção ou explosão de um lançamento de um Veículo Lançador de Satélite (VLS) no Centro de Lançamento de Alcântara. Em seguida, os resultados de curto alcance do MSDEF foram inserido no sistema de modelagem CMAQ (do inglês *Community Multiscale Air Quality*) para simular o transporte do poluente a longo alcance. Os resultados apontaram que, quando a atmosfera se encontra em condições estáveis, as concentrações de HCl próximas ao solo no CLA podem atingir níveis extremamente perigosos para a saúde humana.

Nascimento et al. (2014) utilizaram o sistema de modelagem CMAQ para simular a dispersão e as reações fotoquímicas dos poluentes CO (monóxido de carbono), HCl (cloro de hidrogênio) e Al_2O_3 (alumina) provenientes de um lançamento normal de foguete no CLA. As simulações foram capazes de representar a *ground* e a *contrail cloud* (Figura 3.9). Assim como em Nascimento, Souza e Moreira (2019), os resultados mostraram altas concentrações de HCl, apontando a importância de se estudar o impacto de lançamento de foguetes no meio ambiente e na saúde humana.

Iriart e Fisch (2016) utilizaram o modelo WRF (do inglês *Weather Research and Forecasting*) acoplado ao seu módulo químico (Chem) para simular a dispersão de CO emitido por um VLS lançado a partir do CLA. Diferentes condições meteorológicas foram consideradas. Assumiu-se emissões apenas no nível da superfície. Com os resultados foi possível identificar as regiões afetadas pela emissão do poluente, bem como a sua trajetória em função dos ventos. Além disso, foi possível verificar em quanto tempo ocorre a dissipação de CO na região do CLA. Como esperado, as localidades mais próximas do SPL foram as que apresentaram as maiores concentrações de CO, superando os limites suportáveis desse poluente para os seres humanos. Os autores recomendaram que as pessoas próximas ao SPL fiquem abrigadas durante os 10 minutos seguintes do lançamento. A dissipação total da nuvem de exaustão variou entre 30 e 90 minutos e foi mais rápida para o caso diurno, considerando o período seco. Isso pode ser justificado pela maior intensidade turbulenta e ventos mais intensos nessa situação. Os autores concluíram que o vento é o elemento meteorológico que mais influencia a dispersão da pluma, sendo que sua direção determina se as localidades fora do CLA (como a vila de Alcântara) serão ou não atingidas por ela.

Schuch e Fisch (2017) avançaram no trabalho de Iriart e Fisch (2016) apresentando uma nova abordagem para representar os efluentes de exaustão de foguetes no modelo de dispersão atmosférica WRF-Chem. Foram incluídas a trajetória e as taxas variáveis de queima de um VLS ao longo de sua trajetória. Além de considerar diferentes condições meteorológicas. Os resultados mostram que as concentrações de HCl são perigosas na primeira hora após o lançamento no SPL e no Centro Técnico de Meteorologia (à cerca de 4,5 km do SPL). Assim como observado por Iriart e Fisch (2016), os níveis de CO são críticos nos primeiros 10 minutos após o lançamento, representando um alto risco principalmente nas áreas próximas ao SPL. As concentrações dos demais poluentes (CO₂ e partículas) apresentaram níveis mais seguros. 40 minutos após o lançamento, a nuvem de exaustão foi dissipada e saiu totalmente do domínio de estudo.

Uma abordagem diferente foi dada por Wittwer et al. (2018) aos estudos de dispersão de poluentes no CLA. Por meio de experimentos em túnel de vento e utilizando um modelo detalhado da topografia do CLA (descrito e desenvolvido por Wittwer et al. (2016)), foi simulada a dispersão de um gás (hélio) emitido no local de lançamento do VLS. Apesar desse gás não compor a nuvem de exaustão de um foguete do CLA, o experimento possibilitou um entendimento inicial da dispersão de poluentes em microescala na região. Foram consideradas duas situações: emissão vertical de baixo para cima (simulando a emissão no lançamento do foguete) e emissão de cima para baixo (simulando a emissão causada pelo foguete ao longo de sua trajetória). Os perfis de concentração média indicaram que a emissão ao nível do solo proporciona uma diluição maior do poluente, já que a difusão turbulenta pode ser desenvolvida de baixo para cima e lateralmente nesse caso. Os maiores valores de concentração máxima foram obtidos para direção do vento de entrada de 90°. Isso justifica-se já que maiores níveis de turbulência atmosférica foram identificados para direção do vento de 120°, o que provoca uma mistura rápida do poluente e sua maior dispersão.

3.5 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da literatura revisada percebeu-se que muitos foram os trabalhos realizados com o objetivo de estudar o escoamento atmosférico e a dispersão de poluentes no Centro de Lançamento de Alcântara. Observações em campo (ROBALLO; FISCH, 2008; MAGNAGO; FISCH; MORAES, 2010; GISLER; FISCH; CORREA, 2011; MARCIOTTO; FISCH; MEDEIROS, 2012; MEDEIROS et al., 2013; COUTO; FISCH, 2018) e ensaios de túnel de vento (ROBALLO; FISCH; GIRARDI, 2009; PIRES et al., 2009; PIRES et al., 2010; FARIA; AVELAR; FISCH, 2019) foram as principais abordagens utilizadas nos trabalhos envolvendo o escoamento atmosférico da região. Poucos foram os estudos desenvolvidos por meio de simulações numéricas ((PIRES et al., 2011; SOUZA; FISCH; GOULART, 2015)). Simplificações na representação da meteorologia e do relevo local foram necessárias.

No caso da dispersão de poluentes emitidos no lançamento de foguetes, os trabalhos foram conduzidos principalmente por meio de modelos de mesoescala como o WRF-Chem (IRIART; FISCH, 2016; SCHUCH; FISCH, 2017) e o CMAQ (NASCIMENTO; SOUZA; MOREIRA, 2019). No entanto, Wittwer et al. (2018) consideraram uma alta resolução, utilizando uma maquete topográfica em ensaios de túnel de vento a fim de estudar o escoamento e a dispersão atmosférica no CLA.

Duas lacunas foram então identificadas, constituindo a base para a realização do presente trabalho: a necessidade de se estudar numericamente o escoamento atmosférico no CLA, incluindo o detalhamento da topografia e das condições meteorológicas da região, e de analisar a dispersão de poluentes no CLA em alta resolução espacial.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a avaliação do escoamento e da dispersão atmosférica no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). O capítulo está dividido em quatro seções. A primeira seção refere-se à descrição dos três casos simulados, que diferem-se de acordo com a representação topográfica do CLA. As seções seguintes expõem a modelagem matemática e os métodos numéricos utilizados nas simulações. Por fim, o trabalho de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012) é apresentado a fim de apontar como foi realizada a validação das simulações do escoamento atmosférico no CLA.

4.1 CASOS SIMULADOS

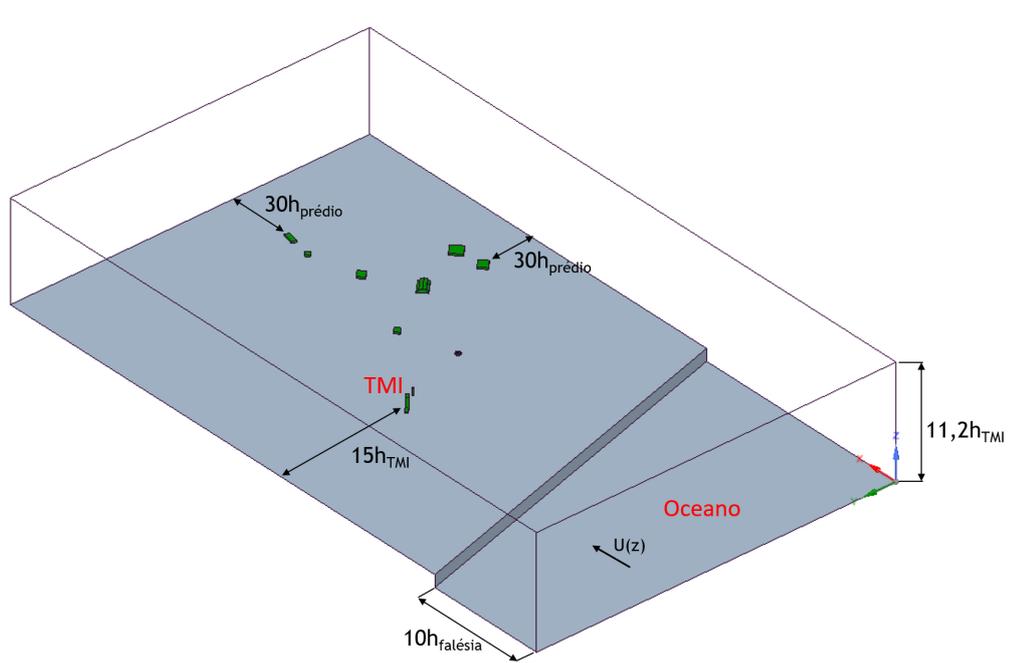
As simulações numéricas foram conduzidas a partir de três diferentes representações do CLA, denominadas de casos 1, 2 e 3. As geometrias foram elaboradas de acordo com o detalhamento da topografia do domínio apresentado na Figura 4.1. Dado que muitos trabalhos consideraram uma representação simplificada do CLA (ROBALLO; FISCH; GIRARDI, 2009; PIRES et al., 2011; SOUZA; FISCH; GOULART, 2015; FARIA; AVELAR; FISCH, 2019), a primeira geometria (caso 1) assumiu uma topografia plana com superfície lisa e a presença da falésia costeira de 40 metros, representada por um degrau de 90° (Figura 4.2).

Figura 4.1 – Identificação do domínio de estudo. L e W são, respectivamente, o comprimento e a largura do domínio.



Fonte: Produzido pela autora (2020).

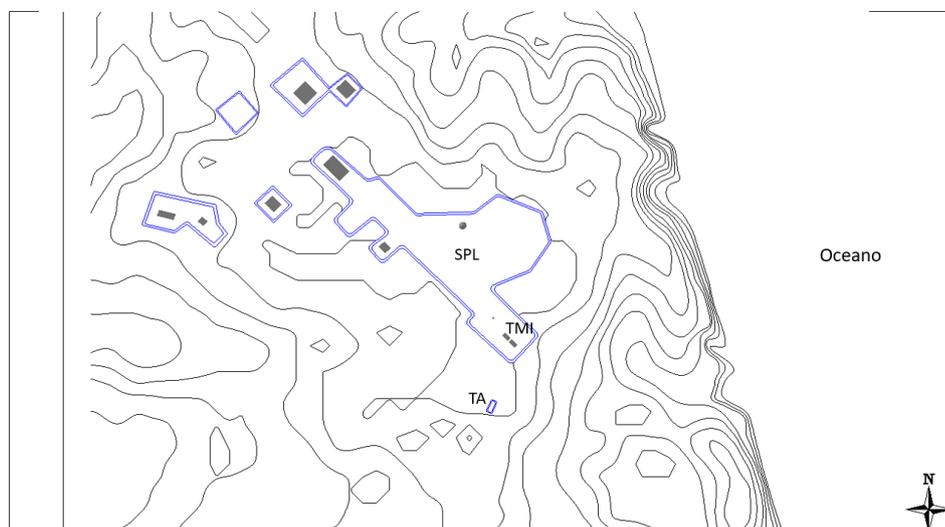
Figura 4.2 – Geometria simplificada utilizada no caso 1.



Fonte: Produzido pela autora (2020).

As demais configurações (casos 2 e 3), consideraram uma geometria mais complexa, com a presença da topografia da região. A superfície topográfica foi construída a partir de dados do modelo digital de superfície da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (do inglês *Japan Aerospace Exploration Agency's - JAXA*) capturados pelo Satélite Avançado de Observações Terrestres (do inglês *Advanced Land Observing Satellite - ALOS*), com uma resolução de, aproximadamente, 30 metros (JAXA, 2019).

Figura 4.3 – Curvas de nível obtidas a partir dos dados da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA)

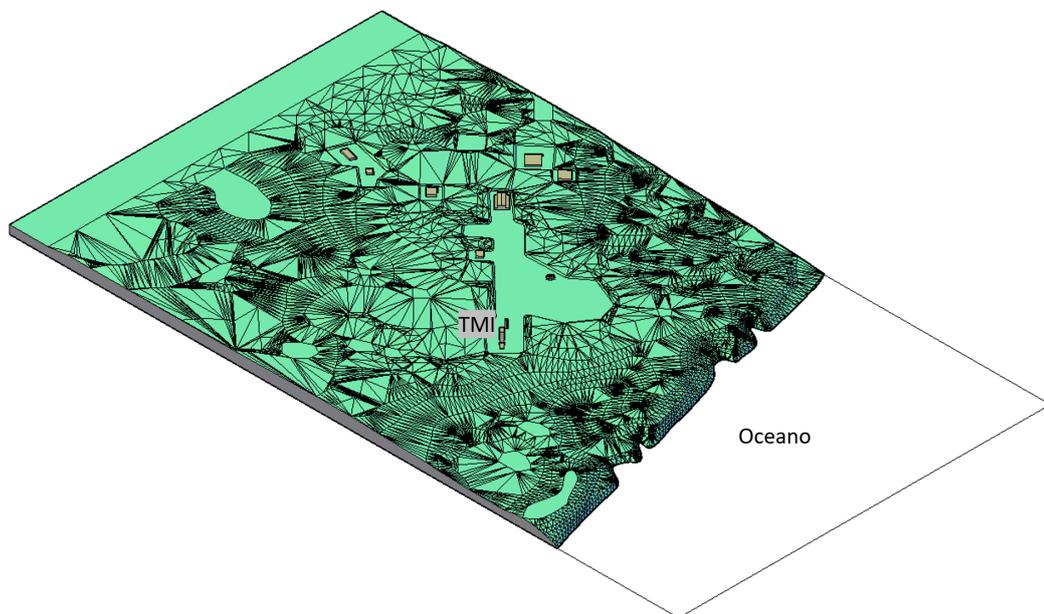


Fonte: Produzido pela autora (2020).

Utilizando o programa QGis 3.0 e a partir do modelo digital de superfície foram obtidas as curvas de nível para a região de estudo (Figura 4.3). A transição oceano-continente é composta por uma encosta de cerca de 40 metros, muito heterogênea, que em alguns pontos assemelha-se a uma falésia. Devido à sua baixa resolução, os dados não são suficientes para representar bem a inclinação da falésia, razão pela qual foi realizada uma modificação nas curvas de nível próximas à costa litorânea com o objetivo de melhor representar a mudança abrupta de topografia.

A partir das curvas de nível modificadas, a superfície foi elaborada por meio do programa *Autodesk Civil 3D*. O método utilizado foi o *triangulated irregular network - TIN* e, por esse motivo, a superfície é constituída de elementos triangulares. A Figura 4.4 apresenta a superfície criada para o caso 3.

Figura 4.4 – Superfície elaborada para o caso 3, formada por elementos triangulares.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

A distinção entre os casos 2 e 3 está em que apenas o terceiro caso considera a vegetação do CLA. Segundo IBGE (2019), a região do CLA é coberta por vegetação de restinga arbustiva na parte costeira, além de vegetação secundária de floresta ombrófila aberta (faciações da floresta ombrófila densa) na região mais adentro do continente. Fisch (1999) e Medeiros et al. (2013) referem-se à uma vegetação densa com cerca de 3 metros de altura na região do CLA.

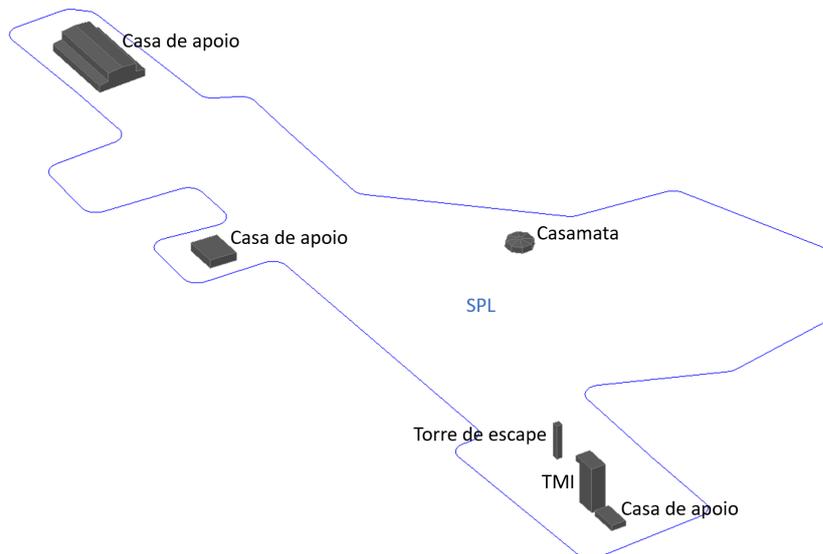
A vegetação foi então representada a partir de uma elevação de 3 metros em relação à superfície onde está presente. Essa abordagem foi adotada devido ao fato da vegetação ser muito densa (Figura 4.5), comportando-se como uma barreira sólida para o escoamento. Além disso, devido ao tratamento de parede implementado no programa utilizado nas simulações numéricas, representar a vegetação apenas como uma rugosidade superficial exigiria o uso de volumes de controle muito altos, o que impossibilitaria a utilização de uma malha de alta resolução. Isso será abordado novamente na Seção 4.2.3.

Figura 4.5 – Fotos da vegetação do CLA



Em todas as geometrias foram incluídos os principais prédios identificados no domínio de estudo. Os prédios do setor de preparação e lançamento (SPL) estão apresentados na Figura 4.6.

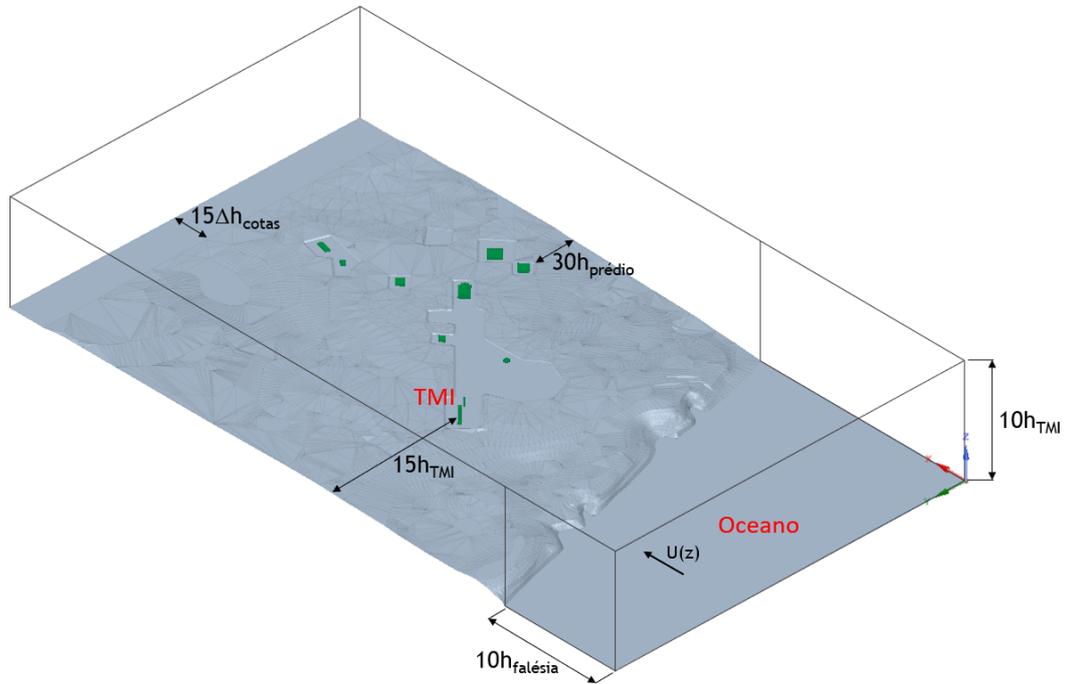
Figura 4.6 – Prédios do setor de preparação e lançamento (SPL) considerados no domínio computacional



Fonte: Produzido pela autora (2020)

A geometria do caso 3 está apresentada na Figura 4.7. As mesmas dimensões foram usadas na elaboração do caso 2, porém, sem o acréscimo de 3 metros na superfície nos locais onde há vegetação.

Figura 4.7 – Geometria utilizada no caso 3, composta pela topografia, os prédios do CLA e a elevação da superfície representando a vegetação. A geometria 1 possui as mesmas dimensões apresentadas.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

4.2.1 Equações governantes

O escoamento e a dispersão de poluentes na atmosfera é governado pelas equações de conservação de massa (ou da continuidade), de conservação da quantidade de movimento (equação de Navier-Stokes) e de conservação de massa da espécie química, apresentadas em sua forma completa nas equações 4.1 a 4.6, considerando fluidos newtonianos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.2)$$

Sendo

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}; \quad (4.3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.4)$$

e

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (4.5)$$

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_j c}{\partial x_j} = \rho D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x_j^2} + S \quad (4.6)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), t é o tempo (s), u_i é a componente da velocidade na direção i (m/s), x_i é a componente i do vetor posição (m), μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($\text{N/m}^2 \cdot \text{s}$), p é a pressão termodinâmica (N/m^2), δ_{ij} é o operador delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$, se $i = j$ e $\delta_{ij} = 0$, se $i \neq j$), τ_{ij} é tensor das tensões (N/m^2) e S_{ij} é o tensor taxa de deformação (s^{-1}), c é a concentração do contaminante (massa/massa), D_m é a difusividade molecular do contaminante no fluido (m^2/s) e S representa o termo fonte ($\text{kg/s} \cdot \text{m}^3$).

As equações de conservação são válidas para a solução de escoamentos laminares e turbulentos, porém, devido a presença de termos não lineares na Equação 4.2 ($\partial(u_i u_j)/\partial x_i$) sua solução por métodos analíticos requer o uso de malhas muito refinadas e intervalos de tempo muito pequenos. Dessa forma, soluções numéricas são utilizadas para resolver uma variedade de escoamentos turbulentos. Essas soluções são obtidas por meio de modelos de turbulência que resolvam o escoamento de acordo com o nível de detalhamento exigido para o problema.

4.2.2 Tratamento da turbulência

Existem distintas abordagens para a resolução das equações de conservação para escoamentos turbulentos que permitem capturar os efeitos importantes em consequência da turbulência. Os modelos podem ser agrupados em três categorias: Simulação Numérica Direta (do inglês *Direct Numerical Simulation - DNS*), Simulação de Grandes Escalas (do inglês *Large Eddy Simulation - LES*) e Modelos baseados nas equações médias de Navier Stokes (do inglês *Reynolds-averaged Navier–Stokes - RANS*).

As simulações DNS buscam a solução direta das equações instantâneas de Navier-Stokes (Equação 4.2) em uma malha tridimensional sobre o domínio do escoamento de interesse. Calculam, assim, o escoamento instantâneo. Esses cálculos são altamente caros em termos de recursos de computação, por isso, essa abordagem é normalmente aplicada a domínios simplificados e a escoamentos com baixos números de Reynolds (ARYA, 1999).

Os modelos LES, por sua vez, concentram-se no comportamento dos vórtices maiores (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Dessa forma, apenas as grandes escalas são simuladas diretamente. As pequenas escalas não são simuladas, porém a contribuição dos vórtices menores para a dissipação de energia e para os processos de transporte turbulento são usualmente parametrizados por meio de modelos de submalha. A demanda de recursos computacionais para os modelos LES é alta, porém, menor se comparada aos modelos DNS (ARYA, 1999).

Os modelos RANS, utilizados neste trabalho, têm interesse no escoamento médio e nos efeitos da turbulência nas propriedades médias do escoamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A modelagem é feita para todas as escalas de turbulência a partir da aplicação da média de Reynolds nas equações de Navier-Stokes. Dentre os modelos clássicos de turbulência estão o $k - \varepsilon$ e o modelo das Tensões de Reynolds (do inglês *Reynolds Stress Model - RSM*). Os recursos computacionais necessários para cálculos razoavelmente precisos são modestos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

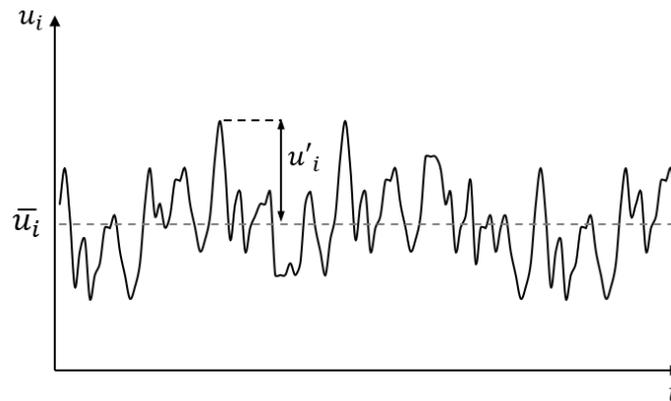
4.2.2.1 Equações médias e o problema de fechamento

O processo de retirada da média foi inicialmente sugerido por Osborne Reynolds em 1895. Na média de Reynolds, as variáveis instantâneas são decompostas em seus valores médios e suas flutuações. Para a velocidade instantânea u_i ou para qualquer variável escalar genérica ϕ , tem-se a Equação 4.7, representada também na Figura 4.8.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad e \quad \phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (4.7)$$

Onde \bar{u}_i e $\bar{\phi}$ são as médias da velocidade e da variável genérica, respectivamente, e u'_i e ϕ' são as flutuações da velocidade e da variável genérica no instante t , respectivamente.

Figura 4.8 – Representação esquemática da variação randômica da velocidade em torno da média em um tempo t .



Fonte: Produzido pela autora.

Após a substituição das variáveis nas equações de conservação (Equações 4.1 a 4.6) por seus valores médios mais flutuações, as equações são integradas em um intervalo de tempo Δt grande o suficiente para que exceda as escalas de tempo de mais baixa frequência (devido aos grandes vórtices) das variáveis. Para casos de escoamento transiente, a média da variável no tempo t é considerada como a média de um grande número de experimentos idênticos repetidos, ou seja, a média das repetições (*ensemble average*) (FREIRE; MENUT; SU, 2002).

Assumindo um escoamento permanente e incompressível, além de viscosidade dinâmica do fluido μ constante, as equações de conservação em termos de quantidades médias podem ser escritas conforme mostra as Equações 4.8 a 4.11. Cabe destacar que a estabilidade térmica do CLA é sempre próxima à neutralidade (RAMOS; FERNANDEZ; FISCH, 2018). Os ventos da região são fortes o suficiente para que a estratificação térmica (empuxo) possa ser desconsiderada.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (4.9)$$

Sendo

$$-\overline{u'_i u'_j} = \tau_{ij}^{turb} \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{c}}{\partial x_j} = D_m \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x_j^2} + S - \frac{\partial \overline{u'_j c'}}{\partial x_j} \quad (4.11)$$

O termo adicional que aparece nas equações de momento (τ_{ij}^{turb}) é um fluxo turbulento denominado tensor das tensões de Reynolds. Ele representa o transporte difusivo de momento por movimentos turbulentos (FREIRE; MENUT; SU, 2002). Sua forma matricial é apresentada na Equação 4.12.

$$\tau_{ij}^{turb} = - \begin{bmatrix} \overline{u'_1 u'_1} & \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_1 u'_3} \\ \overline{u'_2 u'_1} & \overline{u'_2 u'_2} & \overline{u'_2 u'_3} \\ \overline{u'_3 u'_1} & \overline{u'_3 u'_2} & \overline{u'_3 u'_3} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Os elementos da diagonal do tensor de Reynolds ($i = j$) representam as componentes da tensão normal. Os demais elementos representam as tensões cisalhantes devido às flutuações da velocidade.

Depois da integração média de Reynolds, observa-se um número maior de incógnitas do que de equações, pois ainda não existem equações para os fluxos turbulentos. É necessário, portanto, providenciar novas relações que completem a formulação do problema, relacionando as grandezas médias às grandezas instantâneas. Isso consiste no problema de fechamento que, nesse caso, é reduzido ao cálculo do tensor das tensões de Reynolds.

Existem diversos modelos disponíveis, que podem ser classificados em dois grupos principais: os modelos baseados no conceito de viscosidade turbulenta (fechamento de primeira ordem) e os modelos para a equação de transporte das tensões de Reynolds (fechamento de segunda ordem). A diferença entre eles está no tratamento dado aos termos turbulentos. Nesse trabalho foram

testados o modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável, de primeira ordem, e o modelo das Tensões de Reynolds (do inglês *Reynolds Stress Model - RSM*), de segunda ordem.

4.2.2.2 Modelos de viscosidade turbulenta - fechamento de primeira ordem

Os modelos de viscosidade turbulenta são baseados na hipótese de que existe uma analogia entre as ações das tensões viscosas e das tensões de Reynolds no escoamento médio (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Na lei da viscosidade de Newton as tensões viscosas são consideradas proporcionais à taxa de deformação dos elementos fluidos. Dessa forma, em 1877 Boussinesq propôs que as tensões de Reynolds poderiam ser relacionadas com os gradientes médios de velocidade por meio da viscosidade turbulenta (Equação 4.13).

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} = \frac{\mu_{turb}}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \quad (4.13)$$

Onde μ_{turb} é a viscosidade turbulenta (Pa.s) dada pela Equação 4.14.

$$\nu_{turb} = \frac{\mu_{turb}}{\rho} = C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (4.14)$$

Sendo C_μ um parâmetro que depende do modelo de turbulência e κ a energia cinética turbulenta ($m^2 \cdot s^{-2}$) dada pela Equação 4.15.

$$\kappa = \frac{1}{2} \overline{(u'_i u'_i)} \quad (4.15)$$

Com $\overline{u_i'^2}$ representando as tensões de Reynolds normais em x, y e z (m^2/s^2).

4.2.2.2.1 Modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ realizável

O modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável (SHIH; ZHU; LUMLEY, 1994; SHIH et al., 1995) é um modelo relativamente novo desenvolvido para suprir fraquezas encontradas em modelos $\kappa - \varepsilon$ tradicionais em relação à equação da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε). Para isso, o modelo contém uma formulação alternativa para a viscosidade turbulenta envolvendo a variável C_μ e uma nova equação para a dissipação (ε). As equações de transporte modeladas para κ e ε estão apresentadas nas Equações 4.16 e 4.18.

$$\frac{\partial \kappa \overline{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + P_\kappa - \varepsilon \quad (4.16)$$

Sendo

$$P_\kappa = \mu_{turb} S^2 \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 S \varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4.18)$$

Sendo

$$C_1 = \max \left[0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; \quad (4.19)$$

$$\eta = S \frac{\kappa}{\varepsilon} \quad (4.20)$$

e

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (4.21)$$

Onde P_κ é o termo de produção de energia cinética turbulenta dado pela Equação 4.17, S_{ij} é o tensor da taxa de deformação, σ_κ e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos para κ e ε , respectivamente, e C_2 é uma constante empírica do modelo. As constantes do modelo são: $\sigma_\kappa = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,2$ e $C_2 = 1,0$ (ANSYS, 2018).

Para o modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável a variável C_μ , usada para determinar a viscosidade turbulenta (Equação 4.14), é calculada pela Equação 4.22. Ela depende das taxas de deformação e rotação médias do escoamento e dos campos de κ e ε (SHIH; ZHU; LUMLEY, 1994).

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \kappa U^* / \varepsilon} \quad (4.22)$$

Sendo

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (4.23)$$

e

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (4.24)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (4.25)$$

Onde $\bar{\Omega}_{ij}$ é o tensor da taxa de rotação média visto em uma janela de referência se movendo com velocidade angular ω_k (SHIH; ZHU; LUMLEY, 1994). A constante A_0 tem valor 4,04 (ANSYS, 2018) e a constante A_S é dada pela Equação 4.26 (SHIH et al., 1995).

$$A_S = \sqrt{6} \cos \varphi \quad (4.26)$$

Onde

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W); \quad (4.27)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}; \quad (4.28)$$

e

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (4.29)$$

4.2.2.3 Modelo das tensões de Reynolds (RSM) - fechamento de segunda ordem

O modelo das tensões de Reynolds (RSM) considera a anisotropia da viscosidade turbulenta e fecha as equações médias de Navier-Stokes calculando uma equação de transporte para cada componente do tensor de Reynolds, juntamente com uma equação para a taxa de dissipação turbulenta. O modelo é mais generalista, porém, apresenta custos computacionais mais elevados.

A equação exata de transporte das tensões de Reynolds para escoamentos sob condição atmosférica neutra é apresentada na Equação 4.30 (LAUNDER; REECE; RODI, 1975).

$$u_k \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) = P_{ij} + D_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (4.30)$$

Onde

$$P_{ij} = -\overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} - \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k}; \quad (4.31)$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{u'_i u'_j u'_k} + \frac{1}{\rho} \overline{p'(\delta_{jk} u'_i + \delta_{ik} u'_j)} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_k} \right]; \quad (4.32)$$

$$\Pi_{ij} = \frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.33)$$

e

$$\varepsilon_{ij} = 2 \frac{\mu}{\rho} \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (4.34)$$

O primeiro termo da Equação 4.30 representa o transporte convectivo das tensões, P_{ij} a produção das tensões pela ação do escoamento médio sobre o campo turbulento e D_{ij} o transporte das tensões por difusão turbulenta (representada pelos dois primeiros termos) e molecular (último termo), que as redistribui espacialmente. A difusão molecular pode ser desprezada em regiões do

escoamento totalmente turbulentas. Π_{ij} é o transporte das tensões devido às interações turbulentas pressão-deformação. Uma vez que, pela conservação da massa, seu traço é zero (Equação 4.35), esse termo não contribui para o nível global da turbulência, mas, redistribui a energia entre as tensões normais (FREIRE; MENUT; SU, 2002). Por fim, ε_{ij} é a taxa de dissipação das tensões pela ação viscosa.

$$\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.35)$$

Os termos de transporte convectivo e P_{ij} não requerem nenhuma modelagem, pois envolvem apenas momentos de segunda ordem e propriedades do escoamento médio, de modo que eles são tratados de forma exata. No entanto, os termos D_{ij} , Π_{ij} e ε_{ij} precisam ser modelados para fechar as equações.

O modelo utilizado nesse trabalho foi o modelo linear de pressão-deformação (LAUNDER; REECE; RODI, 1975), que resolve a dissipação da turbulência ε por meio de uma equação de transporte análoga ao modelo $\kappa - \varepsilon$ padrão. Além disso, utilizam um modelo linear para a solução do termo pressão-deformação.

4.2.2.3.1 Modelo linear de pressão-deformação

A modelagem dos termos D_{ij} , Π_{ij} e ε_{ij} é apresentada conforme Launder, Reece e Rodi (1975) e ANSYS (2018).

O termo de transporte difusivo D_{ij} é descrito de acordo com a Equação 4.36.

$$D_{ij} = -C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\kappa}{\varepsilon} \left(\overline{u'_i u'_m} \frac{\partial \overline{u'_j u'_k}}{\partial x_m} + \overline{u'_j u'_m} \frac{\partial \overline{u'_i u'_k}}{\partial x_m} + \overline{u'_k u'_m} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_m} \right) \right] \quad (4.36)$$

Onde C_s é uma constante empírica de valor 0,11 (ANSYS, 2018).

O termo de transporte devido à interação pressão-deformação Π_{ij} é descrito conforme a Equação 4.37.

$$\begin{aligned} \Pi_{ij} = & -C_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} \left[\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \kappa \right] - \hat{\alpha}_0 \left[P_{ij} - \frac{1}{3} P_{kk} \delta_{ij} \right] - \hat{\beta}_0 \left[d_{ij} - \frac{1}{3} P_{kk} \delta_{ij} \right] \\ & - \kappa \hat{\gamma}_0 \left[S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right] + \left[0,125 \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(\overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \kappa \right) - 0,015 (P_{ij} - d_{ij}) \right] \frac{\kappa^{3/2}}{\varepsilon n} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Onde

$$d_{ij} = \overline{u'_i u'_m} \frac{\partial \overline{u_m}}{\partial x_j} + \overline{u'_j u'_m} \frac{\partial \overline{u_m}}{\partial x_i}; \quad (4.38)$$

O tensor de deformação S_{ij} é definido pela Equação 4.4. As constantes empíricas do modelo são: $\hat{\alpha}_0 = (8 + C_2)/11$, $\hat{\beta}_0 = (8C_2 - 2)/11$, $\hat{\gamma}_0 = (60C_2 - 4)/55$, $C_1 = 1,8$ e $C_2 = 0,6$ (ANSYS, 2018).

Por fim, a taxa de dissipação ε_{ij} é modelada de acordo com a Equação 4.39.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \quad (4.39)$$

A taxa de dissipação turbulenta (ε) que aparece na Equação 4.39 é modelada através da equação de transporte apresentada na Equação 4.40, definida de acordo com o modelo $\kappa - \varepsilon$ padrão.

$$\frac{\partial(\overline{u_j \varepsilon})}{\partial x_j} = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} - C_{3\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\kappa}{\varepsilon} \overline{u'_k u'_m} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_m} \right] \quad (4.40)$$

Sendo $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ constantes empíricas iguais a 1,44, 1,92 e 0,18, respectivamente (ANSYS, 2018).

4.2.3 Tratamento próximo à parede

Escoamentos turbulentos são significativamente afetados pela presença de paredes, já que estas são as principais fontes de vorticidade e turbulência. Regiões adjacentes às paredes são caracterizadas por altos gradientes das propriedades do escoamento.

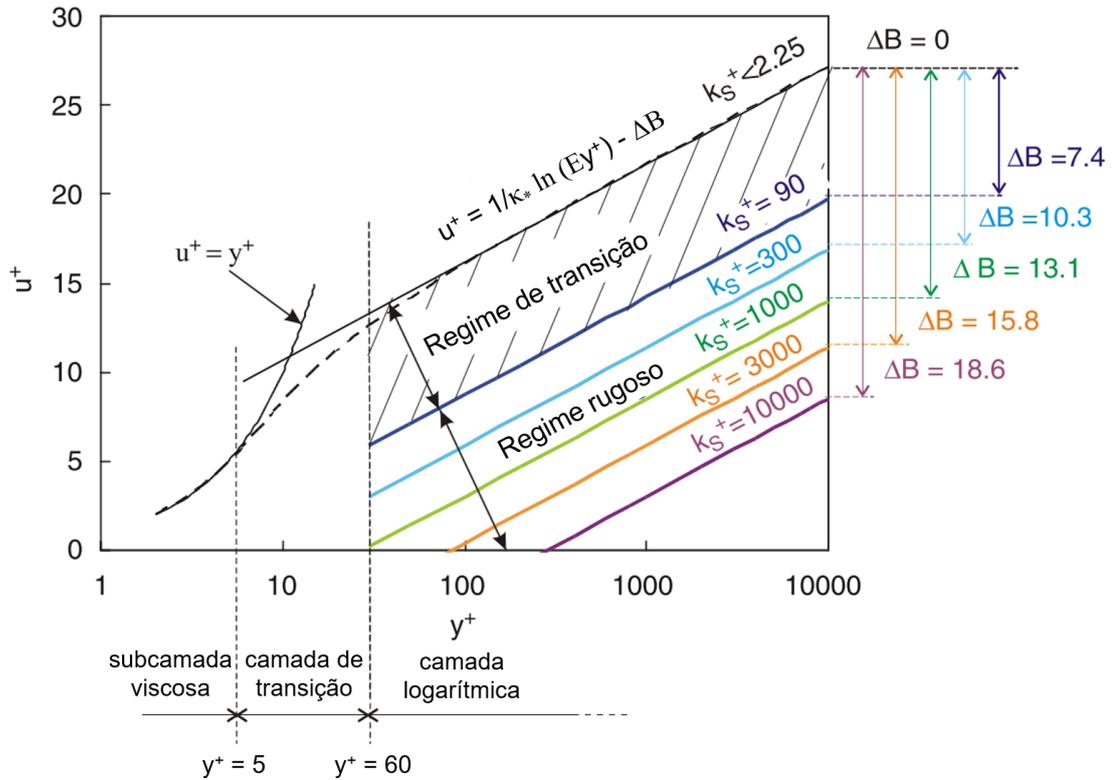
Conforme mostra a Figura 4.9, a região de parede pode ser subdividida em três camadas. A subcamada viscosa é a região mais próxima à parede, onde o escoamento é quase laminar e a viscosidade molecular desempenha um papel dominante, ou seja, a tensão turbulenta é desprezível em comparação à tensão viscosa. Na camada mais distante da parede, chamada de camada totalmente turbulenta ou camada logarítmica, os efeitos da turbulência são mais importantes. Na região intermediária (camada de transição), os efeitos da viscosidade molecular e da turbulência são igualmente importantes (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

As funções de parede geralmente são baseadas na distribuição universal de velocidade próximo à parede, que pode ser modificada pelos efeitos da rugosidade superficial (Figura 4.9). Neste trabalho foi usada a função de parede escalável modificada pela rugosidade. De acordo com ANSYS (2018), as funções de parede escalável produzem resultados consistentes para malhas de refinamento arbitrário. Seu equacionamento é apresentado a seguir, baseado em Launder e Spalding (1983).

A lei de parede para a velocidade média é dada pela Equação 4.41.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa_*} \ln(Ey^+) - \Delta B \quad (4.41)$$

Figura 4.9 – Comportamento da lei de parede para superfícies lisas e rugosas.



Fonte: Adaptado de Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007)

Sendo

$$u^+ = \frac{u_P u^*}{\tau_w / \rho}; \tag{4.42}$$

e

$$y^+ = \frac{\rho u^* y_P}{\mu} \tag{4.43}$$

Onde u^+ é a velocidade adimensional, y^+ é a distância adimensional a partir da parede, κ_* é a constante de von Kármán, igual a 0,41, e E é uma constante empírica de valor 9,793 (ANSYS, 2018). u_P é a velocidade do fluido no centroide P da célula adjacente à parede (m/s), y_P é a distância de P à parede (m) e u^* é a velocidade de fricção (m/s), calculada de acordo com a Equação 4.44.

$$u^* = C_\mu^{1/4} \kappa_P^{1/2} \tag{4.44}$$

Em que C_μ é uma constante empírica de valor 0,09 (ANSYS, 2018) e κ_P é a energia cinética turbulenta no centroide P da célula adjacente à parede (m²/s²).

No ANSYS Fluent, a lei logarítmica é empregada quando $y^+ > 11,225$ (ANSYS, 2018). A diferença entre as funções de parede padrão e escalável está em que a segunda utiliza um limitador nos cálculos de y^+ , de forma que:

$$\tilde{y}^+ = \max(y^+; y_{limite}^+) \quad (4.45)$$

Onde y_{limite}^+ é igual ao valor crítico de 11,225 (ANSYS, 2018). Assim, a formulação de y^+ usada na função de parede padrão é substituída por \tilde{y}^+ .

Voltando à Equação 4.41, ΔB é uma constante adicionada à lei logarítmica para incorporar os efeitos da rugosidade superficial (Equação 4.46). A constante depende do tipo e do tamanho da rugosidade e provoca um deslocamento na função de parede, conforme mostra a Figura 4.9.

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa_*} \ln f_r \quad (4.46)$$

Sendo f_r a função de rugosidade que quantifica o deslocamento do perfil devido aos efeitos de rugosidade. Para um regime hidrodinamicamente liso, ΔB é nulo. Já para um regime completamente rugoso, ΔB assume a seguinte expressão (Equação 4.47):

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa_*} \ln(1 + C_S K_S^+) \quad (4.47)$$

Onde C_S é uma constante de rugosidade que, por padrão, possui o valor de 0,5 (ANSYS, 2018) e K_S^+ é a altura adimensional da rugosidade dada por (Equação 4.48):

$$K_S^+ = \frac{\rho K_S u^*}{\mu} \quad (4.48)$$

Na qual K_S é a altura física de rugosidade ou rugosidade de Nikuradse (m). Yan et al. (2016) destacam que um erro comum é considerar K_S equivalente ao coeficiente de rugosidade aerodinâmica z_0 . Para um escoamento totalmente turbulento, K_S (m) pode ser aproximado a 30 vezes o comprimento de rugosidade aerodinâmica z_0 (Equação 4.49). Já z_0 (m) pode ser calculado a partir da altura do elemento de rugosidade h_e (m) (Equação 4.50), conforme apontado por Arya (1999). Além disso, uma observação importante a ser feita é que a altura do primeiro elemento adjacente à parede rugosa deve ser pelo menos o dobro da altura da rugosidade superficial ($y_P > K_S$) (BLOCKEN; STATHOPOULOS; CARMELIET, 2007; ANTONINI; ROMERO; AMON, 2019; ANSYS, 2018).

$$K_S \approx 30z_0 \quad (4.49)$$

$$z_0 = \frac{h_e}{30} \quad (4.50)$$

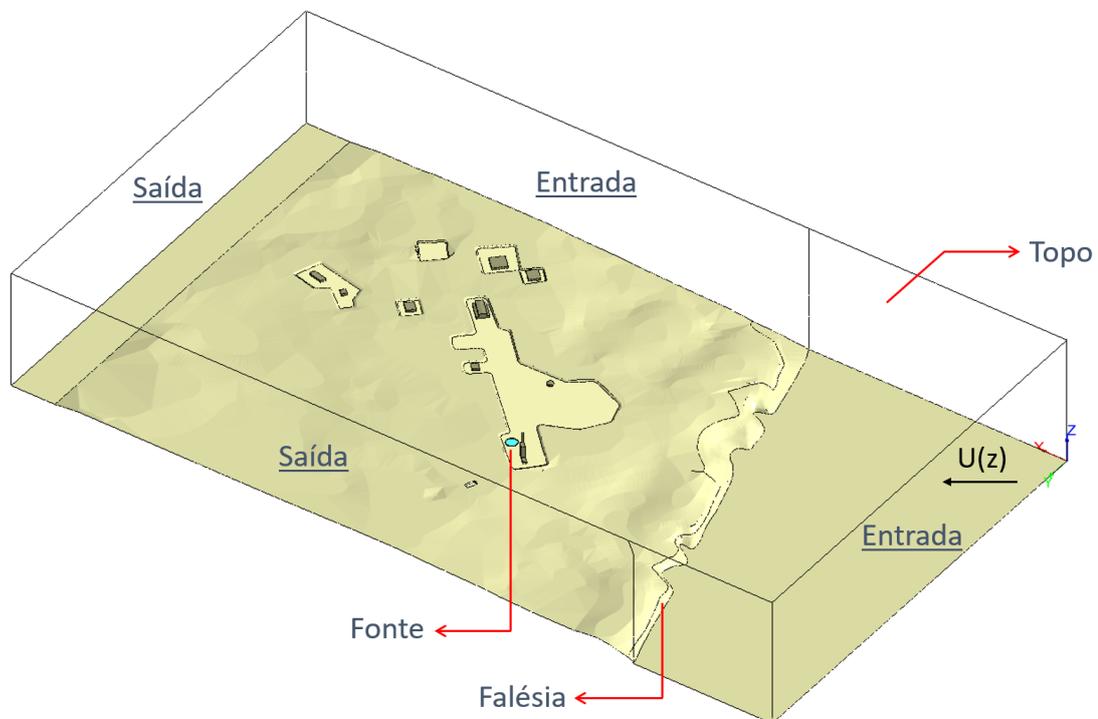
Considerando que a vegetação do CLA possui altura média de 3 metros, o coeficiente de rugosidade K_S para a região também seria de 3 metros. Dessa forma, para satisfazer o requisito da simulação ($y_P > K_S$), y_P deveria ser de, pelo menos, 6 metros, o que exigiria volumes de controle muito altos nessa região e, portanto, uma malha computacional de baixa resolução.

Por isso, nos locais onde foi identificada a presença de vegetação, a superfície foi elevada em 3 metros e foi inserida uma rugosidade superficial menor ($z_0 = 0,02$ m e $K_S = 0,6$ m). Na falésia, nas áreas construídas e no oceano foram adotadas rugosidades superficiais (K_S) iguais a 0,6 m, 0,03 m e 3×10^{-4} m, respectivamente. As paredes dos prédios foram consideradas como superfícies lisas.

4.2.4 Condições de contorno

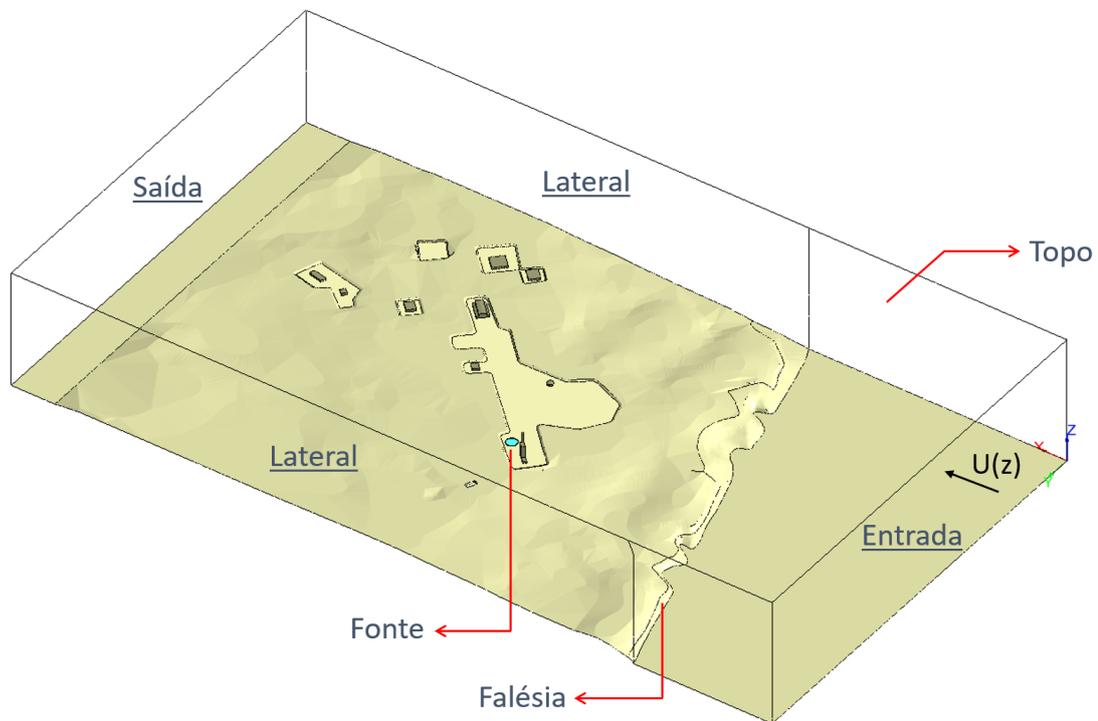
As condições de contorno utilizadas nas simulações numéricas variaram com a direção do vento incidente e estão apresentadas nas Figuras 4.10 e 4.11. São elas: (i) entrada, perfil de velocidades e intensidade turbulenta constante; (ii) saída, pressão atmosférica; (iii) paredes laterais e topo, condição de superfície livre (tensão de cisalhamento nula); (iv) chão e paredes dos prédios, condição de não deslizamento ($u_i = 0$).

Figura 4.10 – Identificação das condições de contorno no domínio computacional para direção do vento de 45° e 70° .



Fonte: Produzido pela autora (2020).

Figura 4.11 – Identificação das condições de contorno no domínio computacional para direção do vento de 90°.



Fonte: Produzido pela autora (2020).

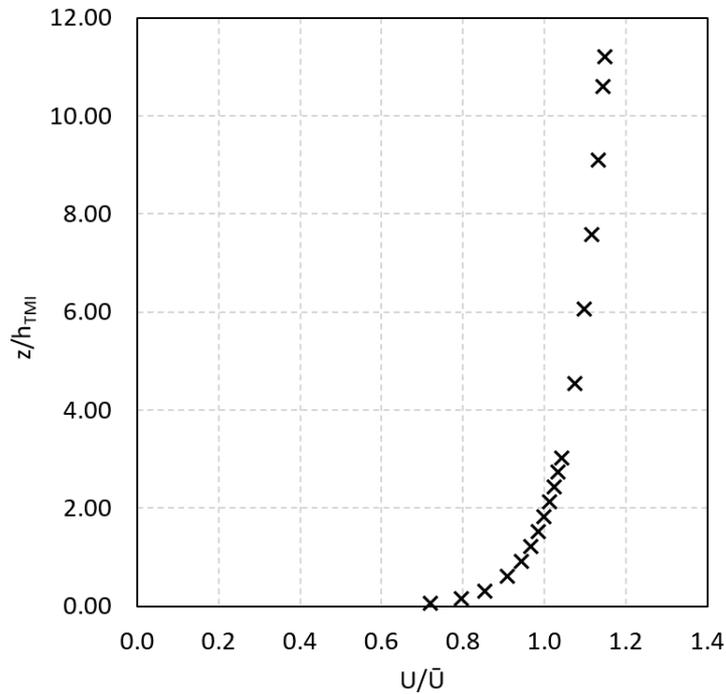
A distribuição média de velocidades na entrada do domínio foi definida a partir dos dados de reanálise FNL (do inglês *Final Operation Global Analysis*) do modelo global GFS (do inglês *Global Forecast System*) do NCEP (do inglês *National Centers for Environmental Prediction*) (NCAR, 2019), obtidos para o dia 20 de setembro de 2008 (período seco), às 00:00 horas (horário UTC). Os dados foram interpolados por meio de um perfil logarítmico (Equação 4.51) baseado na teoria da similaridade para camada superficial neutra (ARYA, 1999).

$$u(z) = \left(\frac{u^*}{\kappa_*} \right) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4.51)$$

Onde $u(z)$ é a velocidade média (m/s) na altura z (m), u^* é a velocidade de fricção (m/s), z_0 é o comprimento de rugosidade aerodinâmica (m) e κ_* é a constante de von Kármán (adimensional), adotada como 0,41 de acordo com Stull (1988).

A Figura 4.12 apresenta o perfil de velocidades resultante. Para os casos 1 e 2 a direção do vento incidente foi de 70° (direção média obtida pelos dados de reanálise). Para o caso 3, foram avaliadas 3 diferentes direções, considerando os ventos predominantes da região do CLA: ventos nordeste e leste (FISCH, 2010; MEDEIROS et al., 2013). As direções do vento incidente foram 70°, 45° e 90°, correspondendo aos casos 3a, 3b e 3c, respectivamente.

Figura 4.12 – Perfil de velocidade U adotado na entrada do modelo. h_{TMI} é a altura da TMI (33 metros) e \bar{U} é a velocidade média de entrada (11,5 m/s).



Fonte: Produzido pela autora (2020).

O número de Reynolds ($Re = \bar{U}L/\nu$) obtido foi de $2,5 \times 10^7$, calculado a partir da velocidade média \bar{U} de 11,5 m/s, comprimento característico L correspondendo a altura da TMI (33 metros) e viscosidade cinemática ν do ar atmosférico de $1,55 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ à 25°C .

Foram calculados os valores de energia cinética turbulenta κ (Equação 4.52) e dissipação de energia cinética turbulenta ε (Equação 4.53) baseados na intensidade da turbulência I obtida por Marciotto, Fisch e Medeiros (2012). Os autores calcularam um valor médio de 20% a partir de medições de velocidades no SPL para o período de 16 a 25 de setembro de 2008.

$$\kappa = \frac{2}{3}(\bar{u}I)^2 \quad (4.52)$$

$$\varepsilon = \frac{\kappa^{3/2}}{l} \quad (4.53)$$

Onde I é a intensidade da turbulência, definida como a razão entre o desvio padrão e a velocidade média do escoamento, de valor 20%, obtida experimentalmente por Marciotto, Fisch e Medeiros (2012) e l é a escala de comprimento da turbulência (m), calculada como 0,4 vezes a espessura da camada limite δ_{99} ($l = 0,4\delta_{99}$) (ANSYS, 2018).

Os valores de κ e ε calculados foram de $2,36 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $0,0151 \text{ m}^2/\text{s}^3$, respectivamente. Apesar desses valores serem condizentes também com (MEDEIROS et al., 2013), ao utilizá-los nas

condições de contorno de entrada as simulações numéricas apresentaram dificuldades de convergência. Isso é justificado pelo fato de que no oceano (entrada) a intensidade da turbulência é menor do que no continente, já que o escoamento ganha energia ao passar pela falésia. Por essa razão, no presente trabalho o valor de I na entrada foi reduzido a 5%, uniforme em toda a entrada. Por consequência, os valores de κ e ε também foram menores.

Na saída do domínio foi adotada a condição de pressão atmosférica (*pressure outlet*). Nas faces laterais foram adotadas condições de entrada (na lateral direita) e saída (na lateral esquerda), para as direções do vento incidente de 45° e 70°, e condição de superfície livre (*free slip*), para vento incidente de 90°. No topo foi considerada condição de superfície livre, ou seja, componentes da tensão de cisalhamento nulas. Por fim, nas paredes que representam o oceano, o chão, a falésia e as faces dos prédios foi adotada a condição de não deslizamento (*no-slip*), o fluido adere-se à parede estacionária com velocidade nula ($u_i = 0$). A concentração na entrada do domínio foi considerada igual a zero.

4.2.5 Representação da fonte de emissão

A dispersão de poluentes no CLA foi estudada considerando um lançamento abortado de um veículo lançador de satélites (VLS). Embora esse tipo de evento não seja frequente, ele pode gerar impactos significativos devido à alta liberação de poluentes em um período de tempo curto (NASCIMENTO; SOUZA; MOREIRA, 2019). O poluente considerado foi o cloreto de hidrogênio (HCl), que corresponde à 21,6% massa/massa da composição total do propelente sólido do VLS (MOREIRA; TRINDADE, 2010).

A fonte de emissão foi representada de forma simplificada, considerando uma emissão a partir do solo em uma área circular de, aproximadamente, 700 m² (Figuras 4.10 e 4.11). A forma circular foi adotada pois Nascimento, Souza e Moreira (2019) representaram a nuvem de escape, após sua formação, elevação, crescimento e estabilização, com uma forma cilíndrica. No entanto, no presente trabalho a altura da nuvem de escape não foi considerada.

No caso de lançamento abortado, o calor liberado pelo foguete é de 1000 cal/g, com taxa de emissão total de 136 kg/s e tempo de queima do combustível de 300 segundos (MOREIRA; TRINDADE, 2010; NASCIMENTO; SOUZA; MOREIRA, 2019). Dessa forma, a taxa de emissão de HCl foi de 29,4 kg/s.

Foram adotadas condições ambientes de temperatura e pressão: 25°C e 101,3 kPa. As condições topográficas e meteorológicas foram de acordo com o caso 3a: atmosfera neutra e ventos predominantes à 70°, com média de 11,5 m/s. Nessas condições de temperatura e pressão, o coeficiente de difusão molecular do HCl no ar foi de $1,7 \times 10^{-5}$ m²/s, calculado a partir de Tang, Cox e Kalberer (2014), resultando em um número de Schmidt ($Sc = \nu/D_m$) de 0,55.

4.3 MÉTODOS NUMÉRICOS

A solução das equações apresentadas na seção 4.2 é obtida a partir da aplicação de um método numérico. O presente trabalho foi desenvolvido por meio do programa ANSYS Fluent 19.0, que utiliza o método dos volumes finitos para converter uma equação de transporte em uma equação algébrica que seja resolvida numericamente. Essa abordagem envolve a discretização do domínio espacial em volumes de controle finitos utilizando uma malha computacional. As equações governantes são integradas em cada volume de controle do domínio discretizado, obtendo-se uma equação que expressa a lei de conservação com base no volume de controle.

4.3.1 Método dos Volumes Finitos

A discretização das equações governantes será demonstrada utilizando como exemplo a equação de transporte transiente de um escalar ϕ (Equação 4.54). Aplicando-se o Teorema da Divergência de Gauss (a fim de relacionar integrais de superfície com integrais de volume) na integração de 4.54 em um volume de controle arbitrário V , tem-se a Equação 4.55.

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho \frac{\partial \vec{u} \phi}{\partial \vec{x}} = \Gamma_{\phi} \frac{\partial \nabla \phi}{\partial \vec{x}} + S_{\phi} \quad (4.54)$$

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_A \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A} = \int_A \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (4.55)$$

Onde ϕ é uma quantidade escalar, \vec{u} é o vetor velocidade (m/s), \vec{x} é o vetor posição (m), \vec{A} é o vetor da área da superfície (m²), Γ_{ϕ} é o coeficiente de difusão para ϕ , $\nabla \phi$ é o gradiente do escalar ϕ e S_{ϕ} representa uma fonte de ϕ por unidade de volume.

A Equação 4.55 é aplicada em cada volume de controle do domínio computacional. A Figura 4.13 mostra o esquema de um volume de controle. A célula contendo o nó P possui seis nós vizinhos identificados como oeste, leste, sul, norte, inferior e superior (W, E, S, N, B, T, respectivamente). As letras w, e, s, n, b e t referem-se às faces oeste, leste, sul, norte, inferior e superior da célula, respectivamente.

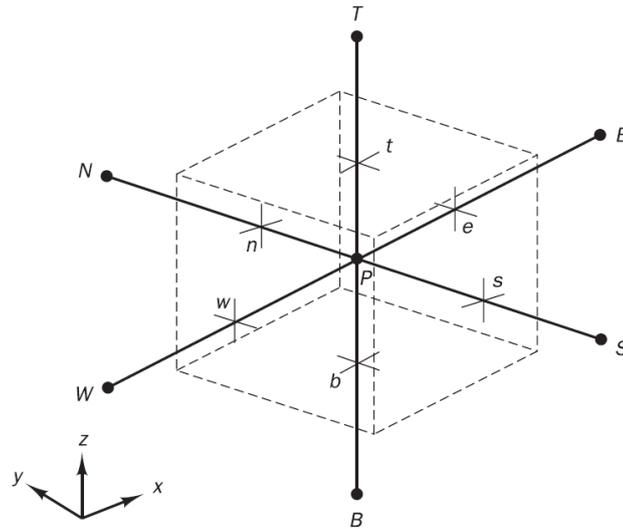
A discretização da Equação 4.55 em uma determinada célula produz a Equação 4.56.

$$\frac{\rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho \vec{u} \phi \cdot \vec{A} = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot \vec{A} + S_{\phi} V \quad (4.56)$$

Onde $\frac{\rho \phi}{\partial t} V$ é a discretização temporal, N_{faces} é o número de faces que envolvem a célula, $\rho \vec{u} \cdot \vec{A}$ é um fluxo de massa através da face f e V é o volume da célula.

A Equação 4.56 contém uma variável escalar desconhecida no nó central da célula, bem como os valores desconhecidos nas células vizinhas em seu entorno. Dessa forma, a equação será, em

Figura 4.13 – Esquema de um volume de controle.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

geral, não linear em relação a essas variáveis. Sua linearização pode ser feita a partir da Equação 4.57.

$$a_P \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \tag{4.57}$$

Onde nb refere-se às células vizinhas (*neighbor*) e a_P e a_{nb} são os coeficientes linearizados para ϕ e ϕ_{nb} . Equações similares podem ser escritas para cada célula da malha.

Após discretização e linearização do modelo matemático, tem-se como resultado um sistema de equações algébricas que é então resolvido pelo ANSYS Fluent usando um método numérico implícito de resolução de sistemas lineares (Gauss-Seidel) em conjunto com um método algébrico multimalha (Algebraic Multigrid - AMG), que acelera a convergência da solução.

Os esquemas adicionais utilizados para a discretização espacial das equações de conservação e para o acoplamento pressão-velocidade estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Esquemas de discretização espacial e acoplamento pressão-velocidade utilizados nas simulações numéricas.

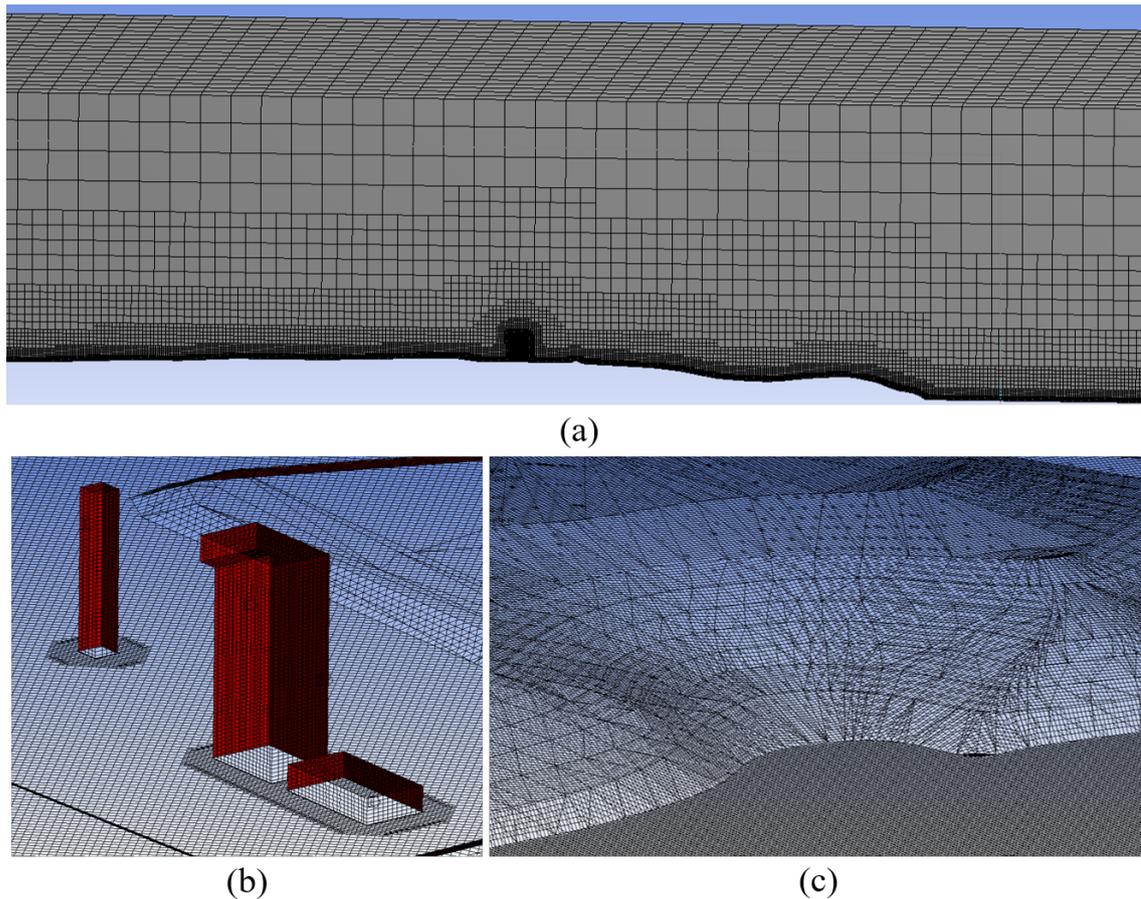
Termo	Esquema
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE
Gradiente	Mínimos quadrados
Pressão	Padrão (Standard)
Momento	
κ, ϵ	
Tensões de Reynolds Escalar	Upwind de 1ª ordem
Transiente	

Fonte: Produzido pela autora (2020)

4.3.2 Malhas computacionais

As malhas computacionais utilizadas neste trabalho foram elaboradas por meio do programa ANSYS Meshing 19.0. A Figura 4.14 mostra a malha resultante para o caso 3. Os testes de sensibilidade realizados para os casos 1 a 3 estão apresentados no Apêndice A.

Figura 4.14 – Visualização da malha construída para o caso 3: a) visão geral, b) visão aproximada da TMI, c) visão aproximada da falésia.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

As malhas computacionais foram formadas, predominantemente, por elementos hexaédricos. Em todos os casos o tamanho dos elementos adjacentes ao solo (oceano, falésia e continente) foi de 1,2 m, com taxa de crescimento de 1,2. No topo do domínio os elementos chegaram a 38,4 m.

Adjacente à parede dos principais prédios (TMI, torre de escape, casa de apoio próxima à TMI e casamata) o tamanho dos elementos foi de 0,6 m, com taxa de crescimento de 1,2. Nessas regiões também foi inserida uma camada de elementos prismáticos, a fim de proporcionar uma melhor solução das equações de conservação nesses locais. O tamanho dos elementos na primeira camada de prisma foi de 0,01 m, resultando em y^+ menores que 200, com taxa de crescimento de 1,5 para um total de 6 camadas.

A Tabela 4.2 mostra o número total de nós e de elementos das malhas computacionais utilizadas nos casos 1 a 3.

Tabela 4.2 – Número de nós e de elementos das malhas computacionais utilizadas nos casos 1 a 3.

Caso	Número de nós	Número de elementos
1	14.281.481	12.424.099
2	15.311.238	13.520.297
3	15.449.500	13.663.248

Fonte: Produzido pela autora (2020)

4.3.3 Parâmetros das simulações e recursos computacionais

A solução da equação de transporte de HCl foi obtida considerando o regime transiente. Foi adotado um intervalo de tempo constante ($\Delta t = 0,05$ segundos), definido a partir de número de Courant C igual a 1 (Equação 4.58). Em cada Δt a solução convergiu com no máximo 10 iterações.

$$C = \frac{\bar{u}\Delta t}{\Delta x} \quad (4.58)$$

Onde \bar{u} é a velocidade média do escoamento (m s^{-2}) e Δx é a dimensão da menor célula da malha (m).

O critério de convergência definido para a solução das equações de transporte foi que o valor absoluto do erro (diferença do estado das variáveis entre uma iteração e a iteração anterior) seja menor que 10^{-4} .

As simulações numéricas foram realizadas pelos clusters NAVIER e VULCANO-2, baseados no sistema operacional CentOS, de propriedade do Núcleo de Estudos em Qualidade do Ar (Nqualiar) da Universidade Federal do Espírito Santo.

Foram empregados 5 nós do cluster VULCANO-2, cada um equipado com um processador Intel Core i7-4790K de 4,0 GHz, 16 GB de memória, 4 núcleos e cache de 8 MB. Também foram empregados 6 nós do cluster NAVIER, três deles equipados com um processador Intel Core i7-9700K de 4,0 GHz, 16 GB de memória, 4 núcleos e cache de 12 MB, e outros três com um processador Intel Core i5-8500K de 4,0 GHz, 8 GB de memória, 4 núcleos e cache de 8 MB.

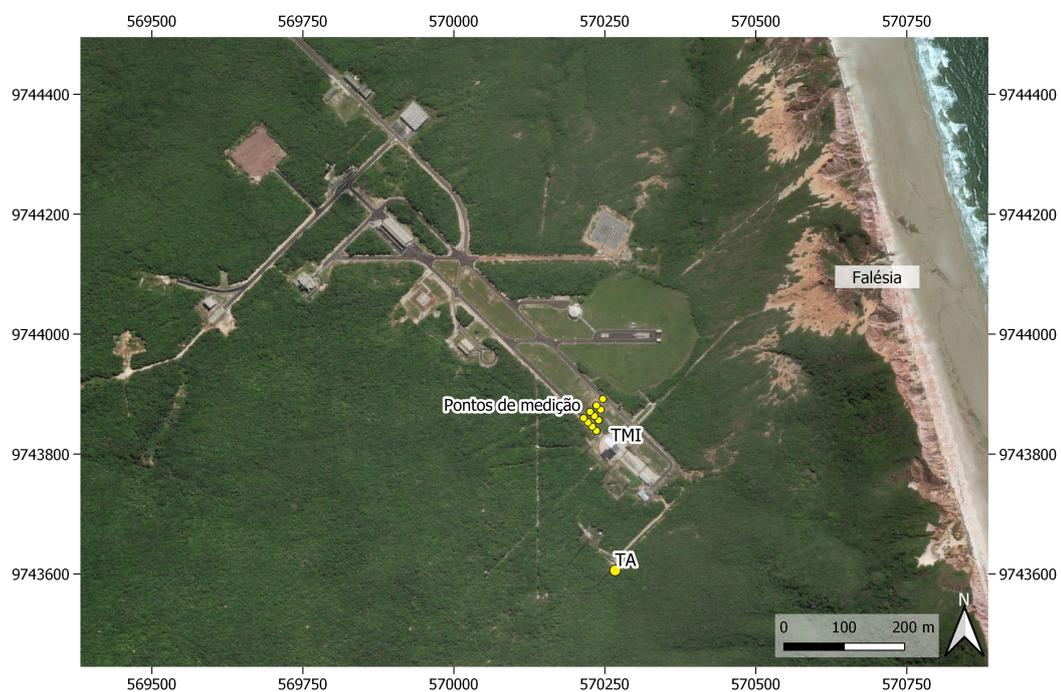
4.4 VALIDAÇÃO

Os resultados das simulações numéricas foram validados por meio dos experimentos de campo de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012) e das medições realizadas pela torre anemométrica localizada no Centro de Lançamento de Alcântara (Figura 4.15).

4.4.1 Experimentos de campo

Marciotto, Fisch e Medeiros (2012) realizaram a campanha de medição no período de 16 a 25 de setembro de 2008, correspondendo a estação seca da região. Durante a campanha as condições meteorológicas foram de céu limpo e sem precipitação. Os dados foram obtidos a partir de 10 anemômetros instalados em mastros de 10 metros de altura. Os mastros foram dispostos em uma malha triangular com espaçamento de 10 metros entre eles (Figura 4.16). Sua localização no CLA está apresentada na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Identificação da torre anemométrica (TA) e dos pontos de medição dos experimentos de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012).



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Foram coletados dados de direção e velocidade do vento, amostrados numa frequência de 0,5 Hz. As séries temporais foram obtidas a partir das médias de 10 minutos dos dados amostrados.

As simulações numéricas foram comparadas com os dados medidos às 00:00 horas no dia 20 de setembro de 2008. Nesse momento, a velocidade e a direção médias medidas pelos 10 anemômetros foram de 8,4 m/s (desvio padrão médio igual a 1,4 m/s) e 52° (desvio padrão médio de 9°), respectivamente. Considerando todo o período de campanha, a intensidade da turbulência média obtida variou entre 13% e 27%.

Figura 4.16 – Pontos de medições dos experimentos de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012).

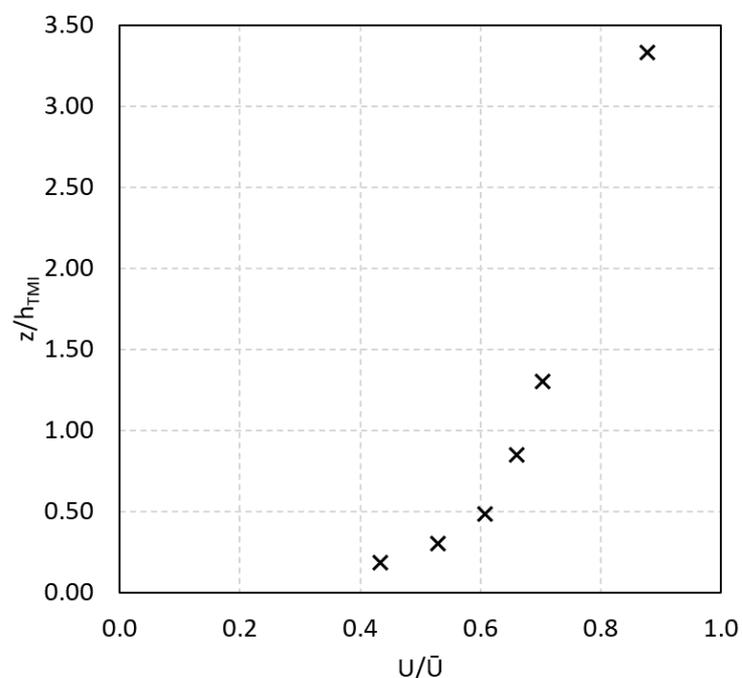


Fonte: Marciotto, Fisch e Medeiros (2012)

4.4.2 Torre anemométrica

A torre anemométrica está localizada próxima ao Setor de Preparação e Lançamento (SPL), conforme mostra a Figura 4.15. Ela possui seis níveis de medição de velocidade e direção do vento, sendo eles: 6, 10, 16, 28, 43 e 110 metros. A Figura 4.17 mostra o gráfico das velocidades medidas na torre em 20 de setembro de 2008, às 00:00 horas. A direção média nessa ocasião foi de 65° (com desvio padrão médio de 13°).

Figura 4.17 – Dados da torre anemométrica do CLA em 20 de setembro de 2008, às 00:00 horas.



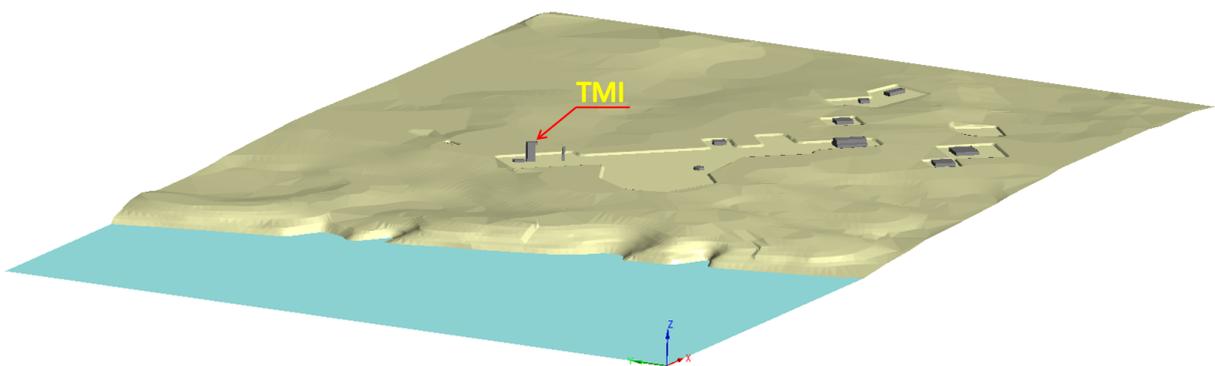
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações numéricas considerando os casos descritos anteriormente no capítulo 4. Na primeira seção é apresentado o resultado do modelo topográfico desenvolvido para este trabalho. Na sequência, a acurácia das simulações é avaliada, enquanto é feita uma comparação entre os dois modelos numéricos testados: $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM (modelo das tensões de Reynolds). As seções seguintes apresentam a avaliação da influência da topografia, da rugosidade superficial e de diferentes direções do vento incidente nos padrões de escoamento na região do CLA. Por fim, são apresentados os resultados do estudo de caso hipotético da dispersão do poluente HCl emitido durante um lançamento de foguete abortado no CLA.

5.1 MODELO TOPOGRÁFICO

O modelo topográfico utilizado no presente trabalho, apresentado na Figura 5.1, foi desenvolvido com base nos dados de superfície da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), com uma resolução espacial de 30 metros. Apesar da baixa resolução dos dados, o modelo obtido foi capaz de representar bem a região do CLA quando comparado às imagens fotográficas do local (Figura 5.2).

Figura 5.1 – Modelo topográfico do Centro de Lançamento de Alcântara desenvolvido para as simulações numéricas. Na imagem é indicada a localização da torre móvel de integração (TMI).



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Confrontando o modelo topográfico (Figura 5.1) com a fotografia do CLA (Figura 5.2) verifica-se que a falésia na interface oceano-continente foi reproduzida, respeitando sua irregularidade. Além disso, em ambas as imagens é possível visualizar um relevo ligeiramente acidentado ao longo do domínio. A posição da TMI e dos demais prédios em relação à costa também foi acompanhada. Essa abordagem proporcionou um maior detalhamento da região do CLA em

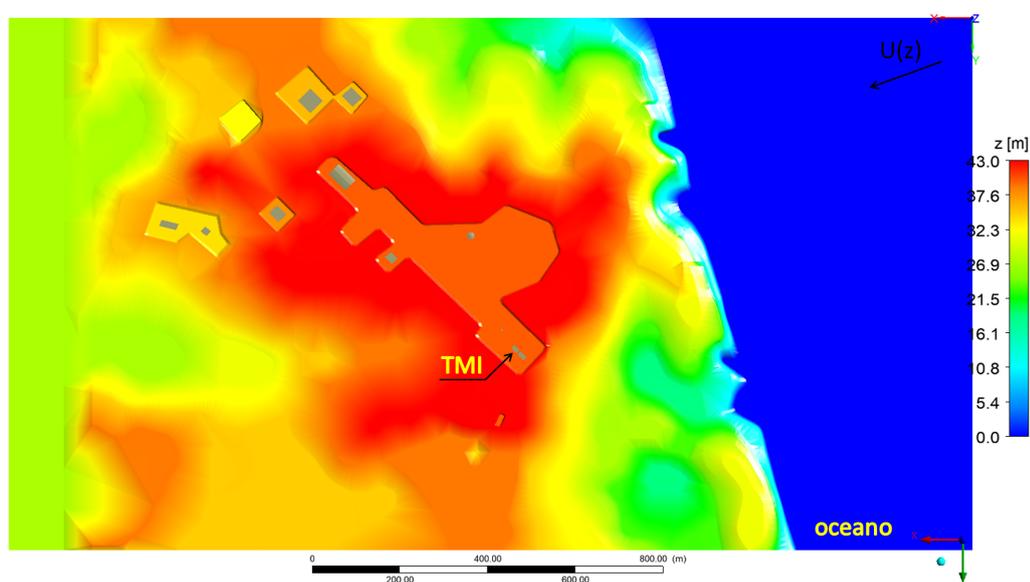
relação à representação utilizada em estudos anteriores como de Pires et al. (2010), Souza, Fisch e Goulart (2015) e Faria, Avelar e Fisch (2019).

Figura 5.2 – Fotografia aérea do domínio de estudo. Na imagem é indicada a localização da torre móvel de integração (TMI).



A Figura 5.3 mostra a variação de altitude ao longo do modelo topográfico desenvolvido. Cabe ressaltar que estão adicionados 3 metros de altura nas regiões cobertas por vegetação, conforme explanado na seção 4.1. Observa-se que na extensão da falésia as altitudes variam entre 12 e 26 metros, aproximadamente, em relação ao nível do mar. Nas laterais direita e esquerda é possível notar uma topografia muito irregular. Pequenos morros são formados, principalmente ao longo da lateral direita, onde a variação de cota está entre 12 e 41 metros, aproximadamente.

Figura 5.3 – Modelo topográfico do CLA: variação de altitude ao longo do domínio. Na imagem é indicada a localização da torre móvel de integração (TMI).



Fonte: Produzido pela autora (2020)

A região de maior altitude no domínio está no entorno do setor de preparação e lançamento (SPL), com cerca de 43 metros. Todo o SPL, onde está localizada a torre móvel de integração (TMI) e de onde os foguetes são lançados, além da região da torre anemométrica, possuem a mesma altitude de 40 metros em relação ao nível do mar. Como o SPL possui uma elevação menor, seu entorno pode influenciar o escoamento atmosférico no local.

5.2 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA

Os resultados das simulações numéricas foram comparados com as medições em campo de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012) e com as medições da torre anemométrica do Centro de Lançamento de Alcântara, ambas realizadas no dia 20 de setembro de 2008, às 00:00 horas (UTC).

A validação foi realizada a partir do caso 3a, cuja geometria é composta pela topografia e pela rugosidade superficial da região de estudo e a direção média do vento incidente é de 70°. Foram comparados os modelos de turbulência $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM (modelo das tensões de Reynolds). A apresentação dos resultados para os diferentes modelos teve como objetivo avaliar suas respostas em relação ao cenário simulado.

A Tabela 5.1 mostra a comparação entre as velocidades medidas e simuladas em diferentes pontos do domínio, identificados na seção 4.4.1. Os erros relativos entre os resultados foram calculados conforme a Equação 5.1, proporcionando, assim, verificar se os valores simulados representaram as observações.

$$ER(\%) = \frac{|U_{sim} - U_{med}|}{|U_{med}|} \times 100 \quad (5.1)$$

Onde ER é o erro relativo percentual dos resultados das simulações (%), U_{sim} é a velocidade calculada na simulação (m/s) e U_{med} é a velocidade medida no ponto (m/s).

A partir da Tabela 5.1 observa-se que, no geral, as velocidades medidas nos pontos analisados foram bastante homogêneas. A menor velocidade foi medida no ponto 1 (7,5 m/s) e a maior no ponto 10 (9,6 m/s), sendo a diferença entre elas de 2,1 m/s. As velocidades nos demais pontos variaram de 8,0 m/s a 8,9 m/s. A homogeneidade espacial também foi verificada nas simulações numéricas. Em todos os 10 pontos analisados as velocidades calculadas tiveram valores muito próximos, entre 8,3 m/s e 8,7 m/s para o modelo $\kappa - \varepsilon$ e entre 8,4 m/s e 8,7 m/s para o modelo RSM. Diferente das medições em campo, nas simulações numéricas as menores velocidades foram encontradas no ponto 4 (8,3 m/s e 8,4 m/s para os modelos $\kappa - \varepsilon$ e RSM, respectivamente). Assim como nas medições em campo, as maiores velocidades foram obtidas no ponto 10 para o modelo $\kappa - \varepsilon$ e nos pontos 5 e 10 para o modelo RSM, todos com velocidade média de 8,7 m/s. Os modelos $\kappa - \varepsilon$ e RSM tiveram um desempenho similar em todos os pontos comparados.

Tabela 5.1 – Comparação entre as medições de campo (U_{med}) e os resultados das simulações numéricas (U_{sim}) para o caso 3a utilizando os modelos $\kappa - \varepsilon$ e RSM. ER é o erro relativo entre os resultados, dado em %.

Ponto	U_{med}	U_{sim} (m/s)	U_{sim} (m/s)	ER (%)	ER (%)
	(m/s)	$\kappa - \varepsilon$	RSM	$\kappa - \varepsilon$	RSM
1	7,5	8,6	8,7	14,3	15,2
2	8,3	8,5	8,6	1,8	2,8
3	8,2	8,4	8,5	1,9	3,2
4	8,0	8,3	8,4	3,5	4,7
5	8,3	8,6	8,7	4,5	5,6
6	8,2	8,5	8,6	3,5	4,7
7	8,3	8,5	8,5	1,5	2,4
8	8,6	8,6	8,7	0,4	0,5
9	8,9	8,6	8,6	3,5	3,1
10	9,6	8,7	8,7	9,5	9,3
Média	8,4	8,5	8,6	4,4	5,1
Mínima	7,5	8,3	8,4	0,4	0,5
Máxima	9,6	8,7	8,7	14,3	15,2

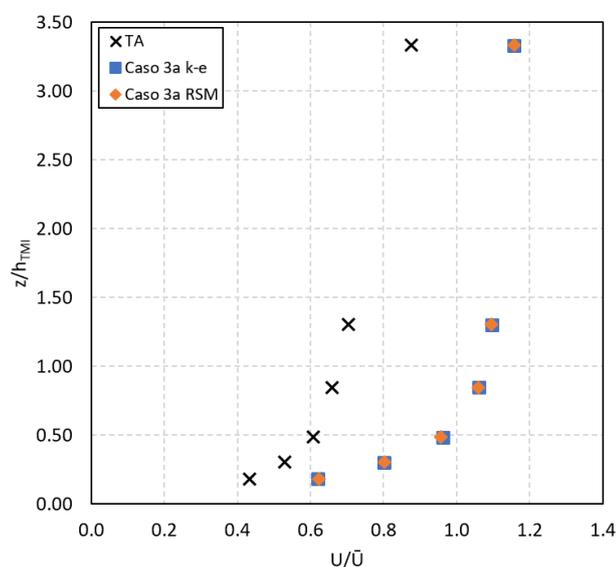
Fonte: Produzido pela autora (2020)

Ambos os modelos tiveram o maior erro em relação às medições no ponto 1 (erros relativos de 14,3% e 15,2% para os modelos $\kappa - \varepsilon$ e RSM, respectivamente). Os resultados obtidos no ponto 8 foram os que mais se aproximaram das medições em campo, com erros relativos menores que 1,0%. As simulações utilizando os dois modelos subestimaram as velocidades nos pontos 9 e 10, sendo que isso também ocorreu no ponto 8 apenas para o modelo $\kappa - \varepsilon$.

A Figura 5.4 apresenta a comparação entre as velocidades medidas na torre anemométrica do CLA e os resultados das simulações numéricas obtidos para o caso 3a no mesmo local. As simulações numéricas tanto para o modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável quanto para o RSM superestimaram as velocidades em comparação com as da torre anemométrica. Em média, as simulações resultaram em valores $0,3 U/\bar{U}$ maiores que as medições em campo, o que equivale a uma superestimação média de 3,6 m/s. O erro relativo médio entre as medições e as simulações para os dois modelos foi de 50,2%, sendo que o menor valor (32,0%) foi obtido no ponto mais alto de medição ($3,3 z/h_{TMI}$, que equivale a 110 m de altura) e o maior valor (60,9% e 60,6% para os modelos $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM, respectivamente) na altura de 28 m ($0,8 z/h_{TMI}$). Os modelos numéricos superestimaram os valores de velocidade pela consideração de escoamento permanente. Apesar disso, o comportamento do perfil foi acompanhado, com velocidades menores próximas ao solo e crescentes com a altura. O desempenho dos dois modelos foi análogo nessa situação.

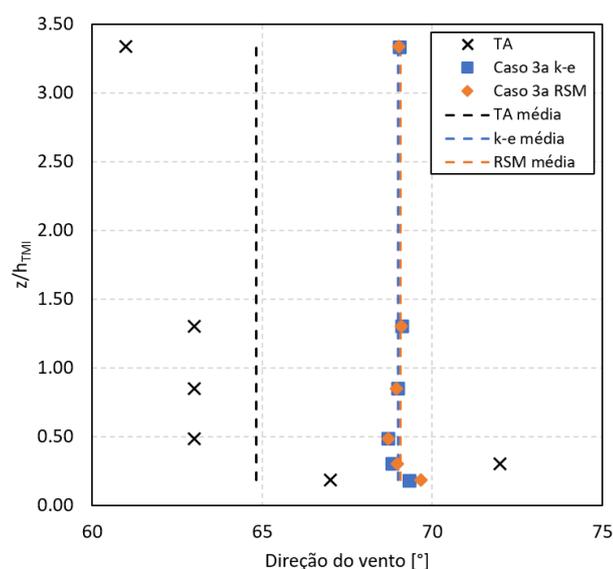
Conforme mostra a Figura 5.5, a direção média do vento medida na torre anemométrica foi de 65° . Nas simulações numéricas esse valor foi de 69° . O escoamento médio foi bem representado nas simulações numéricas, tendo um desvio de apenas 4° na direção média do vento em comparação com as medições em campo.

Figura 5.4 – Comparação entre as velocidades medidas na torre anemométrica do CLA e calculadas nas simulações numéricas pelos modelos $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM para o caso 3a. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m) e \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s).



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Figura 5.5 – Comparação entre as direções do vento medidas na torre anemométrica e calculadas nas simulações numéricas pelos modelos $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM para o caso 3a. As linhas tracejadas representam a direção média para cada cenário. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m).

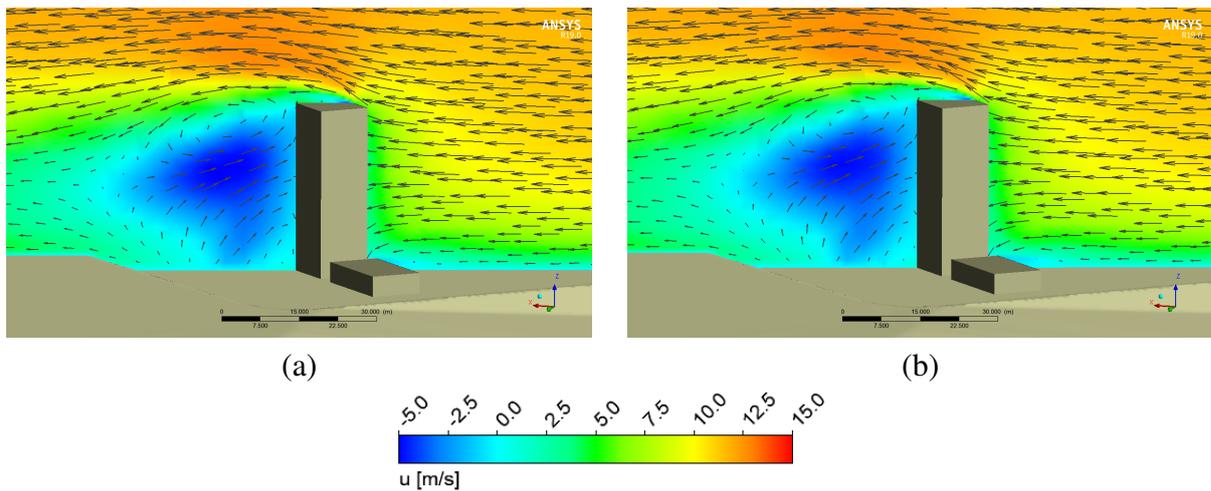


Fonte: Produzido pela autora (2020)

Os campos de velocidade média ao redor da TMI no plano traçado na direção do escoamento estão apresentados na Figura 5.6. Os resultados obtidos nas simulações numéricas pelos dois modelos de turbulência ($\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM) se mostraram análogos. O mesmo padrão de

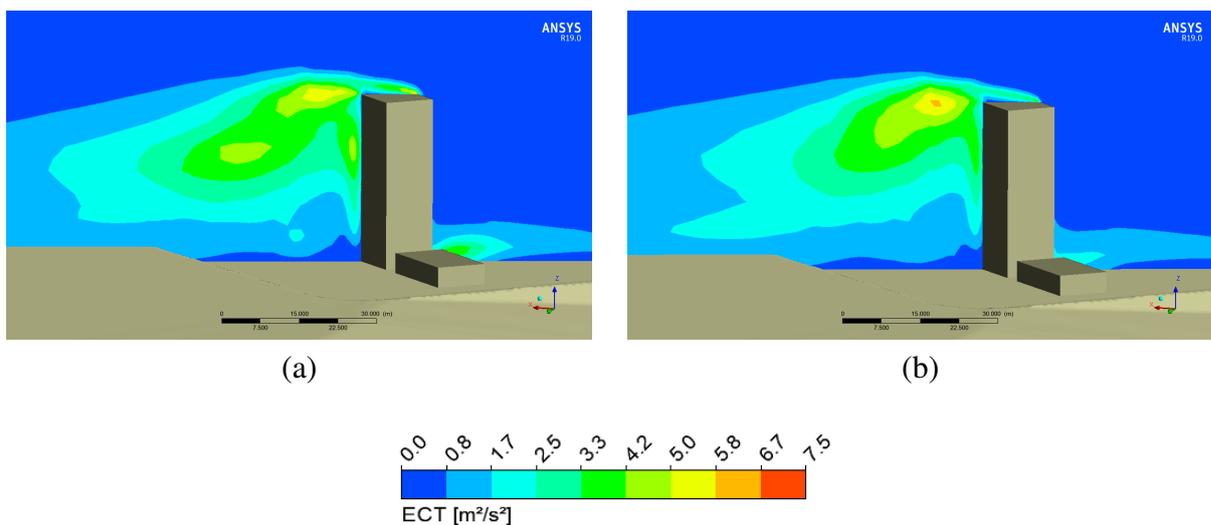
escoamento foi observado: separação da camada limite ao passar pela TMI e formação de uma zona de recirculação atrás do prédio. Ambos os modelos não representaram bem o recolamento da camada limite acima da TMI.

Figura 5.6 – Comparação dos campos de velocidade ao redor da TMI para os modelos: a) $\kappa - \varepsilon$ realizável e b) RSM.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Figura 5.7 – Comparação dos campos de energia cinética turbulenta ao redor da TMI para os modelos: a) $\kappa - \varepsilon$ realizável e b) RSM.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Em relação à energia cinética turbulenta (Figura 5.7), os modelos $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM também apresentaram um padrão similar. A ECT é alta na borda superior da TMI, onde há a separação da camada limite e os gradientes de velocidade são elevados, e na região de esteira atrás do prédio, onde há intensa recirculação. Esse comportamento está de acordo com o observado por

Saeedi, LePoudre e Wang (2014) ao estudar o escoamento ao redor de um obstáculo alto por meio de simulações DNS. Na região próxima à TMI, os resultados obtidos com o modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável mostraram valor máximo de ECT maior do que o modelo RSM. A ECT máxima no plano apresentado na Figura 5.7 foi de $6,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ para o modelo $\kappa - \varepsilon$ e de $6,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ para o modelo RSM.

Os modelos $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM apresentaram um desempenho similar nas análises realizadas. Ambos representaram bem as velocidades medidas no CLA. Apesar do modelo RSM resolver melhor a turbulência em relação ao modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável, já que este último utiliza mais aproximações para calcular os parâmetros de turbulência, seu tempo de simulação nesse caso foi cerca de 50% maior. Por isso, o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ foi utilizado para a solução do problema do escoamento e da dispersão atmosférica no Centro de Lançamento de Alcântara, visto que na validação ele representou bem as velocidades medidas, que consiste na principal variável de interesse do presente trabalho.

5.3 ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA

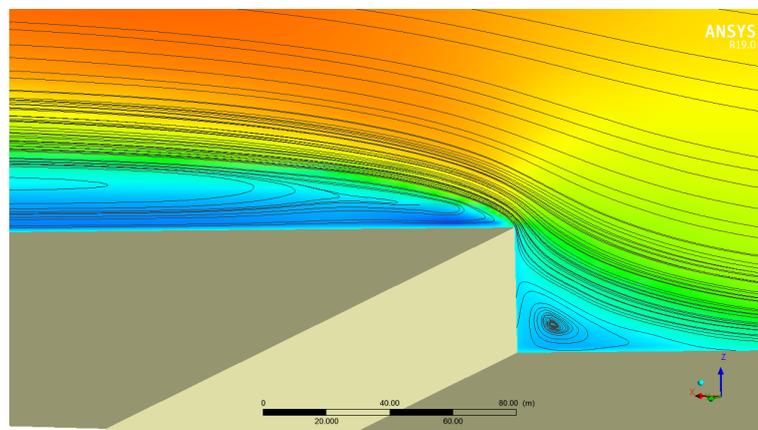
5.3.1 Influência da topografia e da rugosidade superficial

Uma comparação entre os casos 1, 2 e 3a foi realizada a fim de estudar a influência da topografia e da rugosidade superficial no escoamento atmosférico do Centro de Lançamento de Alcântara. O caso 1 considerou uma representação simplificada do CLA com a superfície plana e a falésia de 40 metros representada por um degrau de 90° . O caso 2 considerou a topografia real do CLA. Por fim, o caso 3a considerou também a vegetação da região representada por uma elevação de 3 metros na superfície e uma rugosidade superficial (mais detalhes na seção 4.1). Em todos os casos a direção do vento predominante foi de 70° .

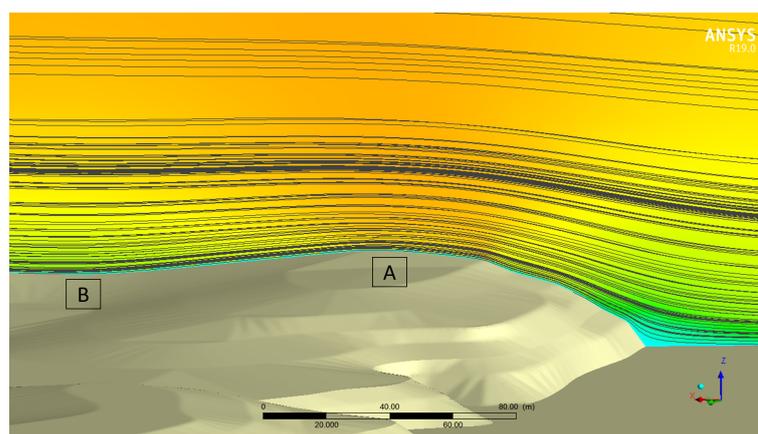
Em uma atmosfera neutra, premissa considerada neste trabalho, o escoamento é modificado principalmente devido às tensões de cisalhamento geradas em sua interação com as paredes do domínio (superfície do terreno e faces dos prédios). A Figura 5.8 apresenta a distribuição de velocidade longitudinal média e as linhas de corrente na falésia para os três casos analisados, considerando a direção do escoamento médio. Para o caso 1 (Figura 5.8a) observou-se que o escoamento incidindo no degrau (falésia) é separado alcançando velocidades de $9,4 \text{ m/s}$ e $10,6 \text{ m/s}$ em $0,3h_{TMI}$ e $0,6h_{TMI}$ m acima da falésia, respectivamente. Uma região de fluxo reverso é formada à montante do obstáculo com velocidades abaixo de $2,5 \text{ m/s}$ e chegando a velocidades negativas próximas a $-1,0 \text{ m/s}$.

Assim como obtido por Faria, Avelar e Fisch (2019), à jusante da falésia há ainda a formação de uma zona de recirculação que se estende até à torre móvel de integração (TMI). Essas características do escoamento em um degrau também foram observadas por Essel e Tachie (2017) e Wu e Ren (2013). Assim como no presente trabalho, os autores verificaram que duas zonas de recirculação são formadas: à montante e à jusante do degrau. Sua intensidade e extensão

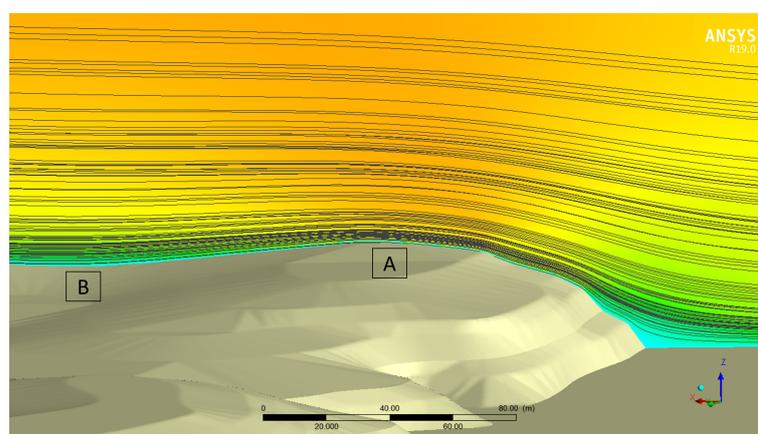
Figura 5.8 – Linhas de correntes na direção do escoamento passando pela falésia: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a. A indica o ponto mais alto da falésia e B indica o ponto mais baixo logo após a falésia.



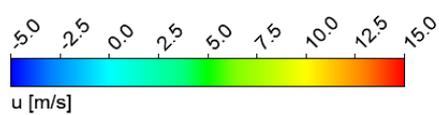
(a)



(b)

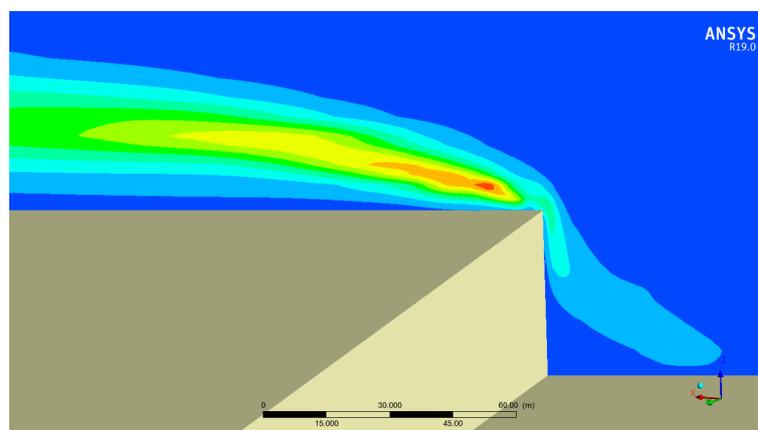


(c)

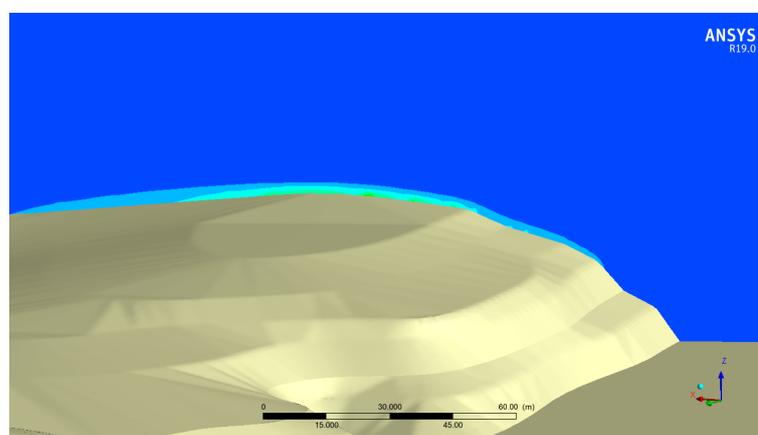


Fonte: Produzido pela autora (2020)

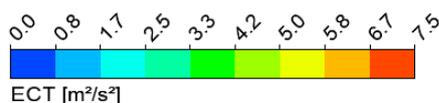
Figura 5.9 – Energia cinética turbulenta ao redor da falésia: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.



(a)



(b)



Fonte: Produzido pela autora (2020)

dependem de algumas condições como o número de Reynolds do escoamento, a rugosidade superficial antes e depois do degrau e de sua altura. Essel e Tachie (2017), considerando superfícies lisas, verificaram que o aumento do número de Reynolds leva à uma intensificação da zona de recirculação à jusante do degrau. No presente trabalho o número de Reynolds é alto, na ordem de 10^7 , o que pode ter favorecido, portanto, a força da recirculação à jusante do degrau.

Wu e Ren (2013) observaram que em superfícies rugosas e irregulares, a zona de recirculação após o degrau tende a ser atenuada. Nos casos 2 e 3a (Figuras 5.8b e 5.8c), adicionando o relevo real do CLA, a mudança de topografia ocorreu de forma menos abrupta. Dessa forma, o escoamento acompanhou melhor a geometria da falésia e as zonas de separação e de recirculação ao redor da falésia tiveram menor intensidade se comparadas ao caso 1. Para os casos 2 e 3a,

o escoamento é acelerado na falésia e os valores de velocidades chegaram a 11,3 m/s e 11,7 m/s para o caso 2 e a 11,8 m/s e 12,4 m/s para o caso 3a em $0,3 h_{TMI}$ e $0,6 h_{TMI}$ m acima do ponto mais alto da falésia (identificado pela letra A nas Figuras 5.8b e 5.8c). Em ambos os casos observaram-se locais pontuais de aceleração e de desaceleração do escoamento ao longo da topografia.

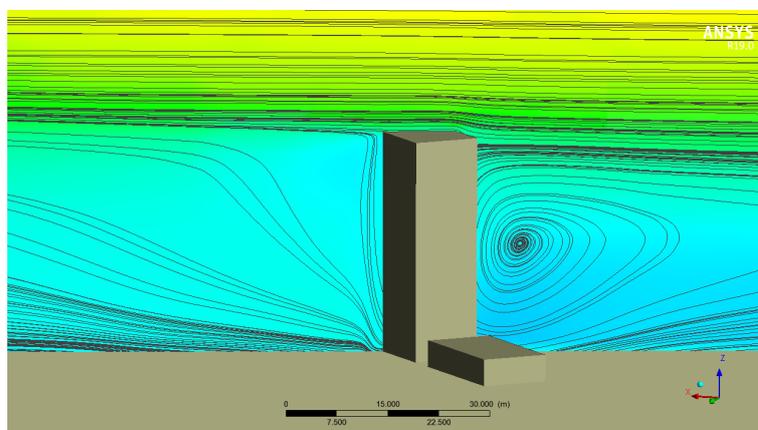
Logo após a falésia (indicado como B nas Figuras 5.8b e 5.8c), há um pequeno rebaixamento no terreno onde o escoamento apresenta velocidades mais baixas. Nos 5 primeiros metros de altura a partir do nível do solo, as velocidades nesse ponto variaram entre 0,0 m/s e 5,7 m/s no caso 2 e entre 0,0 m/s e 4,1 m/s no caso 3a. Em toda a extensão do domínio até a TMI as velocidades próximas ao solo foram menores para o caso 3a, o que se justifica pela presença da rugosidade superficial. A inserção da rugosidade provoca o deslocamento do perfil de velocidades e desacelera o escoamento próximo à superfície.

A Figura 5.9 apresenta os contornos de energia cinética turbulenta na falésia para os casos 1 e 3a. O campo de ECT segue o mesmo padrão do campo de velocidade para o caso 1 (Figura 5.9a). Na região de separação do escoamento são observados os maiores valores de energia cinética turbulenta, com valor máximo de $7,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Isso é devido aos altos gradientes de velocidade média formados nessa região, que provocam a instabilidade do escoamento e a separação da camada de cisalhamento (SAEEDI; LEPOUDRE; WANG, 2014). No caso 3a (Figura 5.9b), a ECT é maior na região onde há uma aceleração do escoamento, ou seja, no ponto mais alto da falésia, chegando a $3,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$, menor se comparado ao caso 1. Os valores de ECT para o caso 2 ficaram abaixo de $0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e, por isso, as imagens não foram apresentadas.

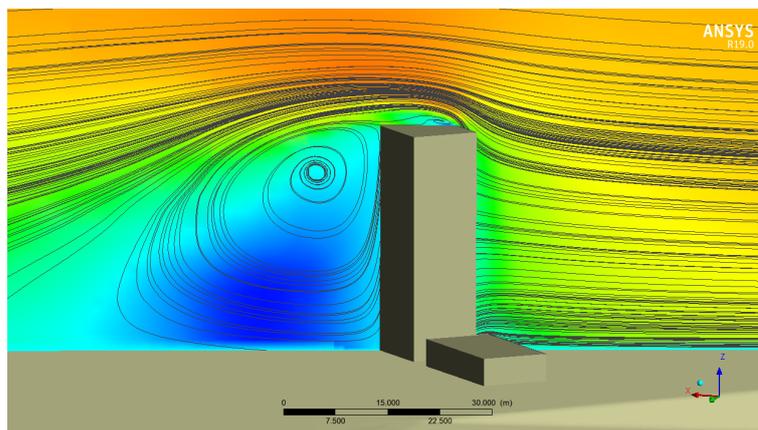
A Figura 5.10 apresenta a distribuição de velocidade média e as linhas de corrente na TMI para os três casos, considerando um plano longitudinal na direção do escoamento. Para o caso 1 (Figura 5.10a), o escoamento separado na falésia não alcançou seu ponto de recolamento quando passa pela TMI. Então, a presença do prédio retarda seu recolamento. Duas zonas de recirculação com baixas velocidades são observadas: à montante e à jusante da TMI. Em $0,5 h_{TMI}$ à montante da TMI, as velocidades variaram entre -1,1 m/s e 4,2 m/s. Em $0,5 h_{TMI}$ à jusante da TMI, as velocidades obtidas foram entre 0,0 m/s e 2,3 m/s. Isso também pode ser verificado por meio dos vetores apresentados na Figura 5.11a. As velocidades ao redor da TMI são mais baixas nessa situação se comparadas aos demais casos.

Para os casos 2 e 3a (Figuras 5.10b e 5.10c) algumas características típicas do escoamento ao redor de um obstáculo são observadas. O escoamento incidindo na TMI é separado pela presença do obstáculo, formando a região de estagnação. Na borda superior observa-se uma aceleração do escoamento e seu descolamento do prédio. Um fluxo reverso é formado no teto. Atrás do obstáculo é possível observar a tendência do escoamento ao seu recolamento. Nessa região também é formada uma zona de recirculação caracterizada por valores negativos de velocidade na direção principal do escoamento. Esse padrão de escoamento também pode ser visto nas Figuras 5.11b e 5.11c e foi observado em estudos de escoamento ao redor de prédios altos

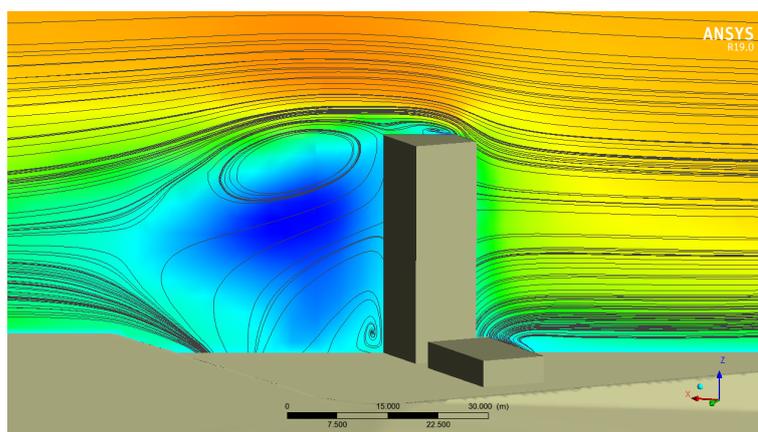
Figura 5.10 – Linhas de correntes na direção do escoamento ao redor da TMI: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.



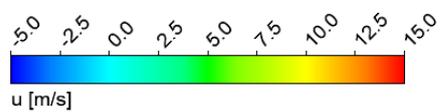
(a)



(b)

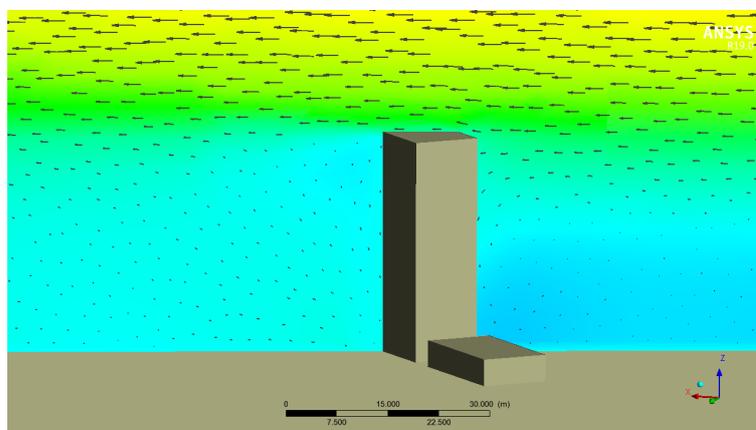


(c)

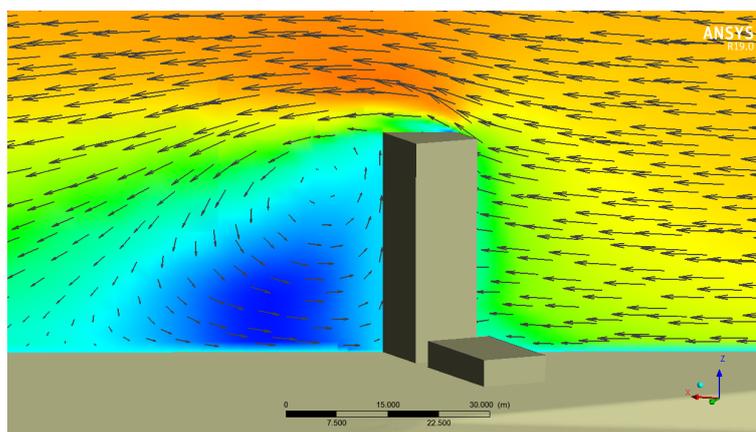


Fonte: Produzido pela autora (2020)

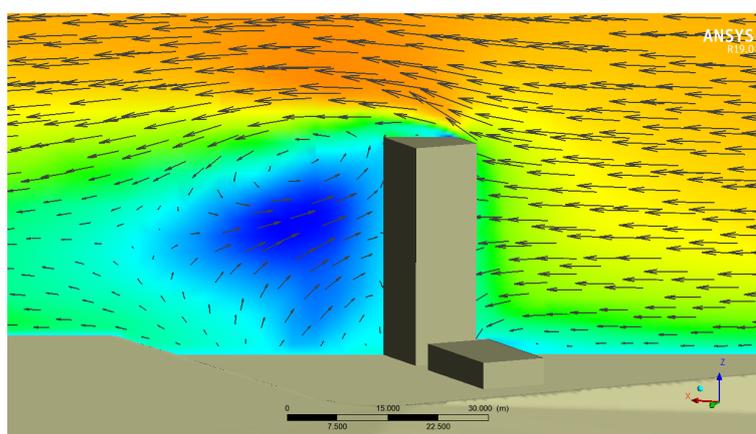
Figura 5.11 – Vetores velocidade no plano XZ passando pela TMI: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.



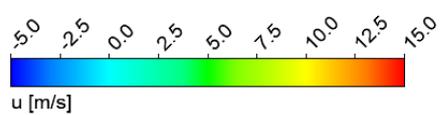
(a)



(b)



(c)



Fonte: Produzido pela autora (2020)

(SAEEDI; LEPOUDRE; WANG, 2014; JOUBERT; HARMS; VENTER, 2015). Para o caso 2, em $0,5 h_{TMI}$ à montante da TMI as velocidades variaram entre 0,0 m/s e 9,5 m/s. Já no caso 3, as velocidades obtidas à montante da TMI (em $0,5 h_{TMI}$) foram entre 0,0 m/s e 11,2 m/s. As velocidades próximas ao solo à montante da TMI são mais baixas para o caso 3a.

É possível observar que o padrão da zona de recirculação atrás da TMI apresentou diferenças para os casos 2 e 3a. No caso 2 é formada uma única zona de fluxo reverso, com centro na região superior da TMI. Enquanto que para o caso 3a duas regiões de fluxo reverso são formadas, uma na parte superior da TMI e outra na região inferior. As velocidades em $0,5 h_{TMI}$ à jusante da TMI ficaram em torno de -4,2 m/s e 7,3 m/s para o caso 2 e entre -3,5 m/s e 7,3 m/s para o caso 3a.

A Figura 5.12 apresenta os contornos de ECT ao redor da TMI na direção do escoamento para os três casos analisados. Comparando as Figuras 5.9a e 5.12a, observa-se que para o caso 1 os maiores valores de ECT estão na zona de separação do escoamento na falésia. Ao redor da TMI (Figura 5.12a) os maiores valores foram observados na borda superior da face frontal, onde há uma pequena separação da camada limite. Nessa região a ECT máxima está em torno de $5,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

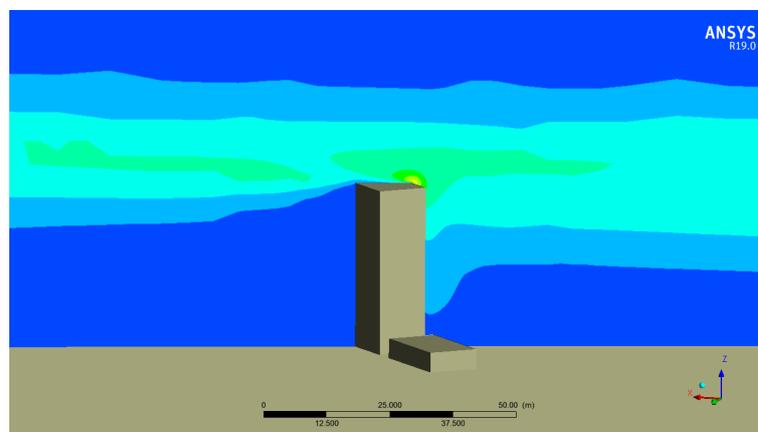
Diferente do caso 1, para os casos 2 e 3a os maiores valores de ECT ocorreram nas regiões de separação e recirculação do escoamento na TMI. Para o caso 2 (Figura 5.12b), os valores máximos de energia cinética turbulenta foram de $6,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na zona de separação e de $4,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na zona de recirculação. Para o caso 3 (Figura 5.12c), as máximas foram de $4,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $5,7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ nas zonas de separação e recirculação, respectivamente.

Comparando os casos 2 e 3a, atrás da TMI a ECT foi maior na região inferior, mais próximo ao solo, para o caso 2 e na região superior, mais próxima ao topo do prédio, para o caso 3a.

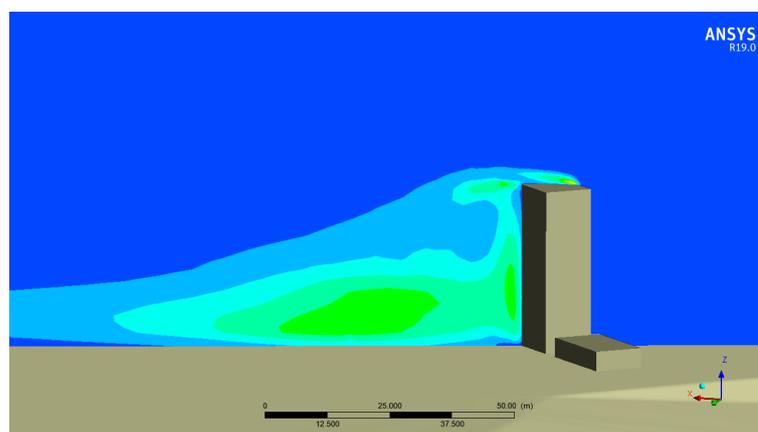
A Figura 5.14 apresenta o comportamento de 6 perfis de velocidade (T1 a T6) traçados ao longo do plano xz para os casos 1 a 3a. A localização dos perfis está identificada na Figura 5.13. Observa-se na Figura 5.14a que o escoamento é perturbado pela presença da falésia. Para o caso 1, abaixo de $0,8 z/h_{TMI}$ as velocidades variaram de -0,1 a $0,8 u/\bar{U}$ e foram menores se comparadas ao perfil de entrada, que, para a mesma altura, possui velocidades entre 0,7 e $0,9 u/\bar{U}$. Acima de $0,8 z/h_{TMI}$ o escoamento é acelerado e as velocidades são mais elevadas se comparadas com o perfil de entrada.

Nos casos 2 e 3a o perfil é modificado ao passar pela falésia, porém de forma menos acentuada se comparado ao caso 1. Nos dois casos é observado o mesmo comportamento do perfil de entrada, porém, com velocidades mais elevadas em todas as alturas acima de $0,2 z/h_{TMI}$. Ao passar pela falésia, o escoamento é acelerado e atinge velocidades de $0,9 u/\bar{U}$ para ambos os casos na altura de $0,5 z/h_{TMI}$. À montante da falésia a velocidade nessa mesma altura ($0,5 z/h_{TMI}$) é de $0,8 u/\bar{U}$. Ou seja, houve um aumento em torno de $0,1 u/\bar{U}$. O mesmo padrão foi observado por Pires et al. (2010). Os autores identificaram que na falésia, o escoamento médio é perturbado e sofre uma aceleração.

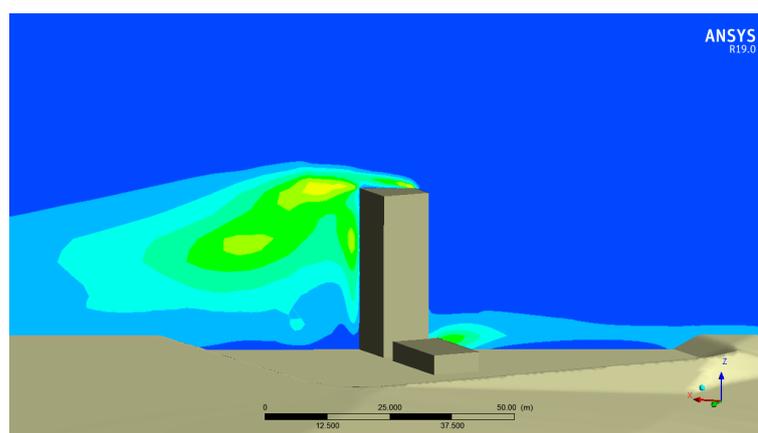
Figura 5.12 – Energia cinética turbulenta ao redor da TMI: a) caso 1, b) caso 2 e c) caso 3a.



(a)



(b)

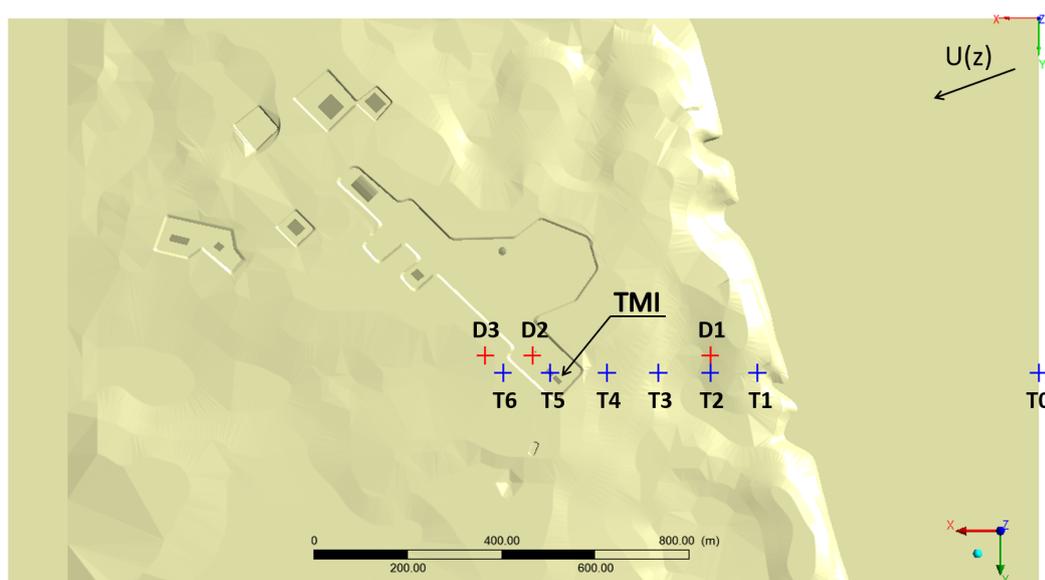


(c)



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Figura 5.13 – Localização dos perfis traçados ao longo do domínio.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

A topografia ao longo do domínio provoca alterações nos perfis, principalmente próximo ao solo. Porém, em todos os casos 1, 2 e 3a, a presença da falésia foi o principal elemento a interferir no escoamento atmosférico do CLA.

Em todos os perfis apresentados na Figura 5.14 observa-se que os resultados para os casos 2 e 3a são muito semelhantes, principalmente nas alturas acima de $0,5 z/h_{TMI}$. Abaixo de $0,5 z/h_{TMI}$, ou seja, mais próximo ao solo, as velocidades para o caso 3a são menores do que para o caso 2. A presença da rugosidade superficial deslocou o perfil de velocidades e desacelerou o escoamento próximo à superfície.

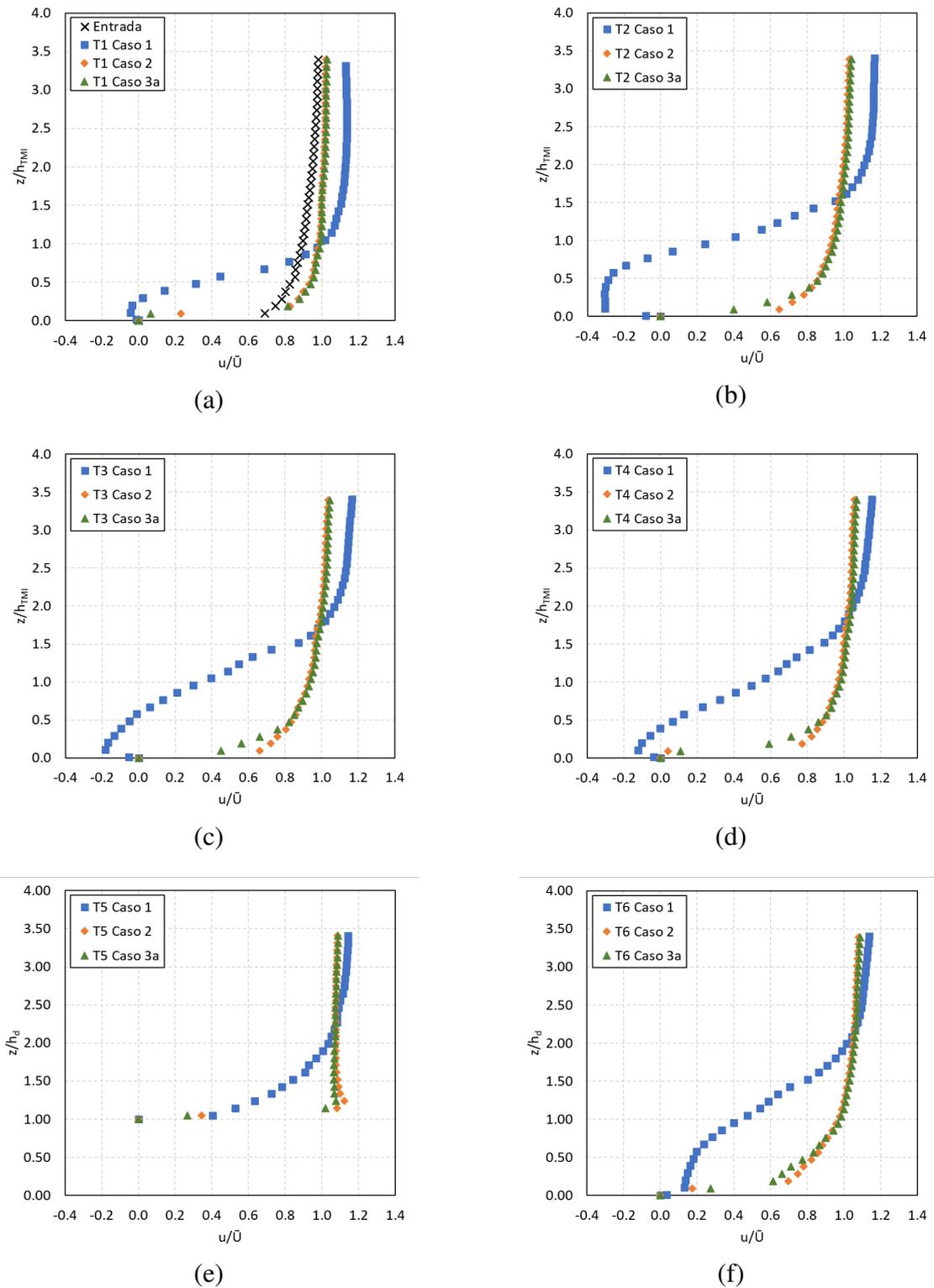
As velocidades para o caso 1 são maiores se comparado aos casos 2 e 3a para alturas mais elevadas. Ao longo do domínio, essa diferença diminui e no perfil T6, após a TMI, as velocidades acima de $2,0 z/h_{TMI}$ para todos os casos 1, 2 e 3a são próximas a $1,0 u/\bar{U}$.

Considerando o perfil traçado acima da TMI (Figura 5.14e), para o caso 1, a presença da TMI não causou alterações significativas no perfil de velocidade. Para os casos 2 e 3a o escoamento é acelerado pela presença do obstáculo. Essa aceleração é ligeiramente mais acentuada no caso 2, com velocidades cerca de $0,1 u/\bar{U}$ maiores para esse caso.

Uma última análise foi feita comparando os resultados das simulações numéricas com as medições em campo de Marciotto, Fisch e Medeiros (2012). A Tabela 5.2 mostra que as velocidades calculadas no caso 1 foram as mais discrepantes em comparação às velocidades medidas, seguido do caso 2. Os erros relativos mínimos para os casos 1 (44,4%) e 2 (14,8%) foram maiores que o erro relativo máximo obtido para o caso 3a (14,3%). Os erros relativos máximos para os primeiros casos passaram de 50,0%.

Pôde-se analisar também os resultados dos casos 1 a 3a em comparação com as medições da

Figura 5.14 – Perfis de velocidade u média ao longo do plano xz para os casos 1, 2 e 3a nas posições: a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, e) T5, f) T6. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m) e \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s).



Fonte: Produzido pela autora (2020)

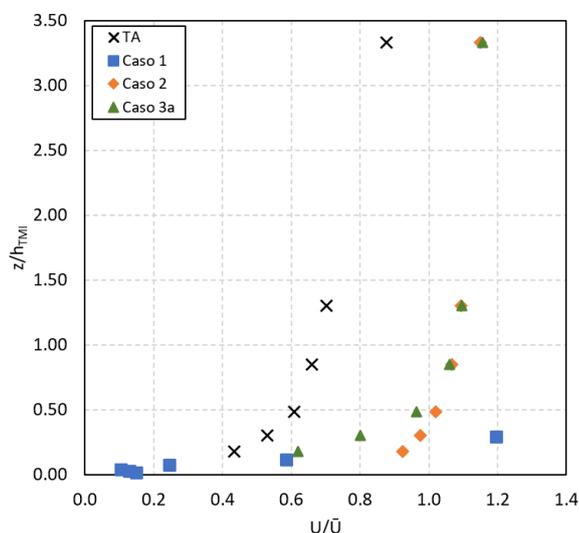
Tabela 5.2 – Comparação entre as medições de campo (U_{med}) e os resultados das simulações numéricas (U_{sim}) para os casos 1, 2 e 3a utilizando o modelo $\kappa - \varepsilon$. ER é o erro relativo entre os resultados, dado em %.

Ponto	U_{med} (m/s)	U_{sim} (m/s)			ER (%)		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3a	Caso 1	Caso 2	Caso 3a
1	7,5	3,7	11,3	8,6	50,2	50,5	14,3
2	8,3	4,0	11,3	8,5	52,1	35,4	1,8
3	8,2	4,2	11,2	8,4	48,6	36,4	1,9
4	8,0	4,5	11,2	8,3	44,4	39,1	3,5
5	8,3	4,0	11,2	8,6	52,0	36,0	4,5
6	8,2	4,2	11,2	8,5	49,0	35,7	3,5
7	8,3	4,4	11,1	8,5	46,7	33,5	1,5
8	8,6	4,2	11,1	8,6	51,7	28,9	0,4
9	8,9	4,4	11,1	8,6	50,2	24,8	3,5
10	9,6	4,7	11,0	8,7	54,3	14,8	9,5
Média	8,4	4,2	11,2	8,5	49,9	33,5	4,4
Mínimo	7,5	3,7	11,0	8,3	44,4	14,8	0,4
Máximo	9,6	4,7	11,3	8,7	54,3	50,5	14,3

Fonte: Produzido pela autora (2020)

torre anemométrica do CLA (Figura 5.15). A Figura 5.15 mostra que o perfil de velocidades calculado para o caso 1 teve um comportamento bem divergente em relação ao perfil da torre anemométrica. A inserção da topografia (casos 2 e 3a) melhorou sua performance. Além disso, comparando os casos 2 e 3a, percebe-se que a vegetação proporcionou uma redução entre 2 e 3,5 m/s nas velocidades próximas ao solo e, conseqüentemente, um melhor desempenho em relação as medições locais.

Figura 5.15 – Comparação entre as velocidades medidas na torre anemométrica do CLA e calculadas nas simulações numéricas para os casos 1, 2 e 3a. h_{TMI} é a altura da TMI (33 m) e \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s).



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Diante das análises feitas, concluiu-se, portanto, que incorporar nas simulações numéricas os elementos que caracterizam a superfície do Centro de Lançamento de Alcântara (topografia e vegetação) é importante para identificar os padrões do escoamento na região. Simplificações podem acarretar em modificações significativas no campo de velocidades e de energia cinética turbulenta.

5.3.2 Influência da direção do vento incidente no escoamento atmosférico do CLA

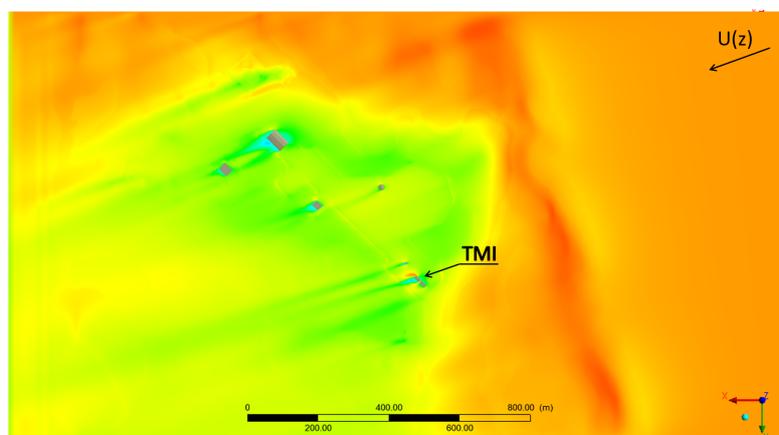
Os casos 3a, 3b e 3c, representando as direções do vento incidente de 70° , 45° e 90° , respectivamente, foram analisados a fim de estudar a influência da direção do vento no escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara. Essas direções foram definidas de acordo com o valor médio de 70° , obtido dos dados de reanálise FNL para o dia 20/09/2008, e de acordo com os ventos predominantes na região: ventos de nordeste e leste (MEDEIROS et al., 2013; COUTO; FISCH, 2018). Para todos os casos foi utilizado o mesmo perfil de velocidades na entrada, também definido a partir dos dados de reanálise FNL, com velocidade média de 11,5 m/s (mais detalhes na seção 4.2.4).

A Figura 5.16 apresenta os planos horizontais xy de velocidade média para os três casos analisados, traçados próximo ao solo, na altura de $0,1 z/h_{TMI}$, com z medido a partir da altitude de 40 metros e h_{TMI} correspondendo à altura da TMI (33 metros).

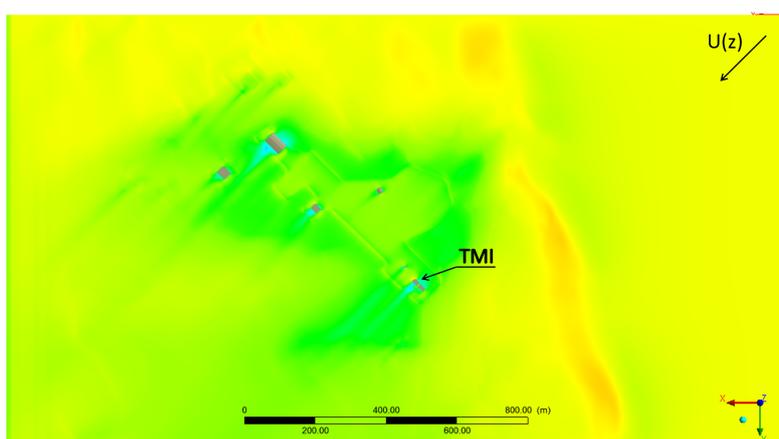
Analisando-se o caso 3a (Figura 5.16a), ou seja, direção do vento de 70° , é possível observar que o relevo e os prédios modificam o escoamento no CLA. Verifica-se uma aceleração em toda a extensão da falésia, com velocidades chegando a valores próximos à 11,8 m/s nessa região. Na entrada lateral (lateral direita) também há uma aceleração do escoamento causado pelas diferenças de altitudes nesse local, mostradas na seção 5.1. As velocidades diminuem ao se aproximar do setor de preparação e lançamento (SPL). O escoamento alcança o SPL com velocidades próximas à 3,5 m/s e é perturbado tanto pela topografia quanto pelos prédios. Todos os prédios causam perturbações no escoamento, sendo mais significativas nos prédios mais largos e altos como a TMI. O escoamento contorna melhor a casamata, que possui formato octogonal. Como pode ser observado na Figura 5.17a, ao redor dos obstáculos zonas típicas são formadas: o escoamento que incide nos prédios é acelerado e separado lateralmente. Os valores de velocidade nesses locais chegam a 10,5 m/s na TMI e 9,0 m/s na torre de escape. As linhas de corrente que contornam os obstáculos se abrem e uma zona de recirculação é formada com grandes vórtices de baixa velocidade. A região atrás da TMI e da torre de escape é caracterizada por dois vórtices reversos assimétricos opostos, chegando a valores mínimos de velocidade de, aproximadamente, -2,5 m/s. A casa de apoio influencia a característica desses vórtices à jusante da TMI.

Saeedi, LePoudre e Wang (2014) analisaram a esteira turbulenta formada em um escoamento com alto número de Reynolds, da ordem de 10^4 , ao redor de um prédio alto e verificaram que a esteira se espalha amplamente atrás do obstáculo e exhibe movimentos de vórtices complexos e energéticos. Isso também foi observado no presente trabalho, sendo que a esteira turbulenta dos

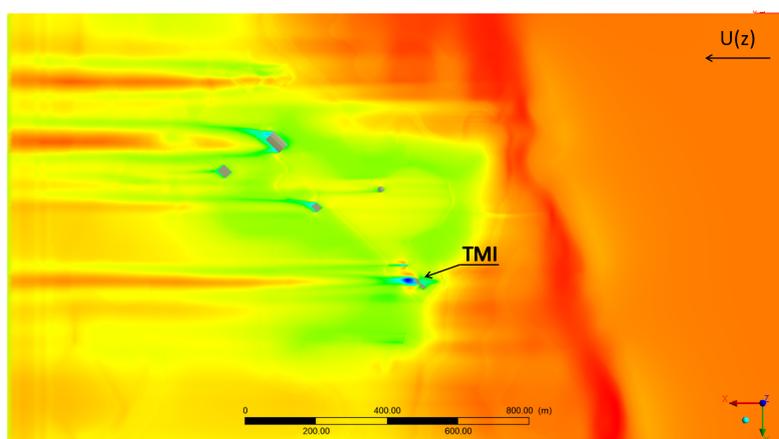
Figura 5.16 – Campos de velocidade média no plano horizontal xy em z/h_{TMI} igual a 0,1: a) caso 3a; b) caso 3b; c) caso 3c. z é a altura do plano a partir da altitude de 40 metros e h_{TMI} é a altura da TMI.



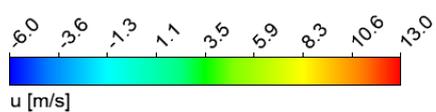
(a)



(b)

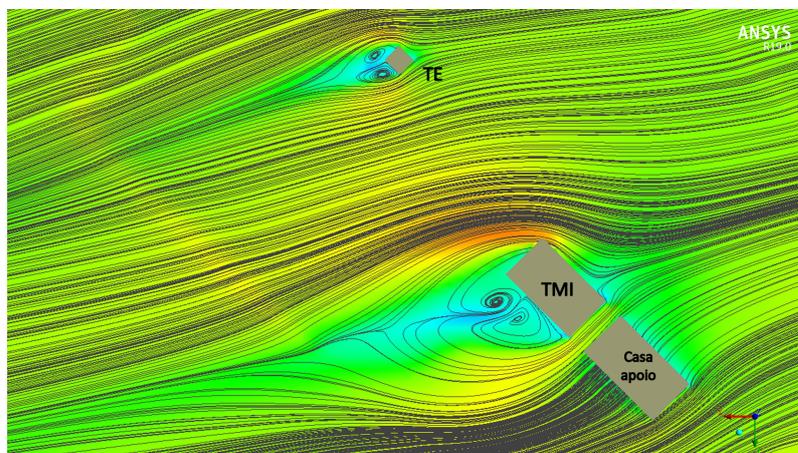


(c)

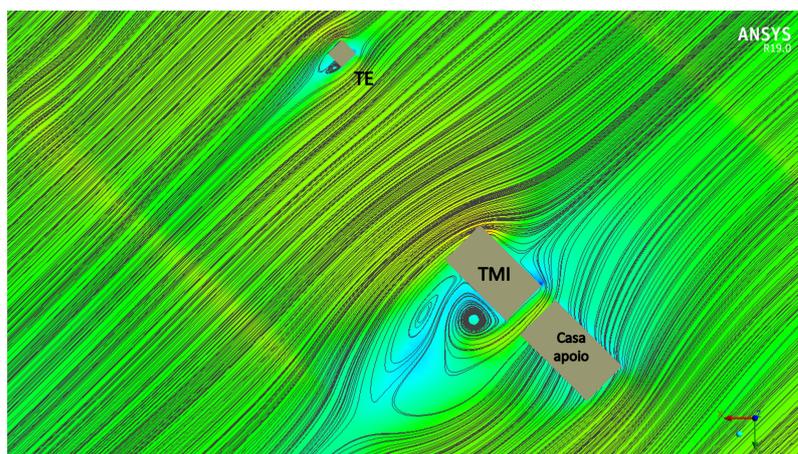


Fonte: Produzido pela autora (2020)

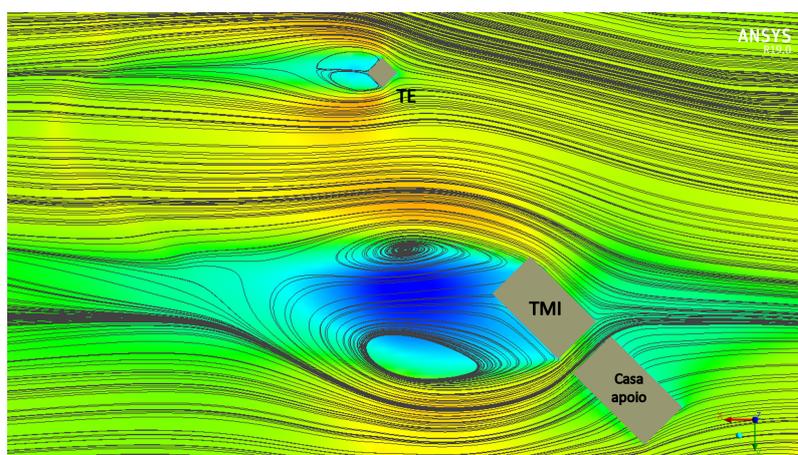
Figura 5.17 – Linhas de corrente ao redor da TMI e da torre de escape no plano horizontal xy em z/h_{TMI} igual a 0,1: a) caso 3a; b) caso 3b; c) caso 3c. z é a altura do plano a partir da altitude de 40 metros e h_{TMI} é a altura da TMI.



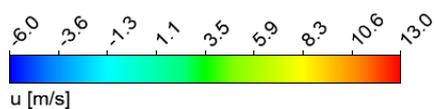
(a)



(b)



(c)



Fonte: Produzido pela autora (2020)

prédios se estendeu ao longo do domínio, na direção do vento. No caso 3a, a esteira da torre de escape exerceu maior influência no local de lançamento dos foguetes.

Padrões similares foram observados no caso 3b (Figura 5.16b), que consiste em um vento incidente à 45°. É possível observar que os locais de menor e maior velocidades seguem a topografia do domínio apresentado na Figura 5.3. Na região da falésia o escoamento é acelerado, porém em menor intensidade se comparado aos casos 3a e 3c (Figuras 5.16a e 5.16c), chegando a valores de velocidade próximos à 9,7 m/s. O mesmo acontece na lateral direita devido ao relevo irregular dessa região. No caso 3b, a aceleração na lateral do domínio também é menos acentuada do que nos demais casos.

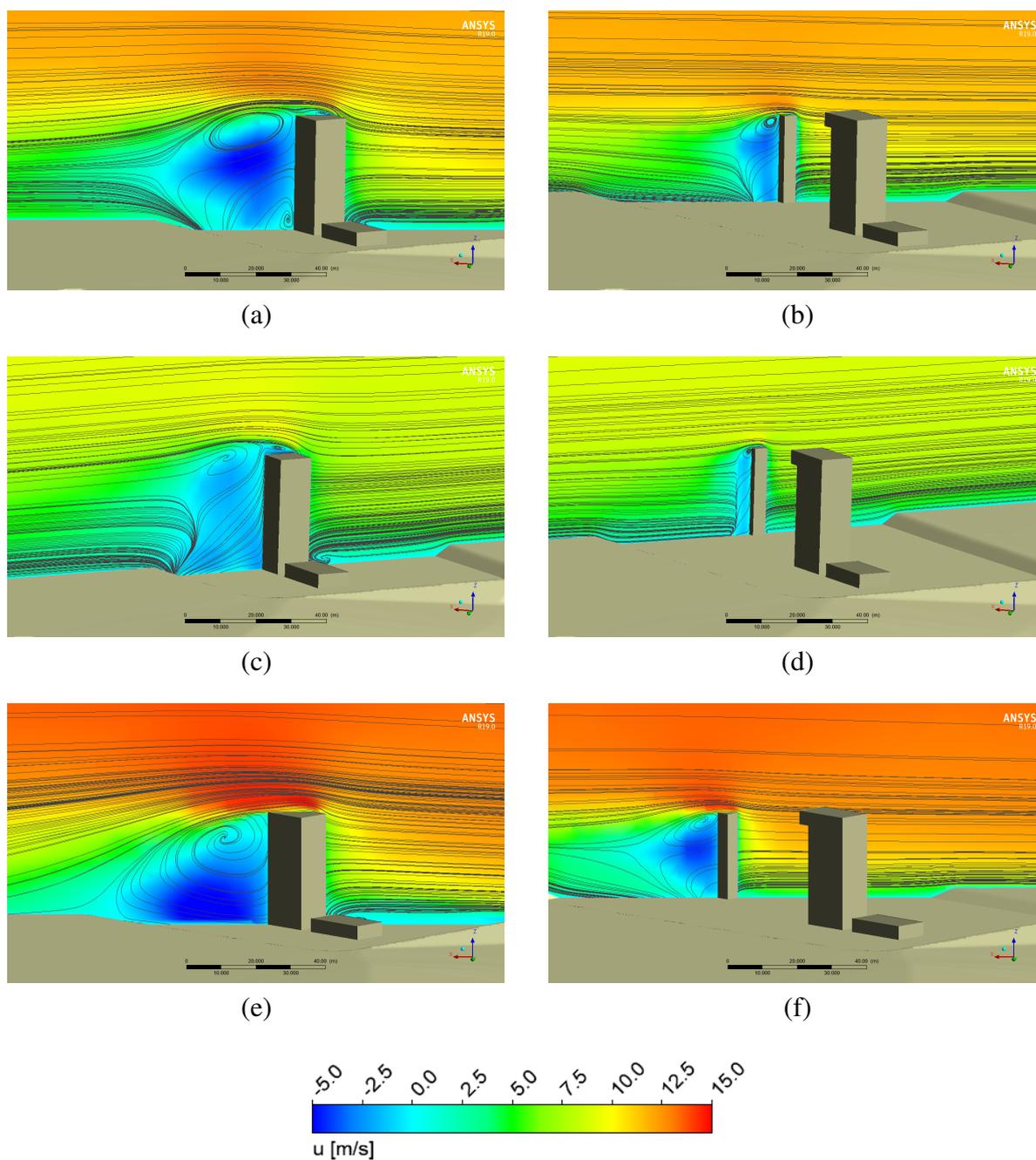
Verifica-se que, no caso 3b, os prédios também modificam o padrão de escoamento na região. Com direção de 45°, o vento incide de forma quase perpendicular na face frontal da TMI e da torre de escape, formando zonas típicas do escoamento ao redor de obstáculos (Figura 5.17b). Na zona de separação da camada limite formada nas laterais dos obstáculos as velocidades chegam a 9,0 m/s na TMI e a 7,5 m/s na torre de escape. Na região de recirculação atrás dos prédios são observados dois vórtices reversos assimétricos, sendo que suas características à jusante da TMI são modificadas pela presença da casa de apoio. Os valores mínimos de velocidade nessa região estão em torno de -2,5 m/s atrás TMI e de -1,0 m/s atrás da torre de escape. A esteira turbulenta desses prédios tem uma menor extensão nesse caso se comparada ao caso anterior.

No caso 3c (Figura 5.16c), ou seja, direção do vento de 90°, o escoamento também é acelerado pela presença da falésia e continua sendo influenciado pela topografia ao longo do domínio. Nesse caso a aceleração é mais acentuada se comparada aos demais casos, com velocidade máxima de 13,1 m/s na falésia. O comportamento do campo de velocidade no caso 3c é distinto se comparado aos demais. Quando passa pelos prédios (Figura 5.16c), o escoamento é perturbado, formando uma zona de separação lateral da camada limite com velocidades máximas em torno de 10,0 m/s na TMI e na torre de escape. Observa-se também uma zona de recirculação mais extensa atrás dos prédios se comparada aos casos 3a e 3b, com velocidades mínimas de -6,3 m/s e -2,0 m/s atrás da TMI e da torre de escape, respectivamente.

Em todos os casos apresentados na Figura 5.16, observou-se que à jusante da TMI e da torre de escape (TE) há a formação de dois vórtices reversos assimétricos opostos, com sua forma e tamanho seguindo as características dos prédios (maior para a TMI) e sendo modificados pela direção do vento.

Observando os planos longitudinais apresentados na Figura 5.18, verifica-se que em todos os casos, o escoamento incidindo na TMI e na torre de escape leva à formação de uma zona de separação vertical da camada limite e uma aceleração local. Nos casos 3a e 3b é possível observar um fluxo reverso no teto da TMI. Atrás dos obstáculos é formada uma região de recirculação, que é mais extensa na TMI, pois o prédio apresenta maiores dimensões.

Figura 5.18 – Linhas de corrente passando pela TMI e pela torre de escape: a,b) caso 3a; c,d) caso 3b; e,f) caso 3c.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Os valores máximos obtidos na região de separação do escoamento acima da TMI foram de, aproximadamente, 12,4 m/s, 9,5 m/s e 14,7 m/s para os casos 3a, 3b e 3c, respectivamente. Observa-se que para direção do vento incidente de 70° e 90°, correspondente aos casos 3a e 3c, a zona de separação na TMI é mais acelerada do que para a direção nordeste de 45°, correspondente ao caso 3b. Também nesses casos é favorecida a geração de uma zona de recirculação mais extensa atrás da TMI e da torre de escape. Nos casos 3a e 3b (Figuras 5.18a e 5.18b), um vórtice

reverso é formado à jusante da TMI, na região próxima ao topo do prédio. No caso 3a, também há a formação de um vórtice no canto inferior à jusante do obstáculo. Já no caso 3c (Figura 5.18c), apenas um vórtice vertical é formado ao longo de toda a altura da TMI.

Na torre de escape é possível observar a formação de um vórtice na região superior do obstáculo para todos os casos. A extensão desse vórtice é modificada pela direção do vento, sendo menor para o caso 3c (45°).

Assim como verificado por Faria, Avelar e Fisch (2019), a direção do vento incidente provoca modificações no escoamento que passa pelos prédios, acentuando ou atenuando as zonas características formadas. Luo et al. (2012) verificaram que o ângulo de incidência é um dos principais fatores que afetam os padrões de escoamento atrás de um obstáculo, além de sua forma (definida pela razão de aspecto).

A Figura 5.19 apresenta os perfis de velocidade, intensidade da turbulência e energia cinética turbulenta traçados ao longo do domínio para os casos 3a-c. A localização de cada perfil está indicada na Figura 5.13 e corresponde a: logo após a falésia (D1), no local de lançamento dos foguetes (D2) e após o local de lançamento (D3). Observando os perfis de velocidade (Figuras 5.19a-c) verifica-se que em todas as posições o caso 3b (45°) apresentou valores de velocidade menores do que os demais casos. O perfil traçado em D1 (Figura 5.19a) apresenta um comportamento logarítmico similar para os três casos. Porém, as velocidades são mais altas para o caso 3b (45°) e mais baixas para o caso 3c (90°).

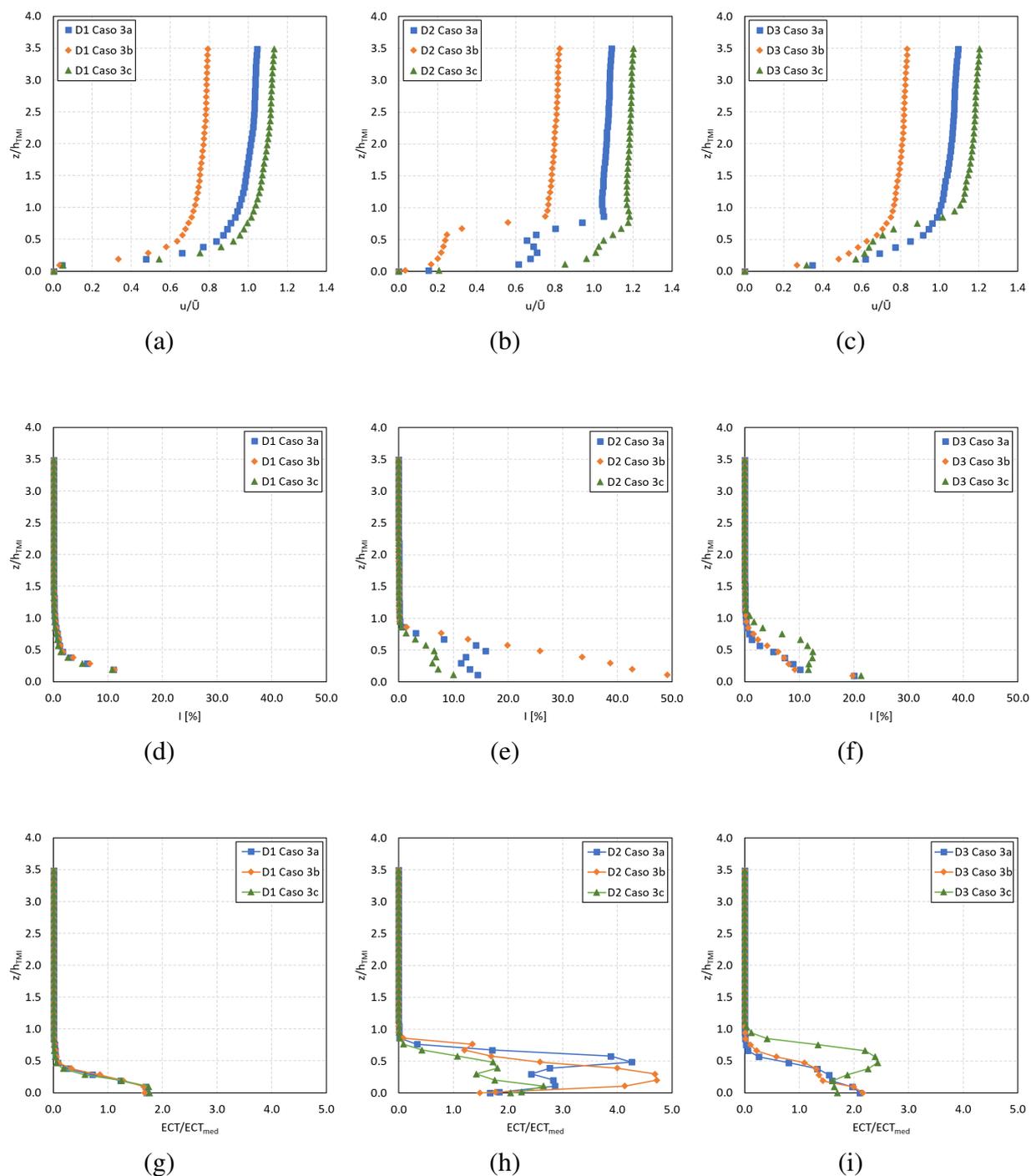
No local de lançamentos dos foguetes (Figura 5.19a) observa-se uma perturbação do escoamento. O perfil D2 traçado nesse ponto possui comportamento irregular. Na região próxima ao solo até a altura de aproximadamente $0,9 z/h_{TMI}$ (equivalente a cerca de 30 metros, ou seja, um pouco mais da altura da torre de escape) houve uma atenuação das velocidades para os casos 3a (70°) e 3b (45°), se comparadas ao perfil D1. A perturbação foi menor para o caso 3c (90°), sendo as velocidades maiores se comparadas ao perfil traçado em D1. Acima de $0,9 z/h_{TMI}$ o escoamento sofreu uma aceleração, resultando em velocidades ligeiramente mais altas em todos os casos, especialmente nos casos 3a e 3c.

A intensidade da turbulência na região abaixo de $0,9 z/h_{TMI}$ foi elevada, alcançando valores de 15,0%, 50,0% e 10,0% adjacente ao solo para os casos 3a, 3b e 3c, respectivamente (Figura 5.19e). O caso 3b, que consiste na direção do vento de 45°, apresentou velocidades mais baixas e maior intensidade da turbulência no local de lançamento dos veículos espaciais, seguido dos casos 3a (70°) e 3b (90°).

Os perfis traçados em D3 (Figura 5.19a), ou seja, logo após o local de lançamento, retomam o comportamento logarítmico para os casos 3a e 3b. No entanto, para o caso 3c, há uma desaceleração do escoamento abaixo de $0,9 z/h_{TMI}$. As velocidades são mais baixas nessa região se comparadas ao perfil em D2. Provavelmente isso aconteceu devido a influência da esteira turbulenta formada atrás da torre de escape que, com o vento à 90°, está em uma direção diferente

em relação aos casos anteriores e atua mais nesse local de aferição. As maiores intensidades da turbulência foram obtidas para o caso 3c. Porém, adjacente ao solo, a intensidade da turbulência para todos os casos foi próximo de 20%.

Figura 5.19 – Perfis de velocidade média (u), intensidade da turbulência (I) e energia cinética turbulenta (ETC) nos pontos D1, D2 e D3. h_{TMI} é a altura da TMI, \bar{U} é a velocidade média na entrada (11,5 m/s) e ECT_{med} é a ECT média na entrada do domínio ($5,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$).



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Os maiores valores de energia cinética turbulenta (ECT/ECT_{med}) no local de lançamento dos foguetes (D2) foram obtidos nas alturas inferiores a $0,7 z/h_{TMI}$ para todos os casos. Seu valor máximo chegou a 4,3 no caso 3a e 4,7 no caso 3b, que correspondem a $2,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e a $2,6 \text{ m}^2/\text{s}^2$, respectivamente. No caso 3c os valores de ECT foram menores, chegando a um máximo de 2,7 ($1,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$).

A partir das análises realizadas, concluiu-se que a direção do vento incidente modifica o padrão de escoamento no CLA, acentuando ou atenuando as regiões mais turbulentas. Os casos 3a e 3b (70° e 45° , respectivamente) mostraram características similares. No entanto, o caso 3c (90°) apresentou mudanças significativas nos campos de velocidade e de energia cinética turbulenta.

5.4 ESTUDO DE CASO DA DISPERSÃO DE HCL NO CLA

Uma importante questão ambiental associada ao lançamento de veículos espaciais consiste na emissão de poluentes provenientes da queima do combustível utilizado (propelente). No CLA, o propelente sólido empregado nos foguetes tem em sua composição 21,6% de cloreto de hidrogênio (HCl), que consiste em um gás altamente prejudicial à saúde humana, e cujos efeitos são percebidos a partir de uma concentração de 5 ppmv (Tabela 5.3). Nascimento, Souza e Moreira (2019) e Schuch e Fisch (2017) estudaram a dispersão atmosférica do poluente HCl proveniente de lançamentos normais e abortados, respectivamente, em mesoescala, considerando um domínio com resolução espacial da ordem de um quilômetro. Os autores observaram concentrações críticas de HCl no setor de preparação e lançamento (SPL).

Tabela 5.3 – Efeitos da exposição ao cloreto de hidrogênio (HCl) na saúde humana.

Limite de exposição à HCl [ppmv]	Período de exposição	Efeitos na saúde humana
1000 - 2000	Curto	Muito perigoso até para curta exposição
50 - 100	1 h	Concentração máxima tolerável
10 - 50	Poucas horas	Concentração máxima tolerável
35	Curto não especificado	Irritação da garganta
10	Prolongado	Concentração máxima tolerável
1 - 5	-	Percepção do odor

Fonte: National Research Council (1998)

Conforme verificado na seção 5.3, as características topográficas do Centro de Lançamento de Alcântara, assim como os prédios do local, modificam os padrões do escoamento atmosférico na região, podendo influenciar, portanto, no processo de dispersão de poluentes. Dessa forma, o presente trabalho foi conduzido por meio de uma maior resolução espacial e temporal no contexto do SPL. Um estudo de caso foi realizado adotando-se a situação hipotética de lançamento

abortado de um veículo lançador de satélites (VLS). O poluente analisado foi o cloreto de hidrogênio (HCl), devido à sua alta taxa de emissão nesse tipo de situação e os riscos associados à exposição a altas concentrações desse poluente.

A fonte de emissão foi representada de forma simplificada, considerando uma emissão a partir do solo em uma área circular de, aproximadamente, 700 m². A emissão ocorreu durante os 300 segundos (5 minutos) iniciais da simulação, a uma taxa de 29,4 kg/s (MOREIRA; TRINDADE, 2010). Foram adotadas condições ambientes de temperatura e pressão: 25°C e 101,3 kPa. As condições topográficas e meteorológicas adotadas foram de acordo com o caso 3a: atmosfera neutra e ventos predominantes à 70°, com média de 11,5 m/s.

A dispersão foi dominada pelas difusões molecular e turbulenta. Forças de empuxo foram desconsideradas, além de reações químicas.

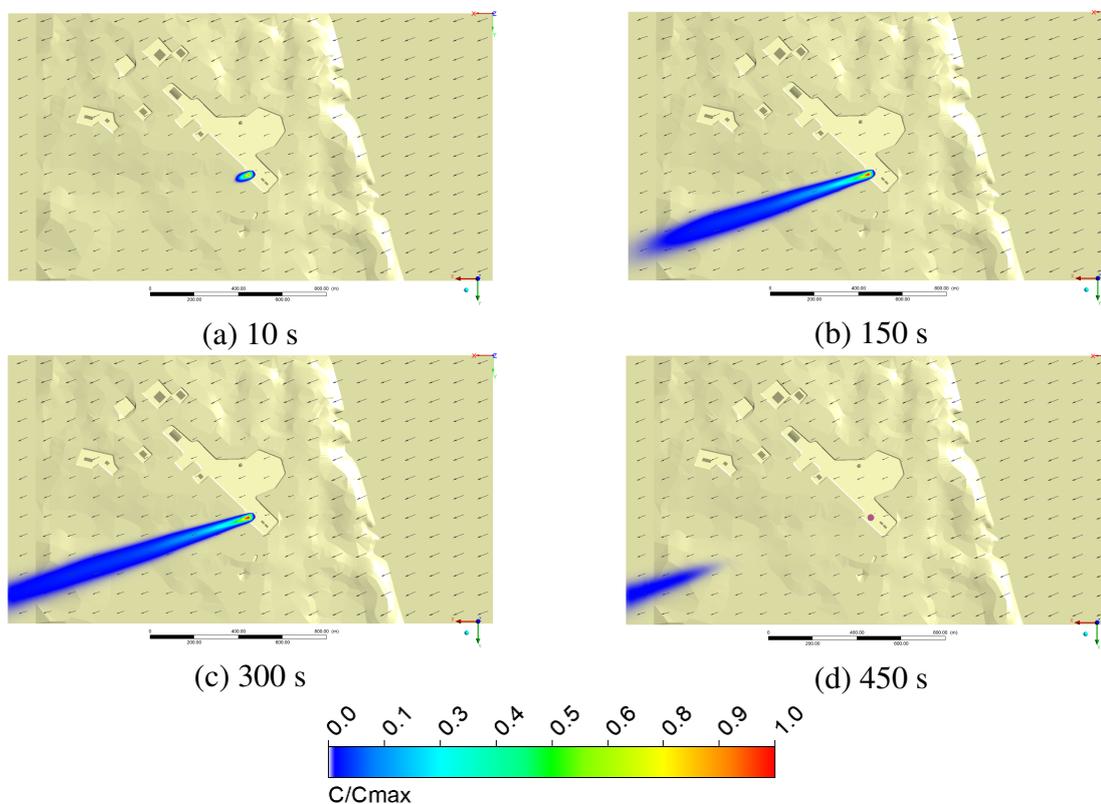
A Figura 5.20 apresenta o desenvolvimento da pluma de HCl ao longo do domínio para diferentes tempos de simulação. Os planos de concentração foram obtidos em z/h_{TMI} igual a 0,1, correspondente à uma altitude 44 m. Como não há dados de concentração de contaminantes disponíveis para efetuar a uma validação dos resultados, foi realizada uma análise qualitativa para avaliar como o sistema de modelagem simula o evento considerado e como a pluma do poluente se comporta dentro do domínio de estudo. Os valores foram normalizados pela concentração máxima obtida na simulação equivalente a 34000 ppmv.

Observa-se que as concentrações máximas foram obtidas próximo à fonte de emissão, na plataforma de lançamento (Figuras 5.20a, b e c). Nos 10 segundos iniciais (Figura 5.20a), apenas essa região é afetada pela pluma do poluente. Conforme o tempo avança, o poluente é transportado e dispersado pelo escoamento e sua pluma é espalhada na direção do vento atmosférico. Em 150 segundos de simulação (Figura 5.20b), concentrações de HCl são verificadas em todo o domínio, na direção de sua pluma. Concluída a emissão (após 300 s), o poluente é dispersado e as concentrações de HCl na plataforma de lançamento diminuem após, aproximadamente, 10 segundos.

O espalhamento da pluma ocorreu na direção do escoamento. Não houve uma dispersão horizontal suficiente para que o poluente atingisse o local onde as operações são comandadas, a casamata, que dista, aproximadamente, 220 metros na direção perpendicular ao vento. Porém, isso pode ter ocorrido apenas devido às simplificações adotadas no trabalho, não sendo possível realizar afirmações conclusivas quanto à segurança das pessoas presentes no local durante os lançamentos.

À medida que pontos mais altos do domínio são observados, os valores de concentração de HCl diminuem. Isso ocorre devido a representação da fonte de emissão como uma fonte de área, na superfície do domínio. A Figura 5.21 mostra o plano longitudinal da pluma de HCl no último instante de emissão (300 s). A pluma é influenciada pela vegetação (representada pelo degrau) que está presente logo após a fonte de emissão. Sua altura máxima é menor do que a altura da

Figura 5.20 – Concentração de HCl em $z = 44$ metros para o tempo de simulação de: a) 10 s, b) 150 s, c) 300 s e d) 450 s.



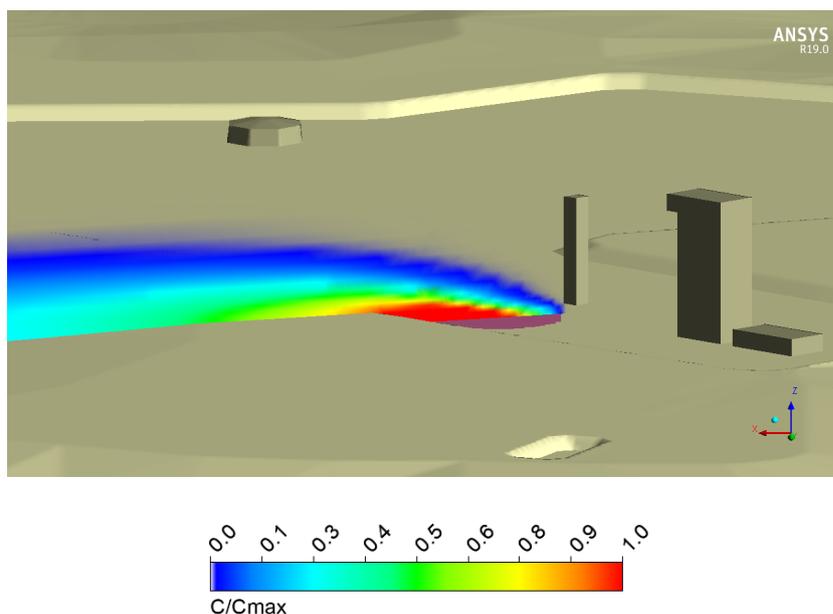
Fonte: Produzido pela autora (2020)

torre de escape. As concentrações de HCl são elevadas no local de lançamento e diminuem à medida que a pluma se dispersa dessa região.

A Figura 5.22 apresenta a variação das concentrações de HCl com o tempo em pontos localizados a 0, 50, 100, 200, 300 e 1000 metros da fonte de emissão, na direção da pluma do poluente. Os pontos estão em uma altura de 1,8 metros a partir da superfície. Os níveis mais altos de concentração são observados nos locais mais próximos ao lançamento. Durante todo o período de emissão (300 s), as concentrações máximas (34000 ppmv) foram obtidas na fonte de emissão (ponto = 0 m). As concentrações em 50, 100, 200 e 300 m a partir da fonte começaram a ser detectadas em cerca de 4, 11, 24 e 36 segundos após o início da simulação. O último ponto monitor (ponto = 1000 m) foi alcançado em, aproximadamente, 114 segundos e a concentração máxima nesse ponto foi de apenas 3,3% (cerca de 1100 ppmv) da concentração máxima no ponto de lançamento (ponto = 0 m). Mesmo à 1000 m da fonte, as concentrações obtidas na saída do domínio chegaram a valores em que o gás é muito perigoso até para uma curta exposição.

Na Figura 5.23 são apresentadas as regiões do domínio onde concentrações críticas de HCl foram observadas. Considerando o instante final da emissão do poluente (300 segundos), a concentração de 5 ppmv, cujo efeito é a percepção do odor do HCl, foi verificada em todo o domínio de estudo na pluma formada na direção do escoamento. As concentrações de 35 e 50 ppmv, cujos efeitos

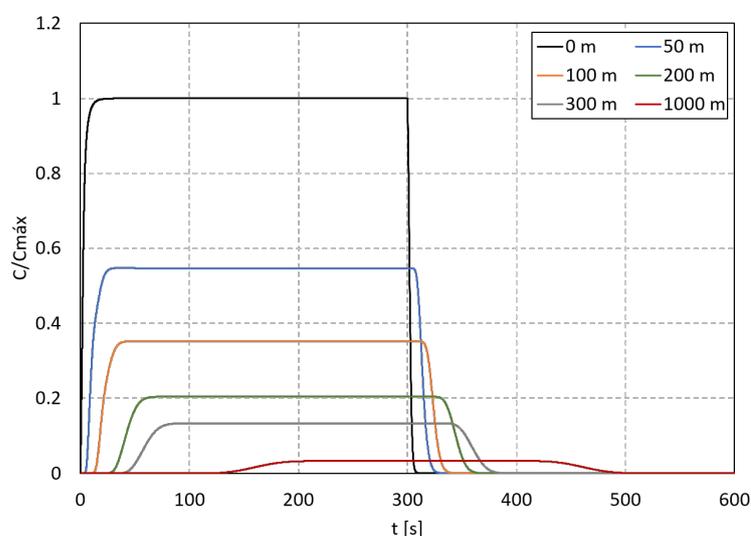
Figura 5.21 – Pluma de HCl no plano longitudinal à direção do escoamento.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

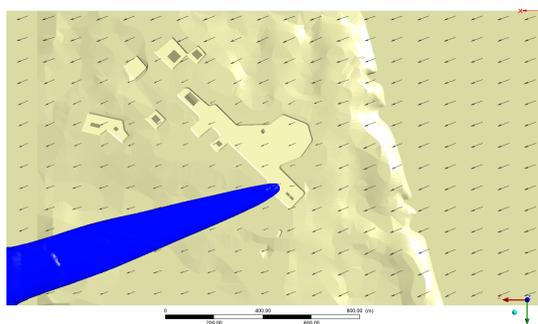
são sentidos em uma exposição de poucas horas, também foram verificadas ao longo de toda a pluma. A concentração de 1000 ppmv, perigosa até para curta exposição, foi observada em uma grande porção do domínio. Portanto, durante todo o período de queima do poluente e até algum tempo depois, é necessário que não haja trânsito de pessoas na região do SPL. Apesar de nenhum dos prédios do SPL ter sido afetado pela pluma do poluente, é necessário que haja cautela, pois o trabalho considerou um estudo de caso com condições simplificadas e apenas resultados preliminares foram obtidos.

Figura 5.22 – Concentração ao longo do tempo em diferentes pontos do domínio em 0, 50, 100, 200, 300 e 1000 m de distância da fonte de emissão, na direção da pluma de HCl.

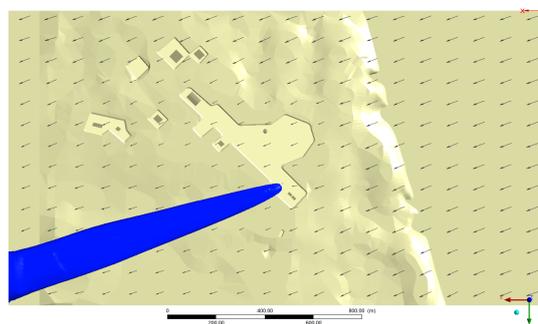


Fonte: Produzido pela autora (2020)

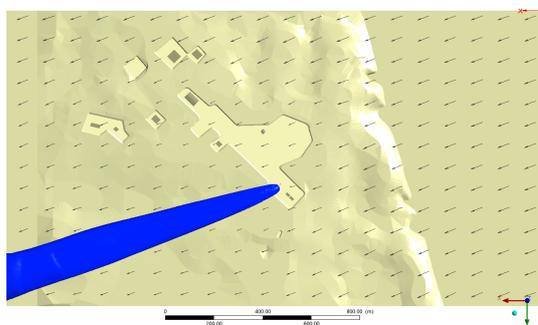
Figura 5.23 – Isosuperfícies de concentrações críticas de HCl no instante 300 s: a) 5 ppmv, b) 35 ppmv, c) 50 ppmv e d) 1000 ppmv.



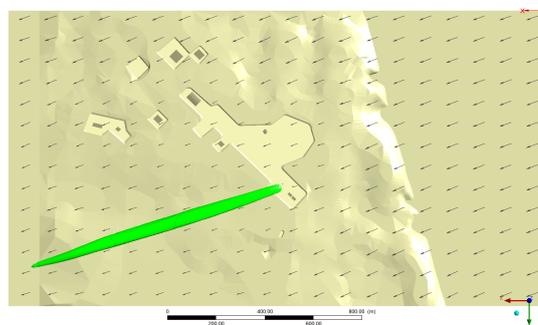
(a) 5 ppmv



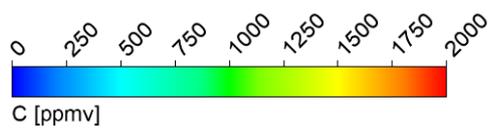
(b) 35 ppmv



(c) 50 ppmv



(d) 1000 ppmv



Fonte: Produzido pela autora (2020)

6 CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho, buscou-se obter um aprofundamento no entendimento das características do escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), considerando uma representação real da topografia da região. Espera-se que os resultados da pesquisa possibilitem a implementação de estudos de dispersão de poluentes emitidos no lançamento de foguetes.

Estudou-se o escoamento atmosférico no CLA considerando uma alta resolução espacial e utilizando dinâmica dos fluidos computacional. Inicialmente, avaliou-se como o escoamento é modificado ao representar de forma mais detalhada a geometria do local. Para isso, três diferentes cenários foram simulados. Caso 1: domínio com a topografia simplificada, caso 2: domínio com a topografia complexa e casos 3: acrescentando-se também uma rugosidade superficial característica. A geometria simplificada considerou todo o CLA com uma superfície plana, além da presença da falésia de 40 metros, representada por um degrau de 90°. A topografia complexa foi desenvolvida a partir de dados de superfície obtidos da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), com uma resolução de 30 metros. A representação da vegetação foi feita elevando-se em 3 metros a superfície e inserindo uma rugosidade superficial característica.

Considerando o caso com a topografia real do CLA (caso 3a), dois modelos de turbulência, $\kappa - \varepsilon$ realizável e RSM (modelo das tensões de Reynolds), foram testados a fim de avaliar suas respostas em relação ao estudo do escoamento atmosférico na região. No campo de velocidade, os resultados para os dois modelos foram similares, apresentando velocidades próximas às medidas em campo. O erro relativo máximo entre os resultados das simulações numéricas e as medições em campo foi de 14,3% para o modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável e 15,2% para o modelo RSM. Em relação aos dados medidos na torre anemométrica, ambos os modelos superestimaram as velocidades, com uma média de 3,6 m/s. O modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável representou bem o campo de velocidade e exigiu um tempo computacional cerca de 50% menor em relação ao modelo RSM, por isso foi utilizado para a solução do problema do escoamento e da dispersão atmosférica no CLA.

Avaliando os diferentes cenários simulados, concluiu-se que a variação topográfica do CLA influenciou o padrão do escoamento atmosférico em locais importantes como o setor de preparação e lançamento (SPL) dos veículos espaciais. Em todos os casos 1, 2 e 3a, a presença da falésia foi um dos principais elementos responsáveis pela modificação do escoamento na região. A falésia de 40 metros de altura representada por um degrau (caso 1), provocou uma mudança mais acentuada no perfil de velocidades oriundo do oceano se comparado aos demais casos. Ao passar pela falésia, uma zona de separação da camada limite é formada e o escoamento é acelerado na região. Além disso, duas zonas de recirculação são formadas: à montante e à jusante da falésia, com baixas velocidades. Nesse caso, o escoamento no SPL apresenta intensa recirculação e velocidades mais baixas. Considerando o relevo real (casos 2 e 3a), a mudança de topografia

foi menos abrupta e, portanto, o escoamento acompanhou melhor a geometria da falésia. Ao longo do domínio, as velocidades próximas à superfície foram menores para o caso 3a, ou seja, com a inserção da vegetação, pois o perfil de velocidades é deslocado nessa situação causando uma desaceleração nas regiões adjacentes ao solo. O caso que melhor representou o escoamento no CLA, avaliando isso a partir dos dados de velocidade medidos em campo, foi o caso 3a. No caso 3a, o escoamento atmosférico foi modificado ao passar pela falésia e, ao longo do domínio, apresentou locais pontuais de aceleração, principalmente onde variações mais significativas no relevo foram observadas. O escoamento no SPL também é perturbado pela presença dos prédios. Ao redor da TMI e da torre de escape são formadas zonas de separação vertical e lateral do escoamento e zonas de recirculação à jusante dos prédios. A esteira turbulenta atrás dos prédios gera uma interferência local no escoamento, podendo se estender por muitos metros ao longo do domínio.

Em um segundo momento avaliou-se a influência da direção do vento incidente no escoamento atmosférico do CLA. O caso com a topografia mais complexa foi adotada nessas simulações (caso 3), já que apresentou os melhores resultados em relação às medições em campo. Três diferentes direções do vento foram consideradas: 70°, 45° e 90°, de acordo com os ventos predominantes na região: ventos nordeste e leste, correspondendo aos casos 3a, 3b e 3c, respectivamente. A partir das análises realizadas, concluiu-se que a direção do vento incidente modifica o padrão de escoamento no CLA, acentuando ou atenuando as regiões mais turbulentas ao longo do domínio e ao redor dos prédios. Os casos 3a e 3b (70° e 45°, respectivamente) mostraram características similares. No entanto, o caso 3c (90°) apresentou mudanças significativas nos campos de velocidade e de energia cinética turbulenta. O padrão do escoamento ao redor dos prédios é modificado de acordo com a direção do vento incidente. Para a direção de 70° e 45°, a esteira turbulenta da torre de escape é a que mais interfere no local de lançamento dos foguetes. Já para a direção do vento de 90°, a esteira da TMI é a que gera maior interferência.

Por fim, analisou-se a dispersão de HCl proveniente da emissão de um foguete do porte do VLS por meio de um estudo de caso hipotético, considerando um lançamento abortado. As concentrações máximas do poluente foram obtidas próximo à fonte de emissão, na plataforma de lançamento, e seus valores chegaram a 34000 ppmv, muito acima da concentração crítica perigosa para curta exposição. A pluma do poluente se dispersou na direção do vento, não havendo espalhamento horizontal suficiente para atingir o local onde as operações são comandadas, a casamata. Isso pode ter ocorrido devido às simplificações adotadas no estudo de caso. A pluma de HCl levou menos de 10 minutos (520 segundos) para sair do domínio de estudo.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em relação ao estudo do escoamento atmosférico no CLA, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Realização de um estudo topográfico na região do CLA visando a obtenção de dados de

relevo com alta resolução. Dessa forma, uma melhor representação da falésia costeira poderá ser utilizada nas simulações numéricas;

- Adoção de uma nova abordagem para representar a vegetação presente no CLA;
- Realização de uma simulação numérica com dados de meteorologia que simulem diferentes cenários de condições atmosféricas da região.

Em relação ao estudo da dispersão de poluentes emitidos no lançamento de veículos espaciais, recomenda-se:

- Aprimorar a representação da fonte de emissão, considerando a trajetória vertical do foguete na camada limite planetária;
- Incluir as condições reais de pressão e temperatura na emissão de poluentes;
- Realizar uma campanha experimental completa destinada à coleta de dados de dispersão e concentração de poluentes emitidos no lançamento dos foguetes lançados no CLA. Tais experimentos seriam importantes para auxiliar no entendimento dos processos no CLA e para a validação das simulações numéricas já realizadas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. *Imprensa: Galeria de imagens*. 2019. Disponível em: <<http://portal-antigo.aeb.gov.br/imprensa/galeria-de-imagens/>>. Acesso em: 25 fev. 2019.
- ANSYS. *ANSYS Inc: ANSYS Fluent 19.0 Theory Guide*. [S.l.], 2018.
- ANTONINI, E. G.; ROMERO, D. A.; AMON, C. H. Improving CFD wind farm simulations incorporating wind direction uncertainty. *Renewable energy*, Elsevier, v. 133, p. 1011–1023, 2019.
- ARYA, P. S. *Introduction to micrometeorology*. [S.l.]: Elsevier, 1999. v. 79.
- BALOGH, M.; PARENTE, A.; BENOCCI, C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- ε model and wall function formulation: Implementation and comparison for Fluent and OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 104, p. 360–368, 2012.
- BLOCKEN, B. et al. CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: Case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 147, p. 43–57, 2015.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric environment*, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 238–252, 2007.
- COUTO, V. M.; FISCH, G. Análise espacial dos ventos no Centro de Lançamento de Alcântara, Maranhão. In: *Anais do X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*. [S.l.: s.n.], 2018.
- ESSEL, E. E.; TACHIE, M. F. Upstream roughness and Reynolds number effects on turbulent flow structure over forward facing step. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Elsevier, v. 66, p. 226–242, 2017.
- FARIA, A. F.; AVELAR, A. C.; FISCH, G. Wind Tunnel Investigation of the Wind Patterns in the Launching Pad Area of the Brazilian Alcântara Launch Center. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 11, 2019.
- FISCH, G. Características do perfil vertical do vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 14, n. 1, p. 11–21, 1999.
- FISCH, G. Comparisons between aerovane and sonic anemometer wind measurements at Alcântara Launch Center. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 2, n. 1, p. 105–110, 2010.
- Força Aérea Brasileira. *Centro de Lançamento de Alcântara: Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial*. 2020. Disponível em: <<http://www2.fab.mil.br/cla/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- FREIRE, A. P.; MENUT, P. P.; SU, J. Turbulência. *Associação Brasileira de Ciências Mecânicas*, 2002.

- GANT, S. E.; TUCKER, H. Computational Fluid Dynamics (CFD) modelling of atmospheric dispersion for land-use planning around major hazards sites in Great Britain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, v. 54, p. 340–345, 2018.
- GISLER, C. A. F.; FISCH, G.; CORREA, C. d. S. Análise estatística do perfil de vento na camada limite superficial no Centro de Lançamento de Alcântara. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 3, n. 2, 2011.
- HANJALIĆ, K.; KENJEREŠ, S. Dynamic simulation of pollutant dispersion over complex urban terrains: A tool for sustainable development, control and management. *Energy*, Elsevier, v. 30, n. 8, p. 1481–1497, 2005.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Zoneamento geo-ambiental: Estado do Maranhão*. 2019. Disponível em: <mapas.ibge.gov.br/tematicos/zoneamento-geoambiental/estado-do-maranhao.html>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- IRIART, P. G.; FISCH, G. Uso do modelo WRF-Chem para a simulação da dispersão de gases no Centro de Lançamento de Alcântara. *Rev Bras Meteorol*, v. 31, n. 4, p. 610–625, 2016.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. *ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)"*. 2019. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/>>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- JOUBERT, E.; HARMS, T.; VENTER, G. Computational simulation of the turbulent flow around a surface mounted rectangular prism. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 142, p. 173–187, 2015.
- KIM, H. G.; PATEL, V.; LEE, C. M. Numerical simulation of wind flow over hilly terrain. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Elsevier, v. 87, n. 1, p. 45–60, 2000.
- LAUNDER, B. E.; REECE, G. J.; RODI, W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of fluid mechanics*, Cambridge University Press, v. 68, n. 3, p. 537–566, 1975.
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*, Elsevier, p. 96–116, 1983.
- LIU, Z. et al. LES study on the turbulent flow fields over complex terrain covered by vegetation canopy. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 155, p. 60–73, 2016.
- LUO, W. et al. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns behind cuboid obstacles at different angles of wind incidence, and their significance for the formation of sand shadows. *Geomorphology*, Elsevier, v. 139, p. 258–270, 2012.
- MAGNAGO, R. O.; FISCH, G.; MORAES, O. L. L. de. Análise espectral do vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 25, n. 2, 2010.
- MARCIOTTO, E. R.; FISCH, G.; MEDEIROS, L. E. Characterization of surface level wind in the Centro de Lançamento de Alcântara for use in rocket structure loading and dispersion studies. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 4, n. 1, p. 69–79, 2012.

- MEDEIROS, L. E. et al. Observational study of the surface layer at an ocean-land transition region. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 5, n. 4, p. 449–458, 2013.
- MERONEY, R. N. Turbulent diffusion near buildings. *Engineering Meteorology*, Elsevier, 1982.
- MOREIRA, D. M.; TRINDADE, L. Manual do Usuário do Modelo MSDEF (Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes). *Relatório Técnico CTA/IAE/ACA*, Versão 1.0/2010, 2010.
- MOREIRA, D. M. et al. A multilayer model to simulate rocket exhaust clouds. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 3, n. 1, p. 41–52, 2011.
- MURAKAMI, S. Comparison of various turbulence models applied to a bluff body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 46 e 47, p. 21–36, 1993.
- NASCIMENTO, E. G. S. et al. Simulation of rocket exhaust clouds at the Centro de Lançamento de Alcântara using the WRF-CMAQ modeling system. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 6, n. 2, p. 119–128, 2014.
- NASCIMENTO, E. G. S.; SOUZA, N. B. P. de; MOREIRA, D. M. Evaluating the Impact of HCl Atmospheric Dispersion caused by an Aborted Rocket Launch in different Stability Conditions. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 6, n. 7, 2019.
- NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. *Research Data Archive: NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses*. 2019. Disponível em: <<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Assessment of exposure-response functions for rocket-emission toxicants: Appendix d, acute toxicity of hydrogen chloride*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK230426/>: National Academies Press, 1998.
- PETERKA, J.; MERONEY, R.; KOTHARI, K. Wind flow patterns about buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 21–38, 1985.
- PIRES, L. B. et al. Numerical study of the atmospheric flow over a coastal cliff. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Wiley Online Library, v. 67, n. 5, p. 599–608, 2011.
- PIRES, L. B. M. et al. Studies using wind tunnel to simulate the Atmospheric Boundary Layer at the Alcântara Space Center. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 1, n. 1, p. 91–98, 2009.
- PIRES, L. B. M. et al. Atmospheric flow measurements using the PIV and HWA techniques. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 2, n. 2, p. 127–136, 2010.
- PROSPATHOPOULOS, J.; VOUTSINAS, S. G. Implementation issues in 3D wind flow predictions over complex terrain. *Journal of solar energy engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 128, n. 4, p. 539–553, 2006.
- RAMOS, D. N. d. S.; FERNANDEZ, J. P. R.; FISCH, G. Evolution of the Planetary Boundary Layer on the northern coast of Brazil during the CHUVA campaign. *Atmospheric research*, Elsevier, v. 203, p. 298–310, 2018.

ROBALLO, S. T.; FISCH, G. Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte I - Aspectos observacionais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 4, p. 510–519, 2008.

ROBALLO, S. T.; FISCH, G.; GIRARDI, R. d. M. Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte II - Ensaios no Túnel de vento. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 87–99, 2009.

SAEEDI, M.; LEPOUDRE, P. P.; WANG, B.-C. Direct numerical simulation of turbulent wake behind a surface-mounted square cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 51, p. 20–39, 2014.

SANTOS, J. M. *Flow and dispersion around isolated buildings*. Tese (Doutorado) — University of Manchester Institute of Science and Technology, 2000.

SCHUCH, D.; FISCH, G. The use of an atmospheric model to simulate the rocket exhaust effluents transport and dispersion for the Centro de Lançamento de Alcântara. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 9, n. 2, p. 137–146, 2017.

SCHUCH, D. A. *Modelo atmosférico de dispersão e transporte de gases efluentes de lançamento de foguetes no Centro de Lançamento de Alcântara*. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2017.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

SHARMA, P. K.; WARUDKAR, V.; AHMED, S. Application of a new method to develop a CFD model to analyze wind characteristics for a complex terrain. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Elsevier, v. 37, p. 100580, 2020.

SHIH, T.-H. et al. A new $\kappa - \varepsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, Elsevier, v. 24, n. 3, p. 227–238, 1995.

SHIH, T.-H.; ZHU, J.; LUMLEY, J. L. A new Reynolds stress algebraic equation model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 125, p. 287–302, 1994.

SOUZA, B. H. de; FISCH, G. F.; GOULART, E. V. Simulação do Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) utilizando a técnica de CFD. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 9., 2015, Santa Maria - RS. *Anais*. Santa Maria - RS: UFSM, 2015.

STULL, R. B. *An introduction to boundary layer meteorology*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1988. v. 13.

TAMURA, T.; OKUNO, A.; SUGIO, Y. LES analysis of turbulent boundary layer over 3D steep hill covered with vegetation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 95, n. 9-11, p. 1463–1475, 2007.

TANG, M.; COX, R.; KALBERER, M. Compilation and evaluation of gas phase diffusion coefficients of reactive trace gases in the atmosphere: Volume 1. Inorganic compounds. *Atmospheric Chemistry & Physics*, Citeseer, v. 14, n. 17, 2014.

TANG, X.-Y. et al. Micro-scale wind resource assessment in complex terrain based on CFD coupled measurement from multiple masts. *Applied energy*, Elsevier, v. 238, p. 806–815, 2019.

- TEWARI, M. et al. Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 96, n. 4, p. 656–664, 2010.
- TOMINAGA, Y.; STATHOPOULOS, T. CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 79, p. 716–730, 2013.
- UCHIDA, T.; OHYA, Y. Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 91, n. 1-2, p. 219–229, 2003.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. [S.l.]: PEARSON Prentice Hall, 2007.
- WITTEWER, A. et al. Study of Gas Turbulent Dispersion Process in the Alcântara Launch Center. *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, v. 10, 2018.
- WITTEWER, A. R. et al. Simulação das características do vento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara. In: *10th ABCM Spring School on Transition and Turbulence*. São José dos Campos – SP, Brasil: [s.n.], 2016.
- WOO, H. G.-C.; PETERKA, J. A.; CERMAK, J. E. Wind-tunnel measurements in the wakes of structures. *National Aeronautics and Space Administration - NASA*, 1977.
- WU, Y.; REN, H. On the impacts of coarse-scale models of realistic roughness on a forward-facing step turbulent flow. *International journal of heat and fluid flow*, Elsevier, v. 40, p. 15–31, 2013.
- YAN, B. et al. RANS simulation of neutral atmospheric boundary layer flows over complex terrain by proper imposition of boundary conditions and modification on the k- ϵ model. *Environmental Fluid Mechanics*, Springer, v. 16, n. 1, p. 1–23, 2016.
- YANG, X.; PAKULA, M.; SOTIROPOULOS, F. Large-eddy simulation of a utility-scale wind farm in complex terrain. *Applied energy*, Elsevier, v. 229, p. 767–777, 2018.
- YIM, S.; FUNG, J.; NG, E. An assessment indicator for air ventilation and pollutant dispersion potential in an urban canopy with complex natural terrain and significant wind variations. *Atmospheric environment*, Elsevier, v. 94, p. 297–306, 2014.

APÊNDICE A – TESTE DE SENSIBILIDADE DAS MALHAS COMPUTACIONAIS

O teste de sensibilidade de malha teve como objetivo verificar a independência dos resultados em relação à resolução da malha computacional utilizada. O teste foi feito considerando 3 diferentes malhas, definidas como grossa (malha 1), intermediária (malha 2) e fina (malha 3), construídas a partir do programa ANSYS Meshing 19.0. O refinamento foi obtido pela diminuição sucessiva do tamanho dos elementos próximos às regiões de maiores gradientes (adjacentes ao solo e aos prédios).

A Tabela A.1 apresenta o número de nós e de elementos para cada malha utilizada no teste de sensibilidade. Essas malhas foram empregadas para a solução do escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara considerando os casos 1, 2 e 3. Além disso, em todos os casos as simulações numéricas foram realizadas com o modelo $\kappa - \varepsilon$ realizável.

Tabela A.1 – Número de nós e de elementos em cada malha computacional do teste de sensibilidade. A malha escolhida para o desenvolvimento deste trabalho está destacada em vermelho.

Caso	Malha	Número de nós	Número de elementos
Caso 1	1	10.359.438	8.468.134
	2	14.281.481	12.424.099
	3	17.706.929	15.836.765
Caso 2	1	11.286.243	9.507.635
	2	15.311.238	13.520.297
	3	18.188.391	16.385.881
Caso 3	1	11.425.330	9.655.601
	2	15.449.500	13.663.248
	3	18.116.248	16.325.649

Fonte: Produzido pela autora (2020)

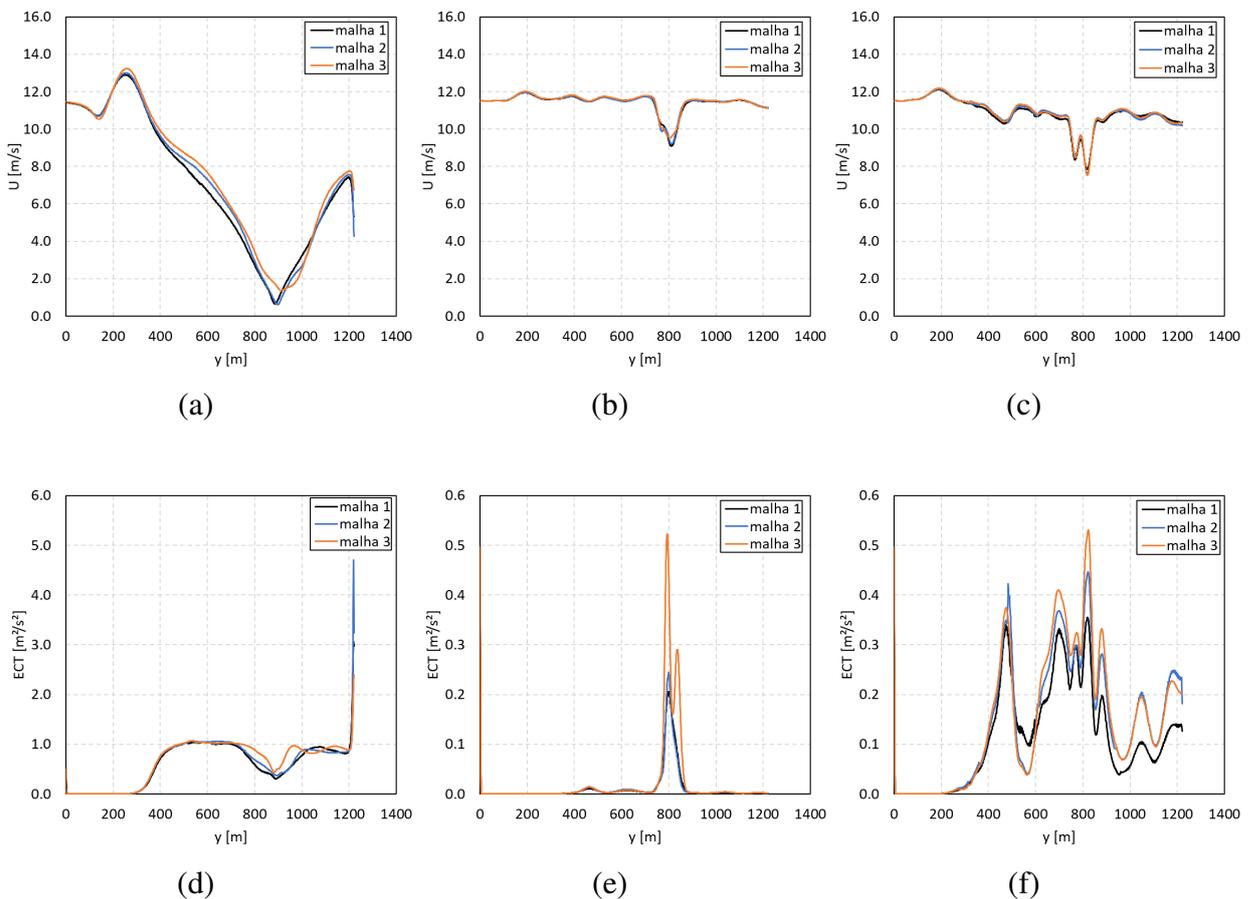
Na Figura A.1 são apresentados os perfis transversais de velocidade e de energia cinética turbulenta (ECT) em $x = 5h_{TMI}$ e $z = h_{TMI}/2$ (h_{TMI} é a altura da TMI de 33 m). Para o caso 1 (Figuras A.1a e A.1d), os perfis de velocidade e ECT mostraram variações entre as malhas utilizadas. Em ambos os perfis, os resultados obtidos com a malha 3 apresentaram divergências em comparação com as malhas 1 e 2. Para o caso 2 (Figuras A.1b e A.1e), os perfis de velocidade foram similares para as três malhas computacionais consideradas. Já os perfis de ECT apontaram uma disparidade para a malha 3 em torno de $y = 800$ m. Por fim, no caso 3 (Figuras A.1c e A.1f) o perfil de velocidade foi análogo para as 3 malhas, no entanto o perfil de ECT mostrou diferenças entre as malhas ao longo de toda a transversal.

A Figura A.2 apresenta os perfis verticais de velocidade obtidos nas simulações numéricas com as três resoluções de malha consideradas. Em todos os casos 1, 2 e 3 os perfis de velocidade

foram equivalentes para as diferentes malhas. No caso 1 (Figura A.2a, b e c), houve uma variação nos valores de velocidade entre 50 e 100 metros de altura. Nesse caso, observou-se que os resultados da malha 1 convergem para os resultados das demais malhas.

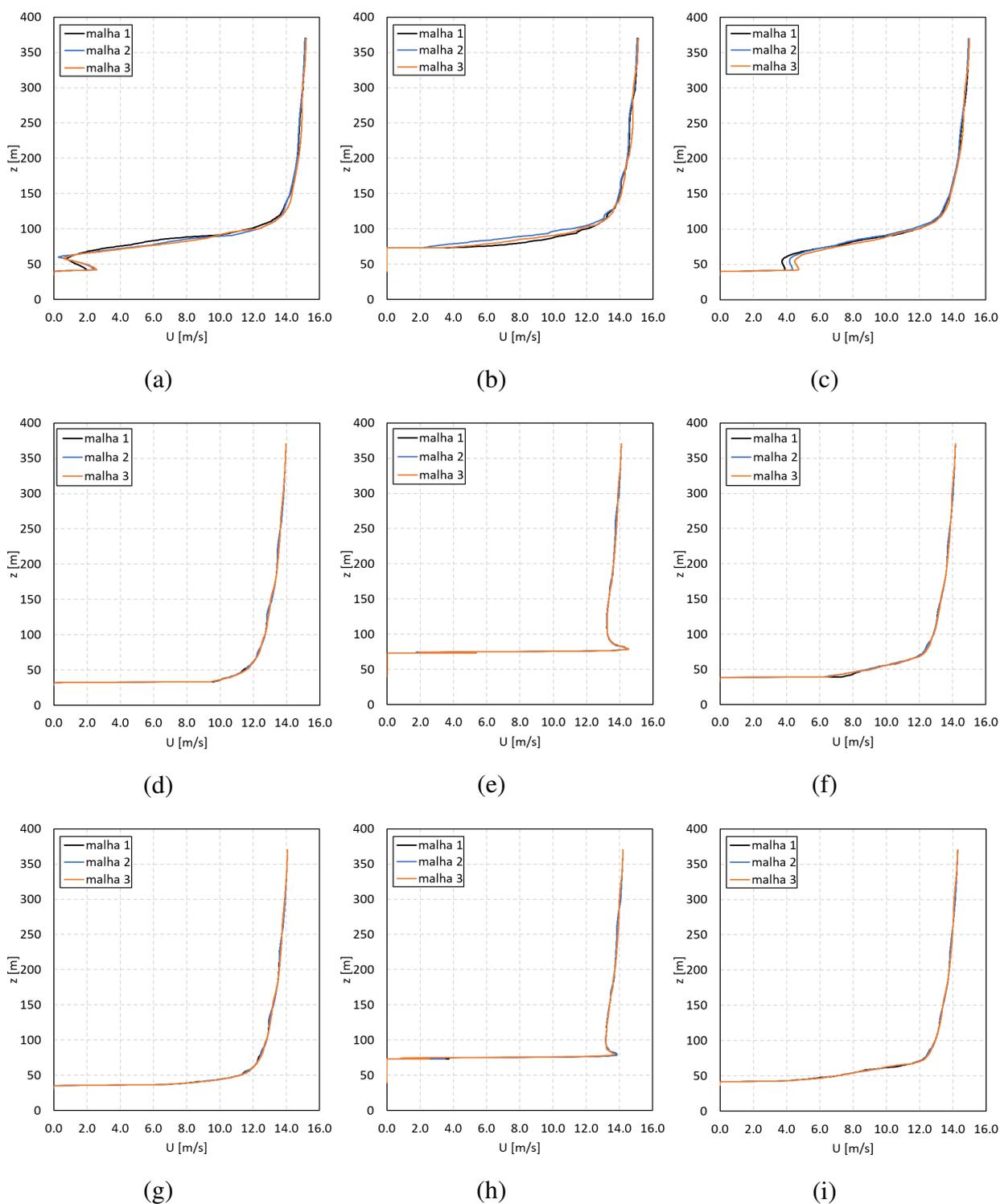
Apesar de terem sido identificadas discrepâncias entre alguns perfis, em todos os casos os resultados tiveram um comportamento similar para as 3 malhas testadas. As variações observadas são toleráveis para a precisão requerida neste trabalho. Assim, levando em consideração também o custo computacional associado a cada malha, a malha intermediária (malha 2) foi escolhida para a realização das simulações numéricas necessárias ao desenvolvimento do presente trabalho.

Figura A.1 – Perfis transversais de velocidade e energia cinética turbulenta (ECT) em $x = 5h_{TMI}$ à jusante da TMI e $z = h_{TMI}/2$ para os casos 1 a 3: a, d) velocidade e ECT para o caso 1; b, e) velocidade e ECT para o caso 2; c, f) velocidade e ECT para o caso 3. h_{TMI} é a altura da TMI igual a 33 metros.



Fonte: Produzido pela autora (2020)

Figura A.2 – Perfis verticais de velocidade em $y = 760$ m (plano que passa pela TMI) para os casos 1, 2 e 3: a, b, c) caso 1 em $5h_{TMI}$ à montante, no centro e $5h_{TMI}$ à jusante da TMI; d, e, f) caso 2 em $5h_{TMI}$ à montante, no centro e $5h_{TMI}$ à jusante da TMI; g, h, i) caso 3 em $5h_{TMI}$ à montante, no centro e $5h_{TMI}$ à jusante da TMI. h_{TMI} é a altura da TMI igual a 33 metros.



Fonte: Produzido pela autora (2020)