

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Estudo da Circulação Atmosférica no CLA  
Bolsista: Bianca Hulle de Souza  
Orientador(a): Gilberto Fernando Fisch  
Período a que se refere o relatório: Agosto de 2016 a Julho de 2017

### Resumo

Mudanças abruptas da topografia podem provocar alterações significativas na complexidade do campo de vento atmosférico. Um deslocamento vertical da superfície como aquele encontrado no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), pode promover modificações nas características da camada limite local. O presente estudo analisa, via simulação numérica tridimensional, o escoamento atmosférico no CLA. Com o auxílio do software comercial ANSYS FLUENT 14.5 simulou-se a região de lançamento de foguetes do CLA, com a presença Torre Móvel de Integração (TMI) juntamente com a falésia, ambas em escala real. A malha final apresentou 3.792.961 pontos nodais. Nas simulações, foi utilizado o modelo Tensor de Reynolds operando em regime permanente e transiente. A condição de contorno das laterais do domínio foi alterada de “*free slip*” para “*condição periódica*”. Percebeu-se que essa nova condição de contorno, comparada aos resultados do ano anterior, permitiu uma melhora significativa na modelagem do escoamento naquele local. O tempo total simulado foi de 11 min e 48 s. Na componente U transiente média, a falésia interferiu já nos primeiros 10 m ao longo do eixo longitudinal indicando a necessidade de um domínio maior. Essa mesma necessidade também foi observada na região a jusante da TMI.

### 1. Introdução

A mudança abrupta de rugosidade e topografia provoca um aumento da complexidade do campo de vento da Camada Limite Superficial (CLS). Dessa forma, por exemplo, foguetes ao ascenderem verticalmente ficam sujeitos à forte influência da turbulência e cargas de vento especialmente nesta região (MAGNAGO et al. 2008 e MAGNAGO et al. 2010). No Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), essas influências são muito intensas devido à presença de uma falésia de, aproximadamente, 40 metros de altura e relativa inclinação. Isto ocorre devido à transição abrupta entre o oceano e o continente tornando complexas as características de vento atmosférico da região (SOUZA et al. 2015). Distante de 150 metros

da borda da falésia encontra-se a Torre Móvel de Integração (TMI) destinada à montagem dos foguetes e possui 50 metros de altura.

A caracterização do escoamento atmosférico presente na região do CLA tem sido objeto de estudo a partir da década de 90 com FISCH (1999), pois para o projeto de construção de foguetes esta caracterização é essencial. Além disso, o perfil de vento próximo à superfície é determinístico para o cálculo da trajetória, os sistemas de controle e a guiagem do foguete (FISCH, 1999). Neste contexto, análises em Túnel de Vento (TV) e simulações numéricas são ferramentas muito utilizadas para estudar o escoamento atmosférico modificado pela topografia regional e pelas ações antropogênicas.

No que se referem aos ensaios experimentais em TV, autores como ROBALLO *et al.*, (2008); PIRES (2009); AVELAR *et al.* (2014) e FARIA (2016) se dedicaram a estudar o escoamento atmosférico no CLA. Por exemplo, AVELAR *et al.* (2014) e FARIA (2016) utilizaram a técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry*) em português, Velocimetria de Partículas por Imagem apresentando campos de vorticidade e velocidade. Por outro lado, estudos computacionais utilizando técnicas de modelagem computacionais no CLA, tal como CFD (Computational Fluid Dynamics), são ainda recentes.

A Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation, DNS*) é o ramo da CFD que representa com alto grau de fidelidade o escoamento turbulento, uma vez que a turbulência é resolvida explicitamente em todas as escalas espaciais e temporais. Esta capacidade, no entanto, tem um alto preço computacional que impede sua utilização como ferramenta de uso geral para simulação de escoamentos complexos (COLEMAN e SANDBERG, 2010). Em contra partida, a Simulação de Grandes Escalas (*Large-Eddy Simulation – LES*) resolve diretamente as grandes escalas e modela as menores escalas já que estas tendem a ser mais isotrópicas e homogêneas e, portanto concernem bem com as metodologias que usam as médias de Reynolds (*Reynolds average Navier-Stokes –RANS*). Dessa forma, o tempo computacional é reduzido enquanto ainda se tem boa qualidade nas soluções (CEZANA, 2015). Porém, para uma abordagem em LES o custo computacional ainda é alto visto a capacidade computacional disponível para este estudo. Neste contexto, permaneceu-se com a abordagem RANS.

O objetivo principal deste trabalho é estudar o escoamento atmosférico transiente do CLA com a presença da TMI e de uma falésia, ambas em escala real através de simulação numérica computacional.

## 2. Materiais e métodos

As simulações foram realizadas com o parque computacional do Núcleo de Qualidade do ar (NQualiar) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

### 2.1 Equações Governantes

As equações que governam o campo de escoamento tridimensional considerando o fluido como newtoniano, atmosfera neutra, viscosidade constante e ausência de campo gravitacional são escritas como as Equações (1), (2), (3) e (4), a saber:

Equação da continuidade (Equação 1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Equação da Conservação da Quantidade de Movimento (Equação 2)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho g \delta_{3i} \quad (2)$$

Onde  $\tau_{ij}$  é dado pela Equação (3)

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

E  $S_{IJ}$  pela Equação (4)

$$S_{IJ} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Onde  $x_i$  são as coordenadas cartesianas,  $u_i$  é a componente instantânea da velocidade na direção  $i$   $L[t^{-1}]$ ,  $p$  é a pressão  $[mL^{-1}t^{-2}]$ ,  $\rho$  é a massa específica  $[mL^{-3}]$  e  $\mu$  viscosidade dinâmica do fluido  $[mL^{-1}t^{-1}]$ . Com as dimensões de massa  $[m]$ , tempo  $[t]$  e comprimento  $[L]$ .

### 2.1.1 Modelagem da Turbulência RANS

O modelo de turbulência utilizado neste trabalho foi o modelo Tensor de Reynolds. Essa abordagem pressupõe que o escoamento pode ser descrito pela decomposição das propriedades envolvidas como sendo a soma entre o valor médio mais sua flutuação. Logo, o valor instantâneo de qualquer variável escalar genérica ( $\phi$ ) do escoamento, pode ser escrito segundo a Equação 5.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (5)$$

Assim, nas equações de conservação as variáveis são substituídas pelas suas quantidades médias adicionadas de suas respectivas flutuações. Segundo VERSTEEG e MALALASEKERA (1995) este modelo apresenta um cálculo mais preciso das propriedades de fluxo médio de todas as tensões de Reynolds de escoamentos, dos mais simples aos mais complexos. Além disso, este modelo pode ser considerado como o modelo de turbulência mais geral de todos os modelos clássicos de turbulência.

### 2.2 Discretização do Domínio Computacional Tridimensional

Para a modelagem numérica do escoamento utilizou-se o pacote comercial da dinâmica dos fluidos computacional *ANSYS FLUENT 14.5*. Gerou-se o domínio computacional tridimensional, Figura 1, no software da *ANSYS DesignModeler*. Para a discretização do domínio computacional aplicou-se a extensão *Fluent Mesh* da ANSYS cujo método de discretização é o Método dos Volumes Finitos, em inglês *Finite Volume Method - FVM*. A malha final, Figura 2, utilizou o método “*CutCell*” e apresentou elementos hexaédricos com um total de 3.792.961 pontos nodais.

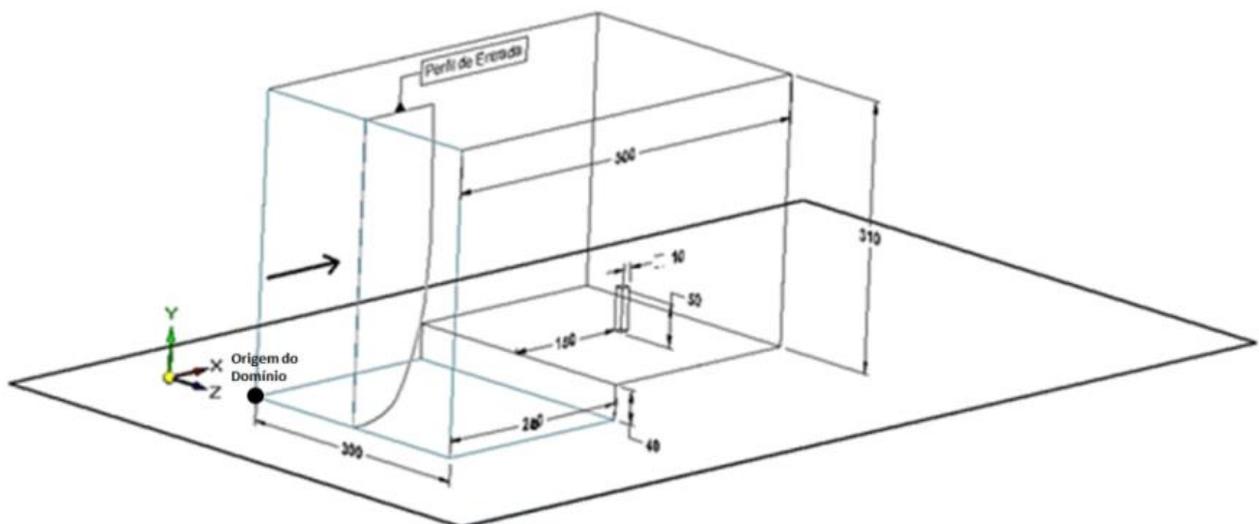


Figura 1. Representação esquemática do domínio computacional utilizado.

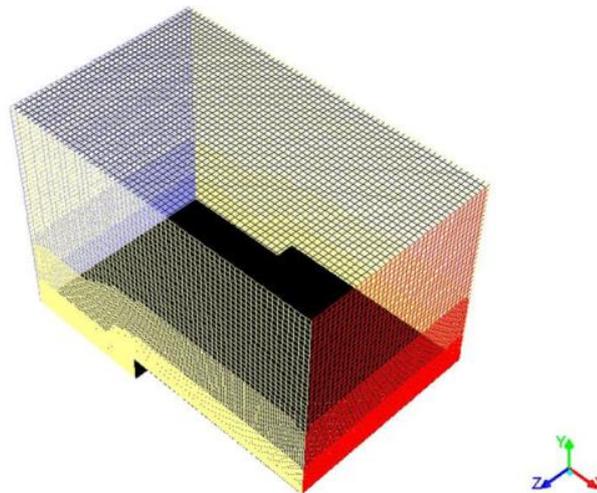


Figura 2. Domínio computacional discretizado utilizado no presente estudo.

### 2.3 Condições de Contorno

As condições de contorno utilizadas neste estudo são as mesmas descritas no Relatório Parcial 2016-2017, com a exceção das laterais que foram alteradas para *parede periódica*. A mudança para a condição de contorno das laterais de *Free-slip* para *condição periódica* assume que a turbulência na parede não seja destruída, uma vez que a periodicidade não assume que a tensão de cisalhamento na parede é nula.

### 2.4 Simulação Transiente

O *timestep* (passo de tempo) da simulação foi de 0,1 s e os dados de saída da simulação foram salvos a cada 150 interações nos primeiros 18.245 *timesteps* e após, esse período, a cada 30 interações, realizando as estatísticas dos dados salvos subsequentes. O tempo total simulado foi de 11 minutos e 48 segundos.

## 3. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos na simulação transiente utilizando o modelo RANS Tensor de Reynolds. Os gráficos foram adimensionalizados com a velocidade de corrente livre ( $U_\infty$ ) de 12,5 m/s. A Figura 3 (esquerda) foi extraída na altura da falésia e eixo central ( $z = 150$  m). Percebe-se que ainda nos primeiros 10 m de domínio computacional a componente  $u$  da velocidade transiente média ( $U_{Trnmed}$ ) já identificou a presença da falésia, reduzindo assim, seu módulo. Esse mesmo comportamento também foi observado para diferentes valores de  $z$ .

A redução percentual de  $U_{Trnmed}$  devido à presença da falésia pode ser observada na Figura 3 (direita). Percebe-se que a redução é mais intensa para valores de  $x$  entre 150-200 m em decorrência da região de recirculação criada à montante da falésia que freará o escoamento incidente. Além disso, na distância entre 199 e 200 m a redução passou de 65,7% para 83,7% indicando a existência do alto gradiente criado próximo à “quina” da falésia. Essa redução também pode ser vista na Figura 4 (direita) que apresenta a distribuição de  $U_{Trnmed}$  no plano central.

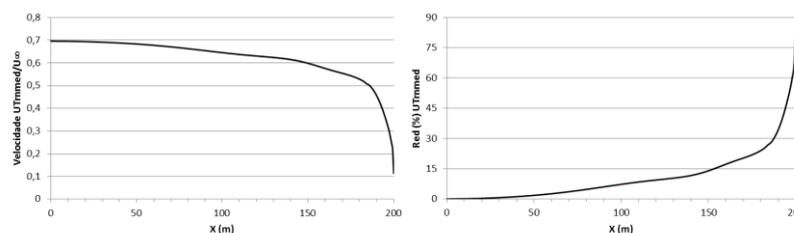


Figura 3. Na esquerda, variação  $U_{Trnmed}/U_{\infty}$  em  $x$  medido na altura da falésia e no eixo central do domínio computacional. Na direita, redução percentual de  $U_{Trnmed}$  devido a ação da falésia sobre o escoamento incidente medido na altura da falésia e no eixo central.

Estendendo o gráfico para valores maiores  $x$  e para diferentes valores de  $y/H$  (altura do domínio/ altura da falésia), Figura 4 (esquerda), observa-se que o escoamento a jusante da TMI ainda é perturbado, o que indica que a distância entre a TMI e a saída do domínio não foi grande o suficiente. Isso também pode ser visto na comparação entre o perfil de entrada e o perfil de saída da velocidade mostrado na Figura 5. É possível observar também que a influência provocada pela TMI no escoamento chega a valores superiores a 150 m após a TMI, Figura 4 (direita).

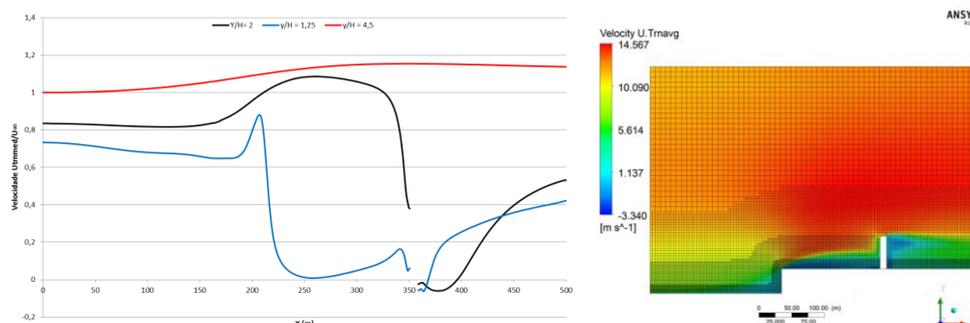


Figura 4. Esquerda: Gráfico da avaliação da variação de  $U_{Trnmed}/U_{\infty}$  ao longo do eixo  $x$  para valores de  $y/H = 1,25 ; 2$  e  $4,5$ . Direita: Campo da velocidade  $U_{Trnmed}$  no plano central do domínio com a malha.

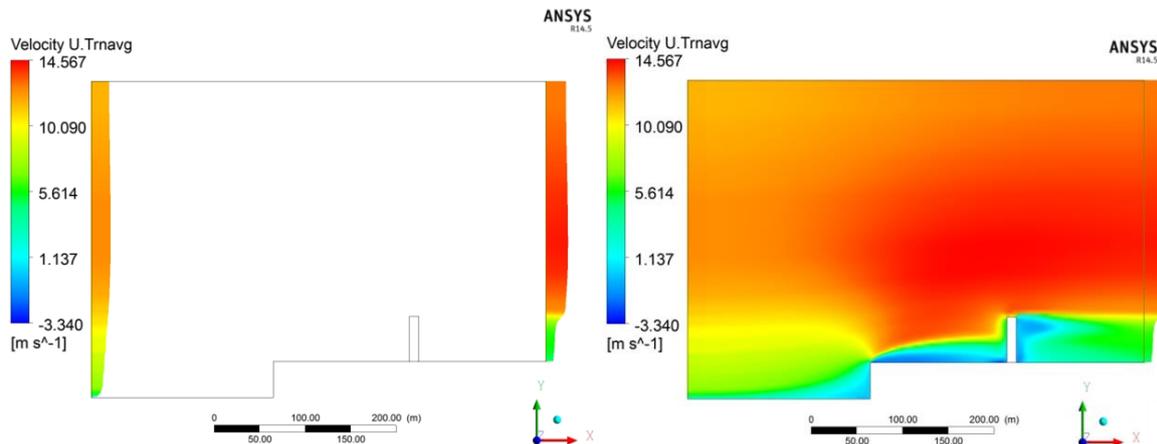


Figura 5. Esquerda: Perfil  $U_{Trnmed}$  medido na entrada do domínio e na saída do domínio calculados para no eixo central do domínio. Direita: Plano central do domínio plotado  $U_{Trnmed}$  juntamente com o perfil de saída.

Além disso, tanto a redução quando aumento da velocidade está diretamente relacionada à complexidade do escoamento para cada altura. Neste contexto, na Figura 6 (esquerda) estão representados os pontos de máximo incremento da velocidade e máxima redução da velocidade para cada altura estudada na Figura 4 (esquerda). O valor máximo de redução para  $y/H = 1,25$  foi de 108,5% presente na região de esteira TMI. A maior redução para  $y/H = 2$  foi 107,2% na mesma região que  $y/H = 1,25$ . Já para  $y/H = 4,5$  o escoamento é retardado em apenas 0,5%. Isso mostra que neste caso, a redução não é mais devida diretamente à formação de zonas de recirculação, mas sim pela alteração global do escoamento modificado.

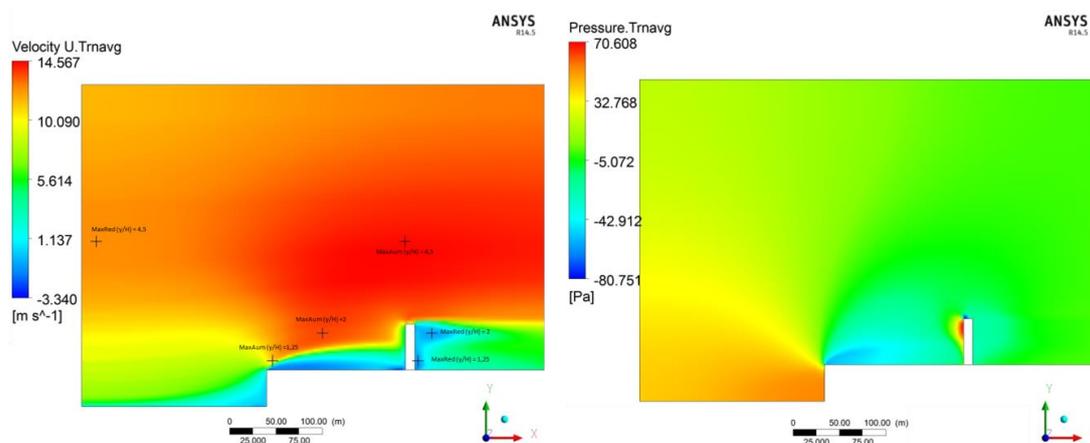


Figura 6. Distribuição de  $U_{Trnmed}$  medida no plano central do domínio. Distribuição da pressão transiente média medida no plano central do domínio.

Já o aumento da velocidade está pautado na relação direta da variação de pressão local no escoamento. Como era esperado, para  $y/H = 1,25$  o maior aumento da velocidade (ver Figura 4) ocorreu na região de alto gradiente relacionado à restrição abrupta da seção transversal do escoamento provocado pela presença da falésia. Essa restrição modifica intensamente o escoamento. Como mostrado na Figura 6 (direita), uma grande região de baixa pressão é formada logo após a falésia, devido a isso, o escoamento próximo a ela é acelerado significativamente. Para  $y/H = 1,25$ ; 2 e 4,5  $UT_{rmed}$  aumentou em, respectivamente, 20,0%, 30,0% e 15,3%.

Na Figura 7, são comparando os resultados de campos de velocidade das simulações mostradas no *Relatório Final 2015-2016* com as novas simulações. Os resultados são plotados no plano superior em  $z/H=0,7$ ; 0,5 e 0,3 com  $z$  medido a partir do continente e  $H$  é a altura da TMI. A comparação é um tanto quanto limitada, uma vez que alterações significativas foram realizadas entre os estudos como mudança de malha, domínio e regime do escoamento. Entretanto, pode-se perceber claramente que a nova condição de contorno das laterais representou melhor o escoamento não apresentando mudanças repentinas da velocidade. Observa-se também que o comprimento do domínio foi demasiadamente reduzido, prejudicando assim algumas análises de comprimento de esteira.

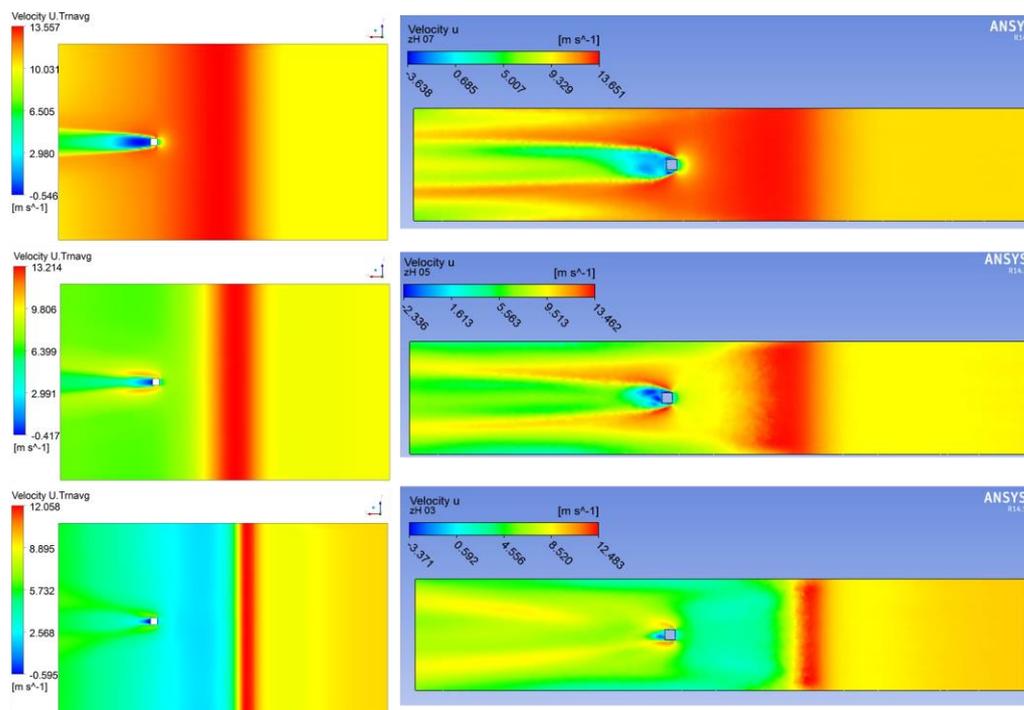


Figura 7. De cima para baixo,  $z/H = 0,7$ ;  $z/H = 0,5$  e  $z/H = 0,3$ . Esquerda: Resultado 2016-2017 do campo de  $UT_{rmed}$ . Direita: Resultado 2015-2016 do campo da componente “ $u$ ”.

#### 4. Próximas Etapas

Para próximas etapas, pretende-se continuar as análises do escoamento em regime transiente objetivando a obtenção do espectro de turbulência, assim como corrigir as deficiências de tamanho de domínio computacional com novas simulações.

#### 5. Conclusões

Neste trabalho, pode-se realizar mais uma etapa de investigação do escoamento atmosférico no CLA utilizando a técnica de simulação numérica. Nessa nova análise, o regime do escoamento foi alterado de permanente para transiente. Além disso, a condição de contorno nas laterais foi alterada para “*condição periódica*”. Essa nova condição permitiu que a turbulência no local fosse mais bem modelada quando comparada aos resultados de 2015-2016. Entretanto, percebeu-se que a dimensão do domínio computacional adotado não foi grande suficientemente para capturar completamente a região de recirculação formada a jusante da TMI. A influência provocada pela TMI supera 150 m a sua jusante. Além disso, percebe-se na componente  $u$  transiente média que a falésia interferiu nos primeiros 10 m em “ $x$ ” indicando a necessidade de um domínio longitudinalmente maior. Os estudos indicaram que o valor máximo de redução para  $y/H = 1,25$  foi de 108,5% (comparação sempre em relação a  $U_{Trnmed}(x=0)$  no plano  $y/H$ ) presente na região de recirculação a jusante da TMI. Já para  $y/H = 2$  e 4,5 essa redução máxima foi de 107,17% também na região de esteira da TMI e de 0,52% próximo à entrada, respectivamente. Já os valores máximos de aumento de velocidade em  $y/H = 1,25; 2$  e 4,5  $U_{Trnmed}$  são, respectivamente, 20,0%, 30,0% e 15,3%.

#### 6. Divulgação dos Resultados

Além dos artigos descritos no Relatório Parcial 2016-2017, há de SOUZA, B.H. et al. Study of Gas Turbulent Dispersion Process in The Alcântara Launch Center. **Journal of Aerospace Technology and Management**. (em processo de publicação).

## Referências

- AVELAR, A. C. et al. A Wind Tunnel Study of Wind Flow Patterns in the Alcântara Space Launching Center. **44th AIAA Fluid Dynamics Conference**, Atlanta, GA, Junho 2014.
- CEZANA, F. C. **Estudo da transferência de massa de poluente no topo de um dossel urbano**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Vitória, p. 151. 2015.
- COLEMAN, G. N.; SANDBERG, R. D. **A Primer on Direct Numerical Simulation of Turbulence** -. School of Engineering Sciences, University of Southampton. [S.l.], p. 21. 2010.
- FARIA, A. F. **Análise Experimental do escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara Utilizando Túnel de Vento**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 130. 2016.
- FISCH, G. Característica 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.
- MAGNAGO, R.; FISCH, G.; MORAES, O. Análise Espectral do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, p. 19, 2008.
- MAGNAGO, R.; FISCH, G.; MORAES, O. Análise Espectral do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 260-269, 2010.
- PIRES, L. B. M. **Estudo da Camada Limite Interna Desenvolvida em Falésias com Aplicação para o Centro de Lançamento de Alcântara**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, p. 150. 2009.
- ROBALLO, S. T.; FISCH, G. Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte I - Aspectos Observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 4, p. 510-519, Junho 2008.
- SOUZA, B. H.; FISCH, G.; GOULART, E. V. Simulação do Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) utilizando a técnica de CFD. **IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia**, Santa Maria-RS, Brasil, 11 a 13 Novembro 2015.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method**. Nova York: Longman Scientific & Technical, 1995. 257 p.