



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 2015 a Julho de 2016

Resumo

O presente estudo reporta a análise tridimensional, via simulação numérica da circulação atmosférica do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Simulou-se a Torre Móvel de Integração (TMI) existente no CLA, juntamente com a falésia de 40 metros de altura, ambas em uma escala geométrica de 1:1000. Os efeitos de interação entre as esteiras de turbulência, os campos de vorticidade, de velocidade e a intensidade da turbulência foram investigadas com o auxílio do pacote comercial *ANSYS FLUENT 14.5*. O modelo de turbulência, inicialmente adotado foi o modelo *SST-k- ω* baseado em códigos *RANS*. O modelo Tensor de Reynolds, posteriormente, também foi utilizado. Na primeira metade do estudo (até fevereiro de 2016), o perfil de velocidade de entrada foi oriundo de uma radiossondagem da região do CLA no dia 01/09/2014 às 11h29min. Os resultados da simulação apresentaram boa concordância entre o perfil de vento simulado e o extraído via radiossondagem. Entretanto, o modelo *SST-k- ω* intensificou, à jusante da TMI, a velocidade do escoamento. Já na segunda fase (de fevereiro a junho) adaptou-se para o dado de entrada o perfil de vento obtido por uma mescla de dados coletados da Torre Anemométrica (TA) e por radiossondagem extraída da região do CLA no dia 19/09/2008, utilizando uma interpolação logarítmica baseado na teoria de Monin-Obhukov. Além disso, modelo de turbulência adotado foi o Tensor de Reynolds. Os resultados da simulação numérica apresentaram boa concordância com estudos prévios de Túnel de Vento (TV) da região de estudo e resultados de medidas em campo.

1. Introdução

Sendo a principal base de lançamento de cargas úteis como experimentos científicos por intermédio de Veículo Lançador de Satélites (VLS) e/ou foguetes de sondagem, o CLA



contribui de maneira efetiva para o desenvolvimento social e científico brasileiro (PIRES *et al.*, 2015). Além de sua excelente localização geográfica, esta região apresenta características topográficas peculiar. A uma distância de certa de 150 m da Torre Móvel de Integração (TMI), há um desnível abrupto de aproximadamente 40 m entre o continente e oceano Atlântico, denominado de falésia (PIRES, 2009).

A mudança abrupta da rugosidade provoca um aumento da complexidade do cenário causando assim, um descolamento vertical do nível zero da superfície devido à falésia e à vegetação arbustiva regional. Dessa forma, os foguetes ao ascenderem verticalmente ficam sujeitos à forte influência da turbulência, especialmente dentro da camada limite superficial (CLS). Vale ressaltar que no caso do CLA, o vento é oriundo do oceano cujo perfil está inicialmente em equilíbrio com a superfície lisa (FISCH, 1999 e ROBALLO e FISCH, 2008).

Essas alterações no campo de vento, próximas às superfícies, geram mudanças significativas no comportamento do vento, formando assim, a Camada Limite Interna (CLI). As características da CLI são importantes para conhecer e compreender suas influências sobre cidades, fábricas, balneários e outros que, eventualmente, podem estar à jusante da mesma (PIRES, 2009). 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 PIRES (2009), e ROBALLO e FISCH (2008) e AVELAR *et al.* (2010) se dedicaram a estudar o escoamento atmosférico no CLA utilizando a técnica de TV. Por outro lado, estudos computacionais utilizando técnicas de modelagem computacionais no CLA, tal como CFD, ainda não foram realizados.

O presente trabalho tem por objetivo analisar o escoamento atmosférico através de simulação numérica computacional, contribuindo para o avanço do conhecimento científico sobre o escoamento atmosférico no CLA.

2. Material e métodos

2. Modelagem Matemática

A dinâmica dos fluidos é governada pelas equações de quantidade de movimento, continuidade e energia. O escoamento no presente estudo foi simplificado sendo incompressível, de viscosidade constante e escoando em regime permanente. As equações governantes utilizadas para a solução do escoamento tridimensional foram as de Navier-Stokes Médias de Reynolds (RANS) para a continuidade e conservação da quantidade de movimento. Essas equações podem ser vistas em SOUZA et al. (2015).

A modelagem numérica é uma ferramenta para a solução das equações de Navier-Stokes em situações reais. Para a modelagem computacional do escoamento tridimensional utilizou-se o pacote comercial da dinâmica dos fluidos computacional *ANSYS FLUENT 14.5*. O modelo de turbulência utilizado inicialmente foi *SST $k-\omega$* e posteriormente, modificado para o Tensor de Reynolds.

O primeiro domínio computacional, “DC”, 3D implementado neste estudo pode ser visto no *Relatório Parcial 2015-2016*. Com intuito de aprimorar e otimizar a simulação em termos de tempo de processamento, reduziu-se o domínio e refinou-se a área da TMI. Na Figura 1 (a) estão destacadas as cotas que foram alteradas em que L_1 , L_2 , L_3 e L_4 valem respectivamente, 110mm, 350mm, 600mm e 200mm. Os domínios foram gerados no programa *ANSYS DesignModeller*. Ainda na Figura estão indicadas os contornos utilizados nas simulações em que PLE representa a *parede lateral esquerda* e PLD, a *parede lateral direita*.

O DC foi discretizado e posteriormente importado para o aplicativo *Fluent Mesh* do software *ANSYS 14.5*. Os procedimentos de independência dos resultados e testes de convergência de malha em função do tamanho da malha foram realizados. É importante relatar que a malha gerada foi não estruturada e apresentou elementos tetraédricos e prismáticos, [Figura 1]. A malha final apresentou 4.235.026 elementos e 823.059 nós.

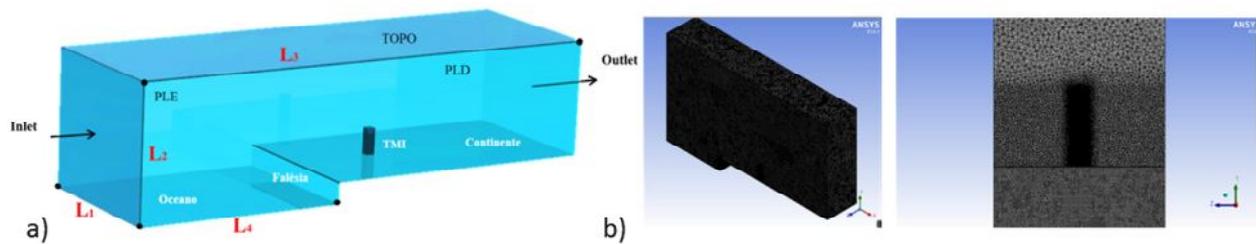


Figura 1. a) Novo DC utilizado nas simulações com destaque as cotas alteradas. b) Vista isométrica do DC discretizado e do refinamento da TMI.

O perfil de velocidade de entrada, “RMO”, do DC, Figura 2, utilizado foi obtido por radiossondagem extraída da região do CLA no dia 19/09/2008, utilizando uma interpolação logarítmica baseado na teoria de Monin-Obhukov.

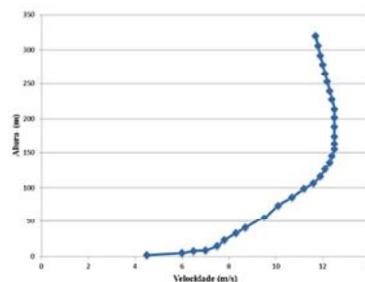


Figura 2. Perfil de entrada utilizado nas simulações do escoamento atmosférico do CLA.

É importante notar que embora as velocidades usadas nas simulações sejam de m/s, como indicado na Figura 2, a altura foi utilizada na simulação está em escala de 1:1000. As condições de contorno adotadas nas simulações foram condição de não deslizamento no

Oceano, Falésia, TMI e Continente, parede livre nas laterais e no topo e na saída $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$.

3. Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados encontrados na simulação com o modelo de turbulência Tensor de Reynolds. Para a adimensionalização dos gráficos de perfil de velocidade apresentados utilizou-se a velocidade de corrente livre, $V(\alpha)$, igual a 12,5m/s extraída a uma altura de 214m. Para o eixo vertical, foi utilizada a altura da falésia, H, igual a 40m.

Nas Figuras 3,4, 5 estão retratadas, de forma qualitativa, uma comparação entre os resultados do campo médio do escoamento da região de estudo adquirido via simulação numérica e experimentos de PIV obtidos por AVELAR *et al.*, (2010). A Figura 3 mostra a região incidente da falésia e o campo médio do escoamento para as previsões numéricas utilizando, respectivamente, o modelo SST-K ω e Tensor de Reynolds. Vale observar que a tendência do escoamento de recolar na extremidade da falésia foi capturada em ambos os modelos de turbulência, mas não nos dados experimentais de túnel de vento.

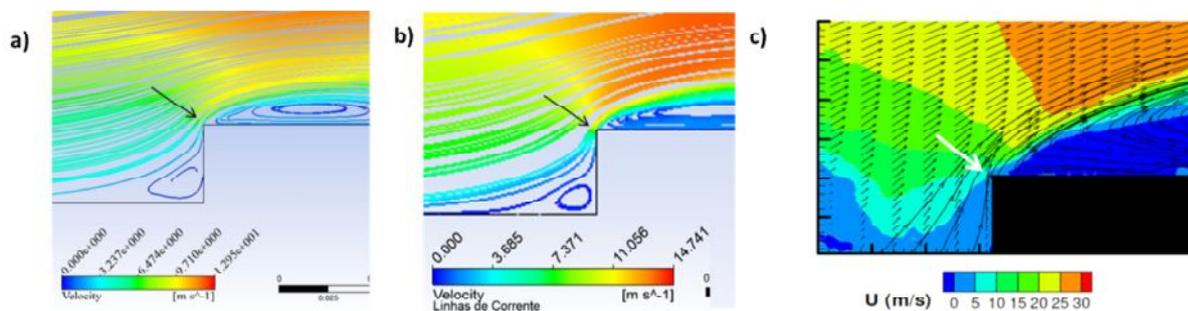


Figura 3. Campo de velocidade da região incidente na falésia via a) modelo de turbulência SST K ω , b) modelo de turbulência Tensor de Reynolds e c) AVELAR et al. 2010

O fenômeno de recolamento também pode ser visto na extremidade da TMI, Figura 4. Devido a este recolamento, na superfície superior da TMI, uma bolha de recirculação é formada. Esta bolha pode ser vista tanto nos resultados numéricos, para ambos os modelos de turbulência, quanto no resultado experimental. Além disso, na região incidente da TMI uma área de recirculação é mostrada, apresentando baixas velocidades. A *priore*, estas baixas velocidades indicam uma tendência de alta vorticidade no local.

A região de esteira próxima é uma região de relativa baixa pressão e de altos valores de intensidade da turbulência. O conhecimento dos fenômenos físicos que a cercam é de grande interesse na dispersão de poluentes, por exemplo. Por este motivo, a Figura 5, se torna muito importante para o desenvolvimento dos trabalhos técnico-científico do escoamento na região do CLA, para futuros modelos de dispersão de gases. Os modelos de turbulência, Figura 5 (a) e Figura 5 (b), SST K ω e Tensor de Reynolds, respectivamente, foram capazes de retratar a bolha de recirculação que se forma à jusante da TMI. A morfologia desta bolha para os casos

mostrados foram semelhantes. Entretanto, é importante observar que o resultado utilizando o modelo Tensor de Reynolds apresentou a formação de uma estrutura vorticosa muito comum em escoamento de telhados do tipo *shedding*. Esta estrutura recebe o nome de vórtices do tipo *shedding*, sendo que estes atuam como agentes dispersores da qualidade do ar.

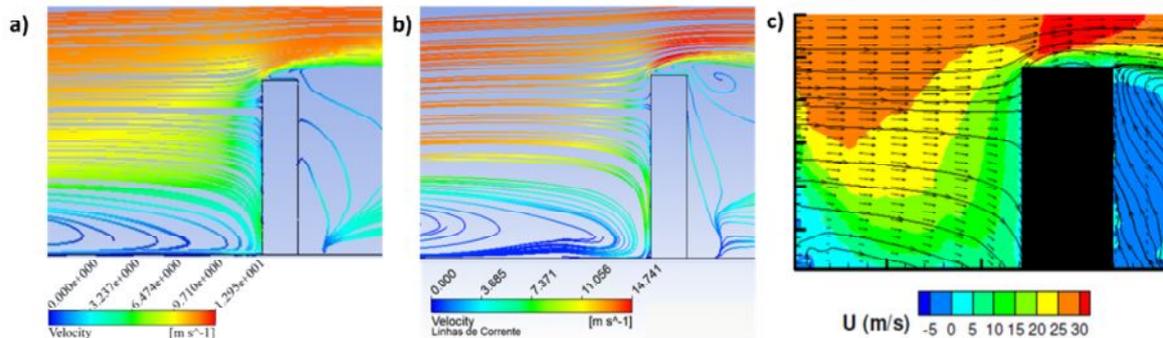


Figura 4. Campo incidente de velocidade na TMI via a) modelo de turbulência SST $K\omega$, b) modelo de turbulência Tensor de Reynolds e c) AVELAR et al. (2010).

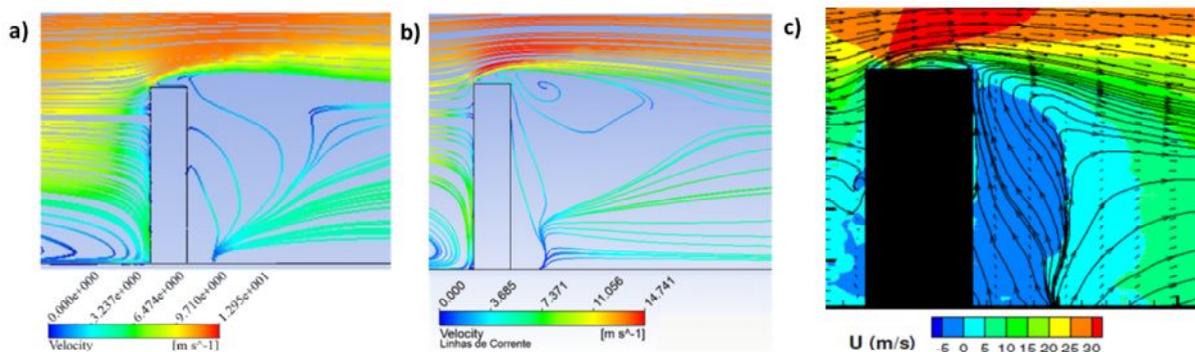


Figura 5. Comparação do campo de velocidade próximo à TMI via a) modelo de turbulência SST $K\omega$, b) modelo de turbulência Tensor de Reynolds e c) AVELAR et al. (2010).

A Figura 6 retrata alguns detalhes interessantes do escoamento próximo a TMI para o modelo de turbulência Tensor de Reynolds que foi capaz de capturar a recirculação que é formada no topo da TMI (posição a). Esta recirculação é mostrada pelos vetores no sentido oposto ao sentido do escoamento. A região indicada por “b” exibe uma região de baixa velocidade a uma altura de, aproximadamente, 41,964 mm acima da falésia. Este ponto delimita, no

resultado da simulação, a região de recirculação a jusante da TMI. Ainda na Figura 6, o modelo foi capaz de capturar a região de recirculação a montante da TMI, indicada por “c”.

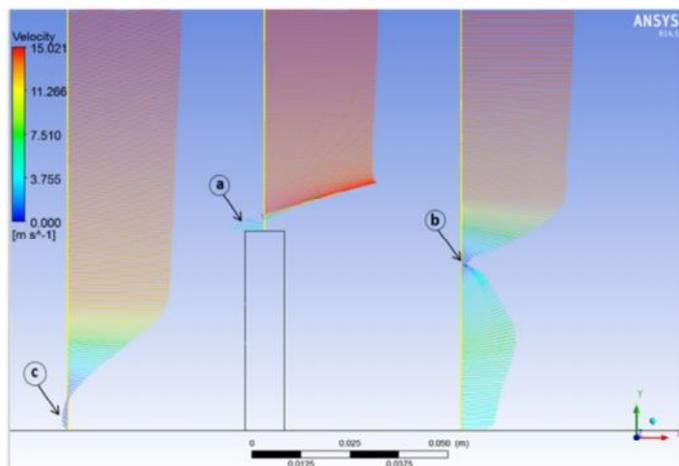


Figura 6. Detalhes dos perfis de velocidade próximos à TMI.

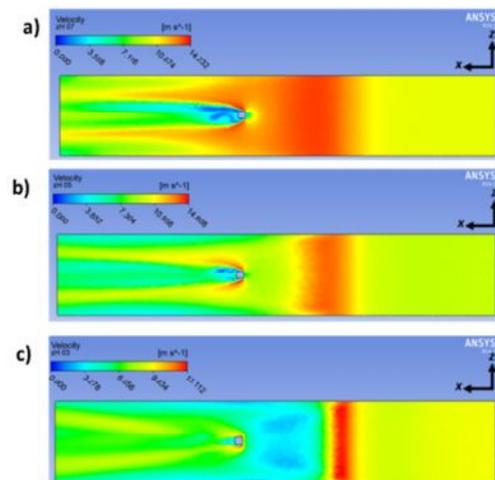


Figura 7. Campo de velocidade do Tensor de Reynolds extraído em 3 diferentes razões de aspecto. a) $z/H = 0,7$. b) $z/H = 0,5$. c) $z/H = 0,3$.

A Figura 7 apresenta um desenho esquemático do posicionamento, representando razão de aspecto, z/H em que H é a altura da TMI, dos resultados do campo de velocidade da simulação para o modelo Tensor de Reynolds no plano yz . Nestas figuras, percebeu-se que à jusante da TMI, a velocidade do escoamento é inferior que nas demais localidades do domínio devido à desaceleração causada pela TMI. Além disso, é de se esperar que, quanto maior a razão de aspecto, menor será a influencia do efeito do atrito entre a superfície do solo e o escoamento. Como consequência, maior será a velocidade do escoamento. Coexiste a este fenômeno, há a influência da falésia no escoamento atmosférico, cuja modificação pode ser vista na Figura 3 (b). Para $z/H=0,3$, o escoamento atingiu velocidades de até 13,1 m/s a uma distância de 137,21 mm a montante da TMI (dimensão no DC). Já $z/H=0,5$ e $0,7$ as velocidades de 14,6 m/s e 14,2 m/s, respectivamente, foram alcançadas para distâncias de 128,57 mm e 73,47 mm, nesta ordem.

Na Figura 8 são apresentados os resultados da vorticidade [Figura 8 (a)] e da intensidade da turbulência [Figura 8 (b)]. Como previsto nos resultados do campo de velocidade, a vorticidade é maior nas regiões de esteira próxima da TMI e na região de escoamento incidente à TMI. Esta característica também pode ser notada na Figura 8 (b). Em regiões de formações de estruturas vorticosas, a intensidade da turbulência é alta. Além disso, pode-se observar a alta intensidade da turbulência em toda a esteira da TMI.

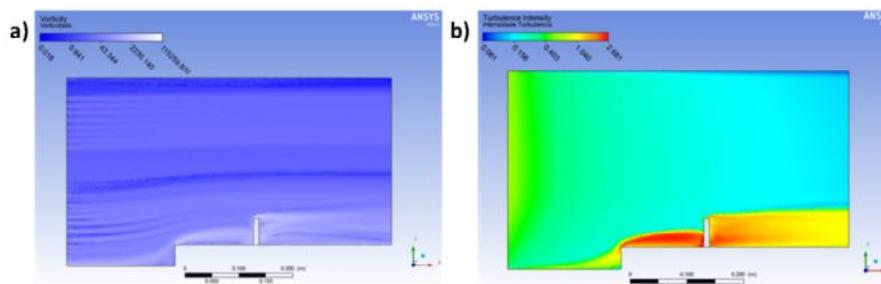


Figura 8. Campo de vorticidade (a) e intensidade da turbulência (b) do DC para o modelo de turbulência Tensor de Reynolds.

A continuidade do projeto se dará com a realização de novas simulações com outros modelos de turbulência a fim de encontrar um modelo que melhor se adeque à situação estudada. Espera-se que as novas simulações contem com geometrias mais realistas e incremento da topografia da região.

4. Conclusões

Neste trabalho investigou-se o comportamento do escoamento atmosférico na região do CLA empregando técnicas de simulação numérica de CFD. Simulou-se com dois modelos de turbulência, SST $K\omega$ e o Tensor de Reynolds. Ambos os modelos foram capazes de reproduzir o perfil de vento imposto como condição de entrada. O resultado da simulação utilizando o Tensor de Reynolds indicou características da região do CLA como reportadas em trabalhos anteriores de TV: estruturas vorticosas formadas próximo à falésia e à montante e jusante da TMI além de pontos de recolamento e descolamento do escoamento próximo à falésia e no topo da TMI. Como esperado, a influência do atrito da superfície com o

escoamento, juntamente, com a ação da falésia sobre o escoamento, tornou a região incidente da TMI complexa. Como consequência, foram alcançadas, a montante da TMI, velocidades próximas a 14,6 m/s para $z/H=0,7$. Em contra partida, a maior velocidade alcançada para $z/H=0,5$ e 0,3 foi, respectivamente, de 14,2 m/s e 13,1 m/s para distâncias de 128,57 mm e 137,21 mm, nesta ordem. Indicando, assim, a grande influência sobre a região estudada do atrito entre a superfície e o escoamento e a bolha de recirculação formada a montante da TMI.

5. Divulgação dos Resultados

Durante o período da iniciação científica foram apresentados trabalhos técnico-científicos desta pesquisa com foco em desenvolvimento de métodos experimentais e análise de resultados. Segue a listagem dos artigos desenvolvidos e que já foram apresentados e/ou que serão exibidos em eventos que se realizarão no segundo semestre, mas que os resumos/abstracts ou trabalhos completos já foram submetidos.

SOUZA, B. H.; FISCH, G. F. ; Elisa Valentim Goulart . Simulação do Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) utilizando a técnica de CFD. In: IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Novembro 2015, Santa Maria, RS. IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, **2015**, 8 páginas.

WITTWER, A.R.; SOUZA, A.M.L.; OLIVEIRA, M.G.K.; **SOUZA, B.H.; FISCH, G. F.**; GOULART, E.V.; CARVALHO, G.F. Simulação Das Características Do Vento Atmosférico No Centro De Lançamento De Alcântara. 10 páginas. In: Transition and Turbulence Spring School (EPTT), São José dos Campos, SP, Setembro, **2016**, Anais.

WITTWER, A.R.; SOUZA, A.M.L.; OLIVEIRA, M.G.K.; **FISCH, G. F.; SOUZA, B.H.**; Elisa Valentim Goulart. ESTUDO DO PROCESSO DE DISPERSÃO TURBULENTA DE GÁSES NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA. 11 páginas. In: Transition and Turbulence Spring School (EPTT), São José dos Campos, SP, Setembro, **2016**, Anais.

SOUZA, B.H.; FISCH, G.; GOULART, E.V.; NUMERICAL SIMULATION OF THE ATMOSPHERIC FLOW AROUND ALCÂNTARA LAUNCH CENTER USING SST-K-W

MODEL. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Vitória, ES, Novembro, **2016**, Anais.

SOUZA, B.H.; AVELAR, A.C.; FISCH, G.; GOULART, E.V.; LEITE, H.F.; NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FLOW PATTERNS AROUND A CYLINDER. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Vitória, ES, Novembro, **2016**, Anais.

Referências

AVELAR, A. C.; PIRES, L. B. M.; FISCH, G. Simulation of the Atmospheric Boundary Layer in a Closed Circuit Wind Tunnel with Short Test Section. **AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference**, Chicago, Illinois, n. 27th AIAA, 28-1 Junho-Julho 2010.

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.

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, 150 p. 2009.

PIRES, L. B. M. et al. Atmospheric flow measurements using the PIV and HWA techniques. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 2, n. 2, p. 127-136, 2010.

PIRES, L. B. M. et al. A Study of the Internal Boundary Layer Generated at the Alcantara Space Center. **American Journal of Environmental Engineering**, n. 5, p. 52-64, 2015.

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.