

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Estudo do padrão do escoamento de vento no Centro de lançamento de Alcântara

Bolsista: Fabricio Lamosa C. Brasileiro

Orientador(a): Prof. Dra. Ana Cristina Avelar

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2013 e Julho de 2014

### Resumo

Este relatório de atividades apresenta uma investigação experimental em túnel de vento sobre os padrões do vento na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), mais precisamente na região da Torre Móvel de Integração, conhecida como TMI, que é um corpo rombudo e por este motivo apresenta na sua esteira regiões de recirculação e alta turbulência, o que é dependente das características do vento incidente sobre a mesma. Esse trabalho é uma continuação de estudos anteriores, e tem como objetivo uma investigação do escoamento em planos horizontais, paralelos à parede inferior do túnel de vento. Nos trabalhos anteriores as medidas foram realizadas em planos verticais, perpendiculares à parede inferior do túnel. Neste estudo foi utilizado um modelo em escala de 1:120 e mais uma vez as inclinações e incidência do vento sobre as estruturas foi considerado, bem como as mesmas velocidades médias na seção de testes de 8, 20 e 30m/s, numa faixa de Número de Reynolds de  $5.4 \times 10^5$  até  $2.0 \times 10^6$ . Os experimentos foram realizados utilizando a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV).

### 1. Introdução

Para a engenharia civil, na construção de edifícios, o estudo do comportamento do escoamento de vento é de extrema importância para que se possa garantir a estabilidade do prédio, bem como, os efeitos que a geração de um escoamento perturbado por um corpo que não é aerodinâmico em outros prédios e pedestres que caminham nas proximidades, o que foi investigado por Stathopoulos *et al.* (1996) e Zhou (1997). Um prédio pode ser considerado um corpo rombudo, a partir do momento que este passa a gerar maiores coeficientes de arrasto do que sustentação, bem como, quando os corpos apresentam separação da camada limite muito antes se comparado com um corpo esbelto (Bearman, 1984). Vários problemas podem ser encontrados em edifício para o qual uma análise dos padrões do vento ao redor do mesmo não foi realizado. O efeito mais comum foi bem definido por Bimbato (2012) “desprendimento alternado de pares contra rotativos de estruturas vorticiais”. Esses movimentos cíclicos ao longo do tempo podem degradar estruturalmente as edificações. Estudos aprofundados é geralmente realizados em construções ao redor de aeroportos, pois devido à proximidade aeronaves a esteira de perturbações e vórtices geradas pelos mesmos podem alterar a rota e no pior dos casos uma decolagem ou um pouso que, de acordo com as estatísticas, apresentam uma maior probabilidade de acidentes, como proposto por Woo

(1977), relatório interessante que demonstra que uma forte preocupação sobre esse assunto já existia há muitas décadas atrás.

Situação similar ocorre no (CLA) uma vez que circundada pelo oceano Atlântico, ventos intensos provenientes da costa incidem sobre o Setor de Preparação e lançamento (SPL), região do onde está instalada toda a estrutura necessária ao lançamento de veículos espaciais. O escoamento nesta região se torna mais complexo devido a ocorrência de uma formação geográfica bastante irregular conhecida como falésia, caracterizada pelo encontro abrupto entre oceano (Pires *et al.*, 2009), e dependendo da inclinação que o vento incide sobre a falésia o escoamento atrás da Torre Móvel de Integração, TMI, vista na Fig. 1a e 1b, e principalmente sobre os veículos que são lançados de lá, como o Veículo Lançador de Satélites (VLS), pode ser modificado drasticamente, podendo ou não apresentar vorticidade intensa e prejudicial, visto que o veículo fica exposto à ação da natureza nos primeiros segundos antes e após a decolagem, podendo ocasionar acidentes, pela mudança repentina na trajetória.

Contrastando com esse cenário o CLA apresenta excelentes características que o tornam um dos melhores centros de lançamentos espaciais do planeta, como a sua proximidade à linha do equador, mais ao centro do planeta, provém lançamentos mais baratos pela economia de combustível. Um bom regime de chuvas e estações muito bem definidas permite aos pesquisadores planejarem suas operações com antecedência com a certeza de que as condições climáticas da região irão ocorrer como o previsto.

Estudos experimentais em túnel de vento de prédios demandam dezenas de horas gastas, mão-de-obra e muito recurso financeiro para possibilitar pelo menos uma visualização do escoamento ao redor dos corpos.



Figura 1a e 1b. Torre Móvel de integração e ao fundo a falésia.

Os pesquisadores envolvidos nesse trabalho são motivados pelas características topográficas peculiares do CLA, a sua proximidade à costa litorânea, e têm por objetivo estudar os efeitos do padrão do escoamento local para que, enfim, possa ser compreendido um pouco sobre o que acontece naquela região. As medidas anteriores mostraram a formação de regiões de intensa recirculação na esteira da TMI decorrentes do vento oceânico que incide sobre a mesma, porém não ficou claro o papel das grades que interligam as torres de para-raios e nem como esses vórtices interferem no lançamento de foguetes uma vez que as medidas foram realizadas em planos horizontais. Deste modo, novos testes foram feitos deslocando-se o

feixe de laser do PIV para uma posição perpendicular à parede do túnel para que fosse possível a visualização de possíveis efeitos numa região mais ampla do escoamento e ar.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Preparação experimental

Os testes foram feitos no Túnel de vento TA-2 do IAE, uma ferramenta muito valiosa que produz um escoamento interno de até 120m/s e devido a suas características aeronáuticas, não possui uma camada limite atmosférica de espessura adequada e com características apropriadas para este estudo. Então, uma série de dispositivos foram adotados para a formação de uma camada limite similar a camada limite atmosférica, com base em estudos realizados por Blessmann (1973) e Loredou-Souza *et al.* (2004). Uma descrição detalhada dos procedimentos para a formação da camada limite atmosférica é apresentada em Brasileiro (2012). Na Fig. 2 é possível ver de forma esquemática como o ensaio ocorreu, com inclinações da falésia ( $\beta$ ) de 90°, 45° e 35°, bem como incidência do vento ( $\alpha$ ) de 0°, 35° e 45°. Para que fosse possível mensurar o escoamento, a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas, foi mais uma vez utilizada.

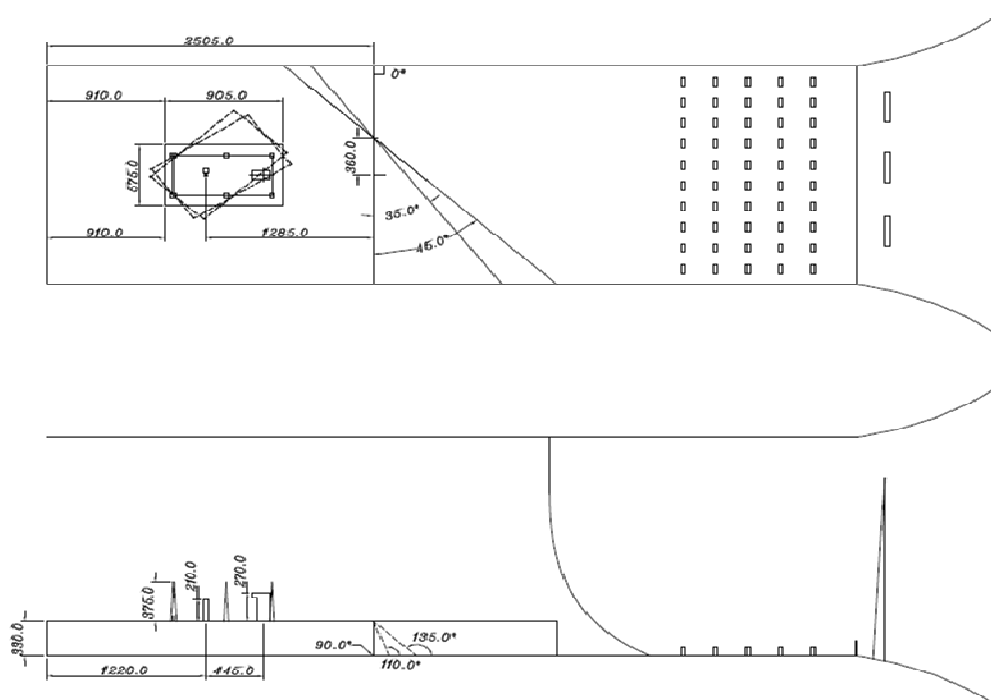


Figura 2. Esquemas de ensaios para as maquetes em menor escala.

### 2.2. Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)

Devido a dificuldade para a visualização de um escoamento opticamente transparente e tão homogêneo como o ar atmosférico algumas medidas são necessárias para que seja possível

extrair informações significantes. A técnica do PIV é um método óptico de medida e visualização de escoamentos em túneis de vento que necessita de uma fonte que semeia o fluido com pequenas partículas. O fluxo de ar "semeado" com partículas traçadoras e homogêneo é iluminado e câmeras de alta resolução, e com frequência de aquisição adequada, capturam centenas de pares de imagem. Para que a medição seja precisa, na análise dos dados obtidos, o software os divide em zonas menores, chamadas de áreas de interrogação, e através de uma correlação matemática e estatística entre cada par de imagem capturada é calculada uma velocidade média apenas pelo deslocamento das partículas no fluido, como mostra um guia bastante detalhado sobre a técnica (Raffel *et al.*, 2007) e uma aplicação prática realizada por Marins (2007). Para o experimento atual o laser foi disposto paralelamente em relação à parede inferior do túnel, Fig. 3a, porém ainda foram utilizadas, para efeito de comparação, imagens dos ensaios anteriores, com o laser disposto de forma perpendicular à parede inferior Fig. 3b.



Figura 3a. Laser paralelo

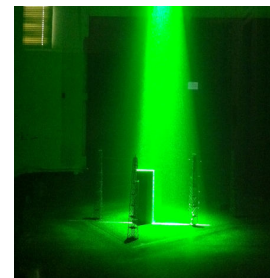


Figura 3b. Laser perpendicular

Os experimentos foram realizados para velocidades médias do escoamento na seção de ensaios de 8 m/s, 20 m/s e 30 m/s, correspondendo a valores de número de Reynolds de  $5.4 \times 10^5$  a  $2.0 \times 10^6$ .

As medidas com PIV foram realizadas em algumas regiões próximas à TMI e também nas proximidades do VLS.

### 3. Resultados

Para uma melhor compreensão do estudo, a Fig. 4, imagem do relatório anterior será novamente requisitada, para evidenciar uma formação atrás de TMI que pode ser significativa numa operação de lançamento. A Fig.4 apresenta os resultados obtidos de uma imagem de PIV onde a escala de cores é proporcional à vorticidade e os vetores as velocidades médias estão presentes.

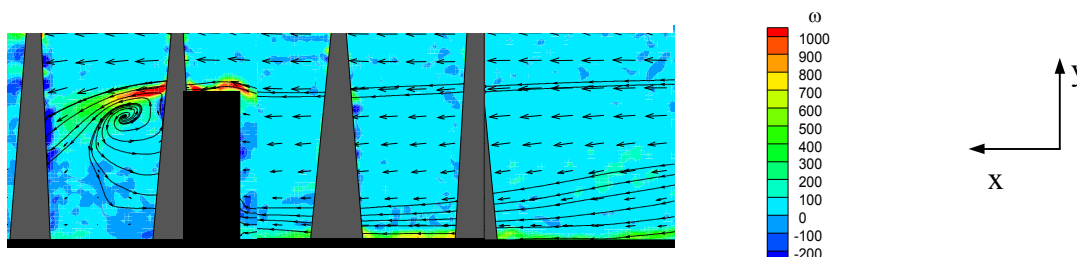


Figura 4. Contornos de vorticidade e vetores velocidade,  $U_\infty = 20$  m/s,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\alpha = 35^\circ$ .

Por meio da Fig. 4 é possível inferir que, como era de se esperar, a TMI gera um nível de vorticidade significativo para um escoamento adentrando ao CLA por uma inclinação de falésia de  $90^\circ$ , uma incidência de  $35^\circ$  e velocidade  $U_\infty$  de 20m/s.

A Fig. 5 mostra um resultado de PIV porém, proveniente de um ensaio com o laser disposto paralelamente à parede inferior do túnel e representa uma determinada situação e uma velocidade de fluxo de 20 m/s.

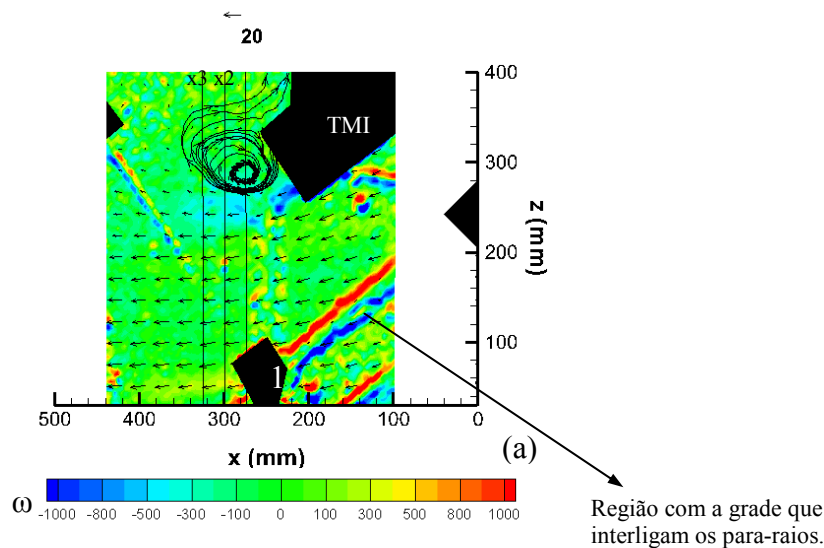


Figura 5. Imagem de PIV com o laser em paralelo.

Da Fig. 5 pode ser observado uma região de recirculação atrás da TMI, com estruturas de vórtices bem definidas e altos níveis de vorticidade. É interessante notar os valores positivos e negativos, estes são provenientes apenas da interação do escoamento com as grades que interligam as torres de pára-raios. A Fig. 6 mostra pequenos vórtices ao redor do VLS e da torre de emergência. Vale ainda lembrar que para esse caso o vento incidia com um ângulo de  $45^\circ$  com uma inclinação da falésia de  $90^\circ$  e velocidade de 20m/s.

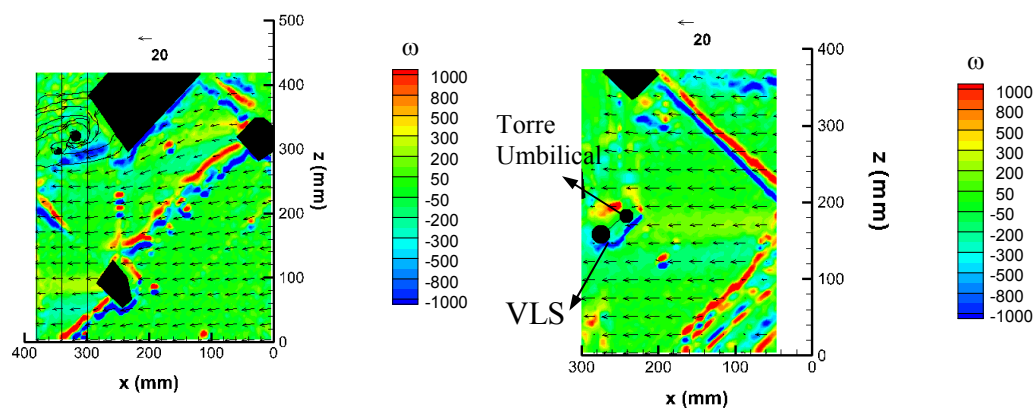


Figura 6. Caso  $\beta = 90^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  e  $U_\infty = 20\text{m/s}$ .

Na Fig. 7 e na Fig.8 são apresentados resultados de campos de velocidade e contornos de vorticidade nas proximidades do VLS e também nas proximidades da TMI para a inclinação da falésia de  $45^\circ$  e incidência do vento de  $35^\circ$ . De acordo com os resultados apresentados na Fig. 7 e na Fig. 8, fica mais evidente o que já era esperado de acordo com os resultados dos ensaios anteriores, uma perturbação maior para uma configuração onde  $\beta$ , a inclinação da falésia é  $45^\circ$  e incidência do vento é  $45^\circ$ . Parece que, quanto mais inclinada é a entrada da falésia e maiores ângulos de incidência, as perturbações ficam se torna mais intensas.

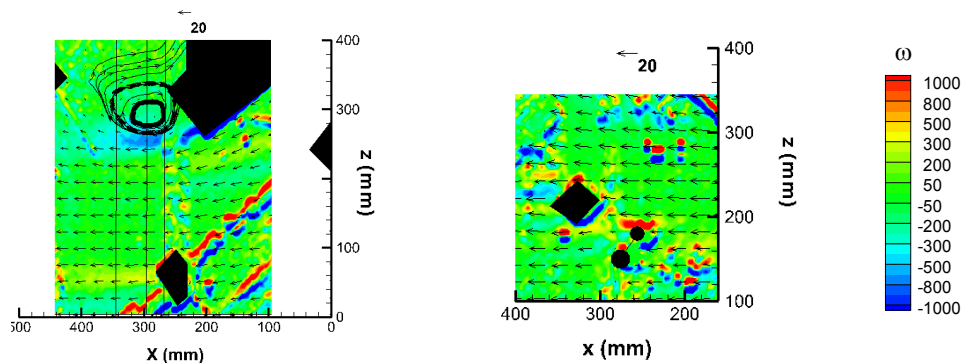


Figura 7. Caso  $\beta = 45^\circ$ ,  $\alpha = 35^\circ$  e  $U_\infty = 20\text{m/s}$ .

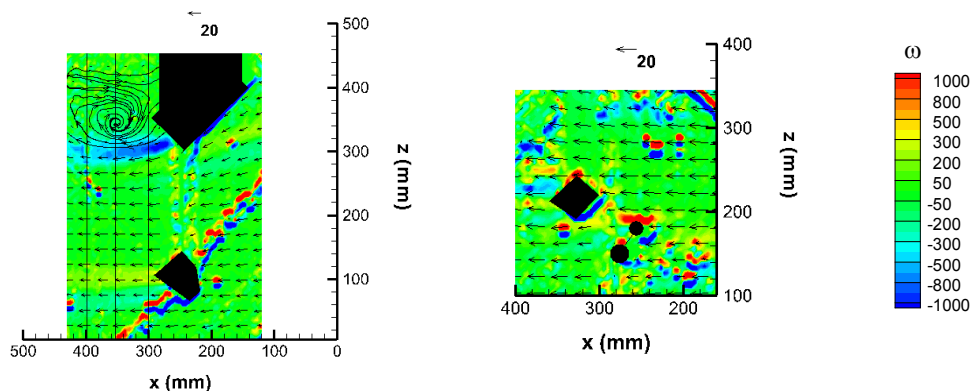


Figura 8. Caso  $\beta = 45^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  e  $U_\infty = 20\text{m/s}$ .

Outros resultados e conclusões serão abordados durante a apresentação a ser realizada durante o ENIC 2014.

#### 4. Conclusões

Um modelo em menor escala do CLA foi utilizado para testes em túnel de vento utilizando a técnica do PIV para que fosse possível a visualização do escoamento ao redor da TMI e do VLS. Os experimentos deste relatório foram feitos principalmente com o laser disposto na posição horizontal, com o intuito de abranger uma área mais extensa, e ainda levando em consideração a formação irregular da falésia, três ângulos de inclinação e de incidência do ar atmosférico, e uma faixa de velocidades de fluxo de 8 até 30 m/s. Os resultados obtidos foram consistentes e confirmaram que o escoamento atmosférico na região de lançamento é muito complexo ainda mais se considerado que o ar entra não apenas por uma direção, mas

por várias e ao mesmo tempo. Os resultados obtidos com o PIV com o laser paralelo foram de grande ajuda para que fosse possível complementar os resultados dos trabalhos anteriores

## Referências

Avelar, A. C., Faria, A. F., Brasileiro, F. L., Fisch, G., “Wind tunnel analysis of the wind angle of incidence in the flow pattern in the Centro de Lançamento de Alcântara”, 43<sup>rd</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, San Diego, 2013.

Bearman, P. W., “Vortex Shedding from oscillating bluff bodies”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 16, pp. 185 – 222, 1984.

Bimbato, A. M., “Estudo de Escoamentos Turbulentos em torno de um Corpo Rombudo de Superfície Hidraulicamente Lisa ou Rugosa Utilizando o Método de Vórtices Discretos” Tese (Doutor em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, Brasil, 2012.

Blessmann, J., “Simulação da estrutura do vento natural em um túnel de vento aerodinâmico,” Tese (Doutor em Ciências). Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, Brasil, 1973.

Brasileiro, F., “Análise do escoamento de ar na esteira de um corpo rombudo em túnel de vento utilizando PIV-Parte II”, Relatório de atividades de Iniciação Científica, PIBIC do Instituto de Aeronáutica e Espaço, 2012.

Loredo-Souza A.C, Schettini, E.B.C., Paluch M.J., 004. “Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento,” Turbulência 4, PP. 137-160, 2004.

Marins, L. M., “Caracterização Experimental do Escoamento no Interior de um Hidrociclone sem Núcleo Gasoso”, Dissertação (Mestre em Ciências) Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

Pires, L. B. M., 2009, “Estudo da Camada Limite Interna Desenvolvida em Falésias com Aplicação para o Centro de Lançamento de Alcântara,” 2009 150f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – National Institute for Space Research, São José dos Campos.

Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., Kompenhans, J. Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Springer-Verlag. ISBN 3-540-72307-2, 2007.

Stathopoulos, T., Baskaran, B. A., “Computer simulation of Wind environmental conditions around buildings”, *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 11, pp. 876 885, 1996.

Woo, H. G. C., Peterka, J. A., Cermak, J. E., 1977. “Wind Tunnel Measurements in the Wakes of Structures”. *National Aeronautics and Space Administration*, Washington, pp. 243.



Zhou, Y., Stathopoulos, T., “ A new technique for the numerical simulation of Wind flow around buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 72, pp. 137 – 147, 1997.

**Artigo publicado em 2014:**

Avelar, A. C., Fisch, G., Faria, A. F., Brasileiro, F. L. C., "Wind Flow Patterns in the Alcântara Space Launching Center", *Proceedings of the 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition 2014*, June 16<sup>th</sup> to June 20<sup>th</sup>, Atlanta, Georgia.

**Artigo submetido:**

Avelar, A. C., Fisch, G., Faria, A. F., Brasileiro, F. L. C., "Wind Flow Features in the Alcântara Space Launching Center", Escola de Primavera de Transição e Turbulência, EPTT 2014.