

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Análise de escoamentos em modelos aeroespaciais utilizando as técnicas de Tinta Sensível à Pressão (PSP) e à Temperatura (TSP)

Bolsista: Jessica Jia Ling Hsu/UNIVAP

Orientador(a): Ana Cristina Avelar

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2014 a julho de 2015

Resumo

O presente estudo dá continuidade ao projeto de iniciação científica iniciado em agosto de 2012, utilizando a técnica de Tinta Sensível a Pressão (*Pressure-Sensitive Paint* – PSP) para realizar medidas de distribuição de pressão ao longo da superfície de modelos de veículos espaciais. Durante o terceiro ano do projeto, intitulado “Análise de escoamentos em modelos aeroespaciais utilizando as técnicas de Tinta Sensível à Pressão (PSP) e à Temperatura (TSP)”, grande parte do período foi utilizado para revisões bibliográficas da tinta PSP Binária (*Binary Pressure-Sensitive Paint*) que foi utilizada nos últimos experimentos. Nos projetos anteriores era utilizado um kit da tinta PSP UniFIB ou UF-400 com sensibilidade a pressão de 0,7% por kPa, adequada para regimes transônico, supersônico e hipersônico, e no projeto iniciado em agosto de 2014 o objetivo era realizar ensaios em baixas velocidades utilizando um túnel de vento didático, nesse caso o TA-3 da Divisão de Aerodinâmica (ALA), utilizando a tinta PSP Binária. Recentemente foi dado início a implementação e instalação dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios. Até o momento da entrega deste relatório não foi possível instalar e configurar o sistema de Tinta Sensível a Temperatura (*Temperature Sensitive Paint* – TSP). O modelo utilizado é uma representação da Torre Móvel de Integração (TMI), que se encontra no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Esse tipo de ensaio será importante para a compreensão do complexo padrão de escoamentos que dependem das características de incidência do vento. Devido à recente instalação dos equipamentos da técnica PSP pra baixa velocidade, não foi possível obter um resultado que se mostrasse satisfatório. Uma possível comparação entre os dados obtidos com os ensaios

realizados com o PSP Binário e os resultados de ensaios utilizando a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*), que já vêm sendo utilizada para estudar o comportamento dos escoamentos na TMI, pode ser realizada até o XI ENIC.

1. Introdução

Medidas de pressão e temperatura na superfície de modelos são utilizadas para determinar a distribuição de carregamentos aerodinâmicos e para determinar a transferência de calor, respectivamente, para tanto eram utilizadas técnicas tradicionais como tomadas de pressão, medidores de fluxo de calor, fósforos termográficos e termopares para realizar os experimentos. Porém, apesar de serem os métodos mais comumente utilizados até os anos 80 em regimes que vão do subsônico ao supersônico (Nakakita *et al.* 2006) e apresentarem boa precisão, esses métodos podem ser caros e geralmente têm processos de fabricação trabalhosos, como é o caso das tomadas de pressão e dos termopares, além de geralmente fornecer dados com uma resolução espacial limitada. As tomadas de pressão, por serem pequenos orifícios feitos na superfície do modelo e precisarem ser conectados a transdutores de pressão através de tubos flexíveis (Barlow *et al.* 1999), que passam por dentro do modelo sugerindo que o modelo precise ter um espaço interno razoável, podem apresentar limitações físicas, como a impossibilidade de instalação em áreas com espessuras pequenas, como as empenagens ou asas de um modelo; e em cantos muito acentuados. Devido a essas limitações e a grande importância que essas medidas quantitativas possuem para os experimentos de dinâmica dos fluidos, desde os anos 80 vêm sendo utilizadas técnicas ópticas alternativas que possuem alta resolução espacial e que são baseadas no uso de moléculas luminescentes que são sensíveis a pressão e a temperatura, conhecidas como Tinta Sensível a Pressão (*Pressure Sensitive Paint – PSP*) e Tinta Sensível a Temperatura (*Temperature Sensitive Paint – TSP*) (Hsu, 2013). Comparadas a técnicas tradicionais, esses métodos oferecem a capacidade única de medidas de pressão e temperatura na superfície em todo o campo do modelo com um custo menor, além de serem adequadas para o estudo e entendimento de fenômenos físicos complexos do escoamento ao redor de modelos.

As técnicas PSP e TSP são baseadas na desativação de moléculas luminescentes que são sensíveis a variações de pressão do ar e pressão parcial de oxigênio no caso do PSP, e

sensíveis a variação da temperatura para o TSP. No caso do PSP quando a molécula luminescente absorve um fóton proveniente da fonte de iluminação, elas são excitadas para um estado energético elevado. Em seguida as moléculas retornam ao seu estado fundamental de energia emitindo um fóton de comprimento ainda maior do que o absorvido. A sensibilidade a pressão é resultado da interação das moléculas luminescentes com as moléculas de oxigênio, onde uma parte do estado energético é transferida para o modo vibracional da molécula de oxigênio, essa transição é chamada de *oxygen quenching*. Na técnica TSP o processo é similar ao do PSP, porém ao invés de retornar ao seu estado fundamental através de um processo radioativo (*oxygen quenching*), retorna utilizando um processo não radioativo, o *termal quenching*. A temperatura pode ser medida através da detecção da intensidade da fluorescência da tinta luminescente (Crafton, 2004). O processo fotofísico nessas técnicas são diferentes devido ao tipo de dados que se deseja obter, o funcionamento da tinta PSP é baseada no *oxygen quenching* que causa o decaimento da intensidade da luminescência de acordo com o aumento da pressão parcial do oxigênio ou da pressão do ar (Jahanmiri, 2011), enquanto na técnica TSP a luminescência decai de acordo com o aumento de temperatura. O princípio de funcionamento da técnica PSP e TSP pode ser visualizado na Fig. 1.

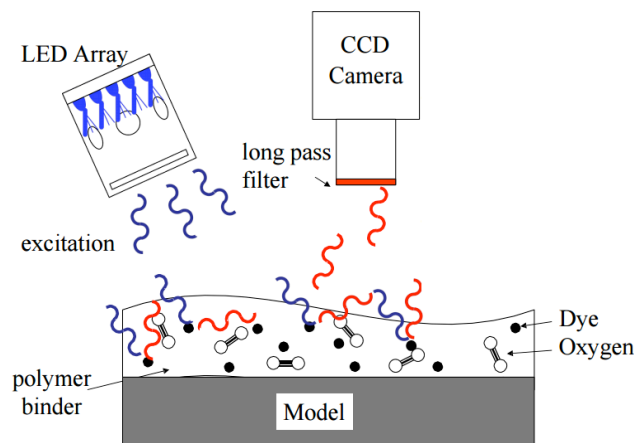


Figura 1. Esquema das técnicas PSP e TSP.

O princípio de funcionamento da técnica PSP foi descoberto e utilizado pela primeira vez por H. Kautsky and H. Hirsch em 1935, com moléculas luminescentes sensíveis a moléculas de oxigênio. Em 1980, J. Peterson and V. Fitzgerald realizaram demonstrações para analisar comportamento do escoamento utilizando uma técnica baseada na supressão do oxigênio em

tintas luminescentes, provando que seria possível a partir do uso de sensores de oxigênio realizar medidas de pressão na superfície de modelos. O primeiro grande laboratório a utilizar esse tipo de técnica para experimentos aerodinâmicos foi o *Central Aero-Hydrodynamic Institute* (TsAGI) na Rússia. Cientistas do TsAGI inspirados pelo trabalho com medição de oxigênio de I. Zakharov *et al.* em 1964 e 1974, realizaram experimentos utilizando uma tinta PSP com base de acriflavina ou beta-aminoanthraquinone em uma matriz que consiste em silichrome, amido, açúcar e polivinilpirrolidona. Outros cientistas, também do TSAGI, iniciaram uma pesquisa em 1983 para melhorar a precisão do PSP através da medida de tempo de vida (*lifetime* ou *decay time*), e logo descobriram que as medidas utilizando o método *lifetime* sofriam de sensibilidade a temperatura, o que levou o instituto a desenvolver técnicas baseadas na intensidade desde 1985. A primeira universidade foi a Universidade de Wahsington (*Univeersity of Washington*), em parceria com a Boeing e o laboratório da NASA *Ames Research Center*, em 1980, onde alunos desenvolveram um experimento com o princípio da sensibilidade das moléculas luminescentes a pressão. O desenvolvimento da técnica foi um passo importante e crítico, devido ao progresso da técnica convencional de medidas de pressão baseadas em um ponto a uma técnica global de mapeamento de pressão. A descrição detalhada da história e utilização das técnicas pode ser encontrada em (Liu and Sullivan, 2004) e (Bell *et al.* 2001).

A técnica PSP Binária, que durante o último ano de projeto foi a técnica que se conseguiu mais avanço e facilidade para implementação e ensaios, possui o mesmo princípio da técnica PSP (UniFIB) e TSP, moléculas luminescentes. Porém, a composição Binária utiliza uma sonda de referência para compensar as variações na luminescência do sensor de pressão (*signal probe*), causada por erros de deformação e deslocamento do modelo e variação na iluminação e temperatura (Crafton, 2004), que pode ser visualizada na Fig. 2. A razão entre o sensor de pressão e a sonda de referência permite que o efeito de sensibilidade a temperatura seja isolado do sensor de pressão, tornando o experimento com a fórmula Binária livre dos erros de temperatura a qual a fórmula UniFIB está propensa (innssi.com). Essa A sonda de referência adicionada deve ser excitada com o mesmo comprimento de onda que o sensor de pressão e retornar ao seu estado fundamental através de um comprimento de onda espectralmente distinto (Lee, 2010).

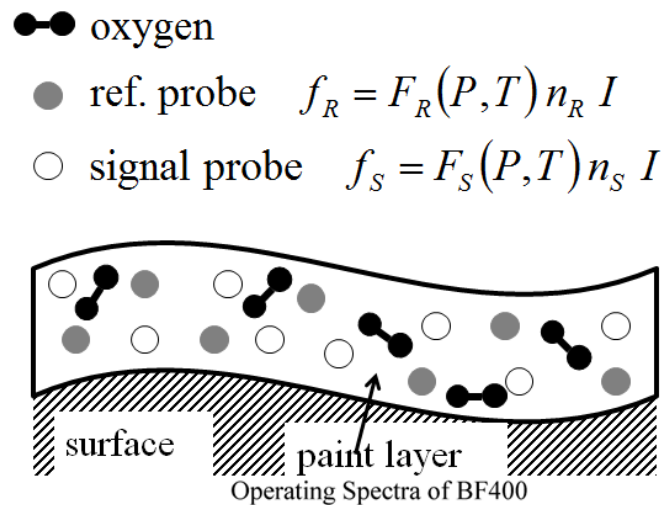


Figura 2. Esquema da fórmula Binária da técnica PSP com sensor de pressão e sonda de referência para minimizar erros.

A técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*) é um método óptico, não intrusivo, através do qual pode-se visualizar e analisar o movimento de partículas em fluidos. Seu princípio de funcionamento básico consiste na iluminação por um plano de laser pulsado em uma seção do escoamento em dois instantes de tempo na ordem de microssegundos, que registra a posição de partículas distribuídas no fluido com o auxílio de uma câmera CCD (Raffel *et al.*, 2007).

2. Material e métodos

No início do projeto já estava definido que o modelo a ser utilizado nos primeiros ensaios com a técnica PSP Binária seria um corpo rombudo que representaria a Torre Movel de Integração (TMI), localizada no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Na imagem abaixo, Fig. 3, é possível ver um desenho do modelo esboçado utilizando o software CATIA. O modelo possui 6 tomadas de pressão em duas de suas faces, totalizando 12 tomadas de pressão. As tomadas possuem 1mm de diâmetro e foram dispostas linearmente com um espaçamento lateral de 20mm. O modelo foi confeccionado por uma empresa externa, que realizaram os procedimentos de corte e furos para as tomadas de pressão. Uma vez feito todo esse processo, iniciou-se o processo de colagem dos tubos metálicos flexíveis de aço inox internos do modelo.

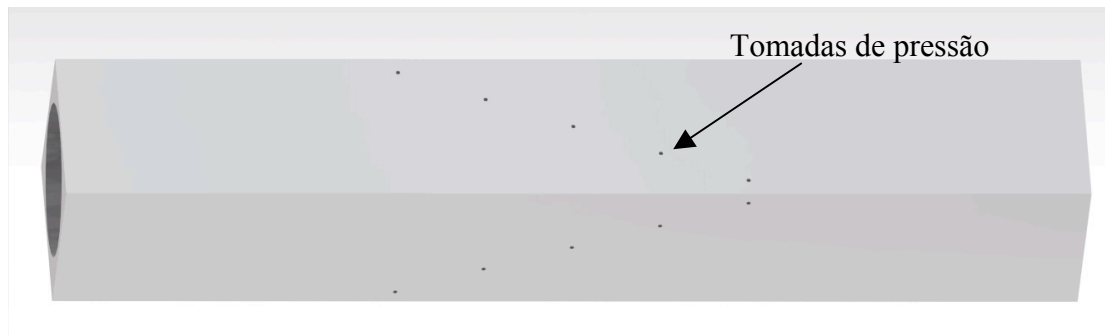


Figura 3. Desenho do corpo rombudo que representa a TMI, com 12 tomadas de pressão.

Após o processo de colagem dos tubos metálicos, iniciou-se o processo de pintura do modelo, que foi realizado nas dependências da Divisão de Aerodinâmica do IAE, ALA. Primeiramente foi realizada a limpeza da superfície do modelo com acetona e a partir do uso de uma pistola de ar comprimido pintou-se o modelo com a tinta base, para uniformização e homogeneização da superfície, em seguida aplicou-se a tinta PSP Binária, que contém as moléculas luminescentes. Após a pintura o modelo foi levado à estufa, onde ocorre a secagem e fixação da tinta.

Para a realização dos ensaios foi utilizado o túnel de vento TA-3, localizado na ALA. O túnel possui seção de testes de 0,69m x 0,47m e atinge velocidades de 0 a 144 km/h (40 m/s) com a seção de testes aberta; e de 0 a 160 km/h (44 m/s) com a seção de testes fechada, sem nenhum tipo de bloqueio na seção de testes. O objetivo principal do TA-3 é realizar ensaios de pesquisa aplicada, utilizando técnicas como PIV, Anemometria de fio quente e métodos de visualização de escoamentos como tufo e aplicação de filme de óleo (www.iae.cta.br). Para a realização dos ensaios no TA-3 com a técnica PSP são utilizados um canhão de LED LM2X, com o comprimento de onda 400nm e 460nm, para controle do LED é utilizado um controlador de pulsos chamado PSG-2, que controla o tamanho do pulso, o *delay*, a taxa de repetição entre outros parâmetros relacionados ao *timing* (innssi.com) e uma câmera CCD de 2 megapixel com um filtro óptico acoplado, que separa os dois sinais espectrais da tinta PSP Binária. Após a instalação dos equipamentos (câmera e LED), conectou-se a câmera em um computador que possui os *softwares* de aquisição e análise de dados, OMS *acquire* e ProImage, o modelo foi instalado na seção de testes, como pode ser visualizado na Fig. 4.

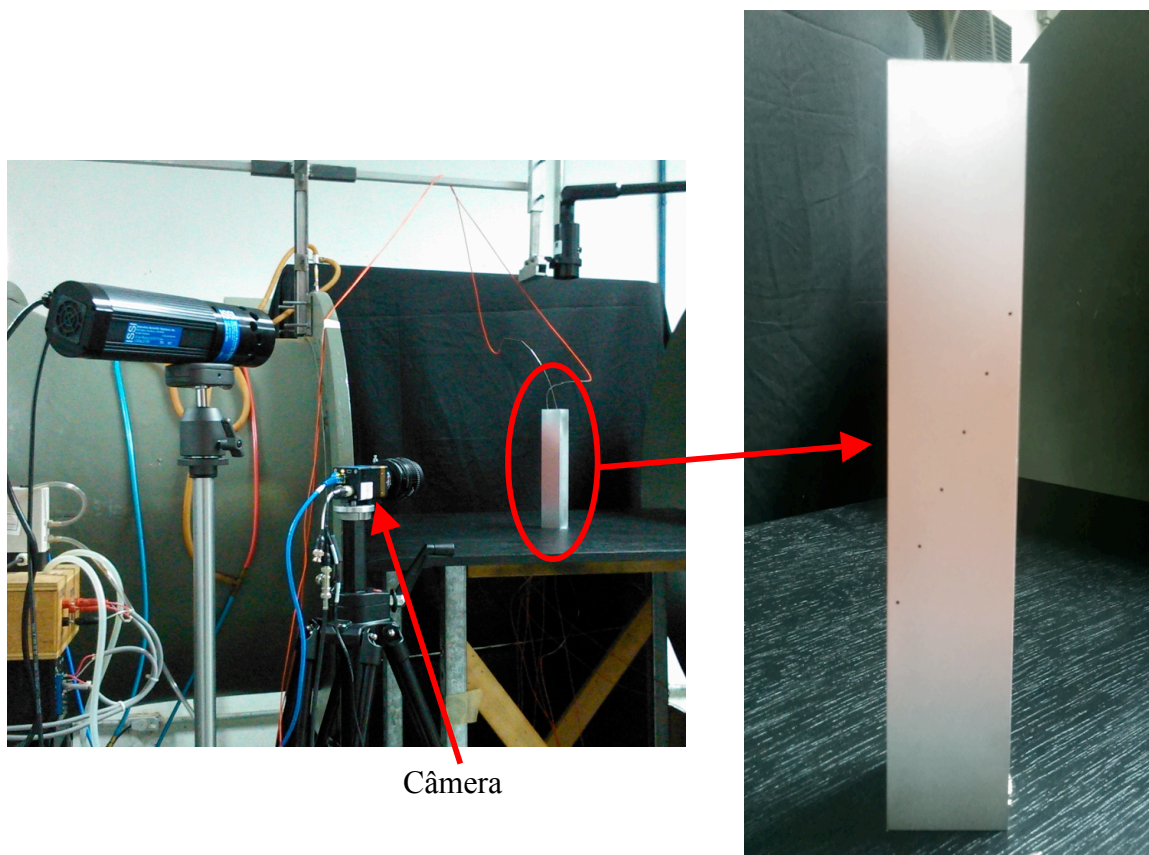


Figura 4. Distribuição do aparato de iluminação e aquisição.

Por fim, foi realizado o alinhamento e ajuste de foco da câmera, para que se pudesse obter a imagem mais nítida e próxima ao modelo. O ensaio tem início com a aquisição de dados de imagens, onde são obtidas uma sequência razoável de imagens para que o erro da medida seja reduzido, *wind-off* (com o túnel desligado), de referência e de *background* (com o LED desligado), obtidas a temperatura e pressão ambiente, e imagens *wind-on* (túnel em funcionamento) para cada velocidade desejada. Como o túnel TA-3 não apresenta suporte para ensaios com tomadas de pressão, a pressão em cada tomada foi medida manualmente com o auxílio de um manômetro portátil.

3. Conclusões e comentários

É bem documentado que os métodos ópticos se sobressaem cada vez mais nos experimentos aerodinâmicos realizados ao redor do mundo, prova disso são as centenas de artigos e documentos de laboratórios renomados que vêm fazendo o uso dessas técnicas. Devido à

recente montagem do equipamento da técnica PSP de baixa velocidade com a fórmula binária não foi possível obter resultados que fossem relativamente confiáveis, devido à necessidade de tentar novas configurações, como por exemplo a distância da câmera em relação ao modelo. Um outro problema que foi percebido nesses primeiros ensaios foi a proximidade da câmera com a seção de testes do túnel, onde devido ao movimento da câmera pelo vento, algumas imagens se desalinham, tornando a redução de dados incoerente, assim como é necessária uma análise comparativa com os dados que podem ser encontrados na literatura com esse tipo de modelo. Com relação aos ensaios utilizando a técnica TSP, estes só não puderam ser realizados ainda devido a problemas na janela de ensaios do Túnel Transônico Piloto (TTP). Os próximos passos a serem tomados são: a realização da calibração da técnica PSP com a composição binária e a realização de novos ensaios a partir dessa calibração. Eventuais dados e comparações com os dados obtidos utilizando PIV que possam ser apresentados, serão realizados durante o XI ENIC.

4. Divulgação dos Resultados

Ribeiro de Barros Aguiar, A., Francisco, C. P. F., Avelar, A. C., Falcão Filho, J. B. P., Hsu, J. J. L., 2012, “*Pressure Distributions on a Agard Model in a Transonic Wind Tunnel Using the PSP Technique*”, 14th ENCIT, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Avelar, A. C., Falcão Filho, J. B. P., Hsu, J. J. L., 2013, “*Surface Pressure Measurements on a Space Launch Vehicle in Transonic Regime*”, 22nd Congress of Mechanical Engineering, Riberão Preto, São Paulo, Brasil.

Avelar, A. C., Basso, E., Falcão Filho, J. B. P., Romero, P. G. M., Hsu, J. J. L., 2014, “*Experimental and Numerical Analysis of the Flow Patterns Around a Sounding Rocket in the Transonic Regime*”, 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference, Atlanta, GA, United States of America.

Avelar, A. C., Basso, E., Falcão Filho, J. B. P., Romero, P. G., Hsu, J. J. L., 2014, “*Investigation of the Flow Patterns on a Sounding Rocket Fore-Body Section*”, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, St. Petersburg, Russia.



Referências

Barlow, J. B., Rae, W. H., Pope, A., 1999, “Low-Speed Wind Tunnel Testing”, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc.

Bell, J. H., Shairer, E. T., Hand, L. A., Mehta, R. D., 2001, “Surface Pressure Measurements Using Luminescence Coatings”, *Annual Review of Fluid Mechanics* 33:pp. 155-206.

Crafton, J., Fonov, S., Jones, E. G., Goss, L., Tyler, C., 2004, “Simultaneous Measurements of Pressure and Deformation on a UCAV in the Sarl”, 11th International Symposium on Flow Visualization, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, United States of America.

Hsu, J. J. L., 2013, “Análise da distribuição de pressão em modelos de veículos espaciais utilizando-se a técnica de tinta sensível à pressão”, IX ENIC, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Jahanmiri, M., 2011, “Pressure Sensitive Paints: The Basics & Applications”, Division of Fluid Dynamics, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Lee, J. K., Kim, S., Ko, J., Chung, I., Fonov, S., Forlines, A., Crafton, J., 2010, “Pressure Sensitive Paint System for Measurements in a Large Low Speed Wind Tunnel”, 27th AIAA Aerodynamics Measurement Technology and Ground Testing Conference, Chicago, Illinois, United States of America.

Liu, T., Sullivan, J. P., “Pressure and Temperature Sensitive Paints”, Springer-Verlag, New York, 2005.

Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K., Watanabe, S., 2006, “*Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA*”, Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu, Tokyo, Japan.



Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S., Kompenhans, J., 2007, “Particle Image Velocimetry: A Practical Guide”, Springer-Verlag.

Sites consultados:

Innovative Scientific Solutions, Inc. Disponível em: <innssi.com> Acesso em 30 de julho de 2015.

Instituto de Aeronáutica e Espaço, Túnel de Anemometria – TA-3. Disponível em: <www.iae.cta.br/site/page/view/pt.labs.ala_ta3.html> Acesso em 28 de julho de 2015.