



## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Implementação do sistema PSP não estacionário em túneis de vento.

Bolsista: Arthur Durigan Bahdur

Orientador(a): Cayo Prado Fernandes Francisco

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2016 a Julho de 2017

### Resumo

O estudo em questão visa a aplicação da técnica PSP para escoamentos em regime não estacionário, ao redor de corpos aerodinâmicos a serem ensaiados no Túnel Transônico Piloto (TTP). No projeto foi realizada a implementação do sistema PSP não estacionário (*fast* PSP), começando pela calibração do sistema e posteriormente alguns testes para avaliação da sua resposta foram realizados no TTP em um aerofólio NACA 0012, onde foram observadas ondas de choque e com o aumento do número de Mach, uma região de oscilação destes choques. O estudo em questão é de grande importância para aplicações aeroespaciais, uma vez que em algumas situações a separação do escoamento ocasionado pela flutuação da posição de ondas de choque sobre estes corpos pode resultar em uma oscilação aeroelástica de alta frequência conhecida como *Buffeting* tendo efeitos indesejáveis sobre o corpo.

### 1. Introdução

A tinta sensível à pressão, conhecida como *Pressure-Sensitive Paint* (PSP) é um método para medição da pressão resultante do escoamento sobre um corpo. Esta técnica utiliza a radiação eletromagnética emitida por partículas presentes na tinta PSP, denominadas luminóforos, durante seu decaimento, sendo esta variação proporcional à pressão parcial do oxigênio contido no ar. Um exemplo de aplicação desta técnica é a análise do escoamento, com ênfase na pressão, em torno de aeromodelos, como visto na Figura 01.

Mais especificamente, a tinta PSP não estacionária ou *Fast PSP*, ou até mesmo, *Unsteady PSP*, é um aperfeiçoamento desta técnica, onde as moléculas da tinta respondem de forma mais rápida à excitação eletromagnética. Outra vantagem é que essa tinta possui uma menor sensibilidade à variação da temperatura durante os ensaios.

A tinta *Fast PSP* mapeia variações na pressão em intervalos de microssegundos permitindo um detalhamento dos fenômenos aerodinâmicos transientes que ocorrem na superfície do corpo de prova, como oscilações de ondas de choque, tornando possível a análise e quantificação de fenômenos transientes no escoamento, o que é impossível com a tinta normal.

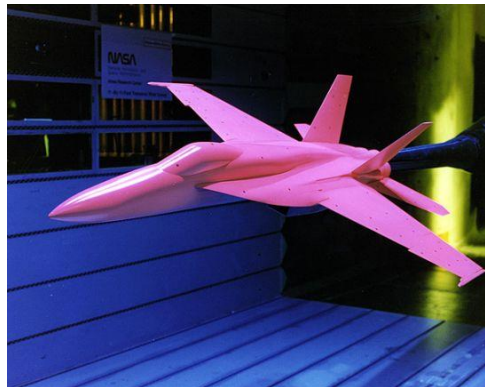


Figura 01. Modelo de avião pintado com a tinta PSP. [1]

O PSP combina as vantagens de um método não intrusivo com a possibilidade de medição em diversas regiões do modelo, com altas resoluções espaciais. O princípio de trabalho do PSP é dividido em sistema de intensidade e de decaimento, podendo ser descrito, teoricamente, da seguinte forma.

A tinta PSP é uma tinta de revestimento polimérico que consiste de um *Binder* e *Dyes* (corantes), conforme mostrado na Figura 02. Os corantes dentro da tinta serão excitados para um estado de mais alta energia através da radiação ultravioleta emitida por uma fonte. Após a absorção, existem diversos estados excitados que a molécula do luminóforo pode ocupar que podem ser vistas nos diagramas de níveis de energia de Jablonski, mostrado na Figura 03. Estes estados de maior energia são instáveis e as moléculas perdem, em seguida, parte de sua energia por emissão de fótons (Figura 04). A parte restante da energia será perdida através da

transferência de energia vibracional (térmica) para as partículas de oxigênio presentes no ar que é o fenômeno de *Quenching*.

A probabilidade da perda de energia do estado excitado ocorrer por emissão de fótons ou por *Quenching* depende da pressão parcial do oxigênio no escoamento, que é proporcional à própria pressão do escoamento. Desta forma, uma câmera de alta resolução obtém imagens da superfície pintada onde pode-se identificar regiões mais claras, onde mais fótons foram emitidos, e regiões mais escuras, onde menos fótons foram emitidos.

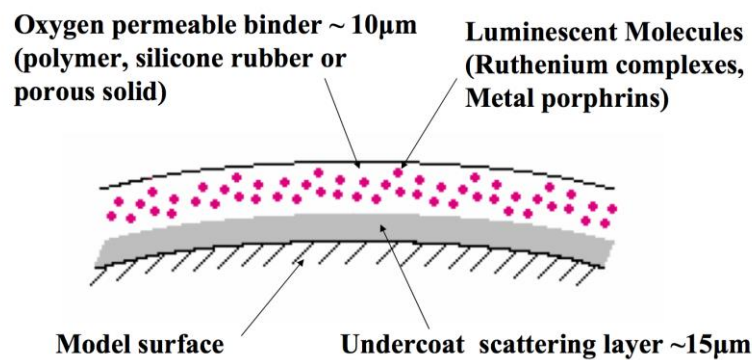


Figura 02. Composição esquemática do PSP. [2]

Contudo, em aplicações práticas, a absorção de luz pelo luminóforo depende da intensidade da luz, da profundidade do luminóforo e sua concentração, fazendo com que seja necessário um procedimento cuidadoso para a aplicação da tinta e um trabalho de calibração minucioso.

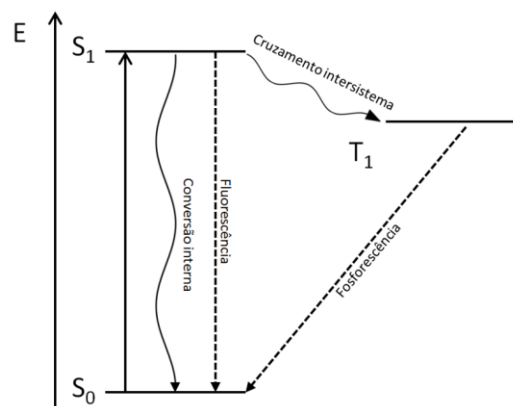


Figura 03. Esquema geral de um diagrama de Jablonski. [3]

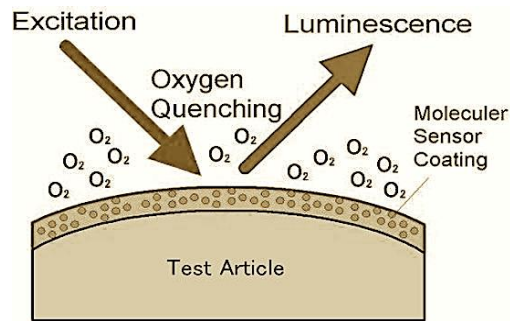


Figura 04. Representação esquemática do funcionamento do PSP em um corpo de prova. [4]

Como dito acima, após a excitação, a molécula pode voltar ao estado fundamental de duas formas. Emissão, que é a fluorescência ou fosforescência ou pelo efeito *Quenching*. Na presença do oxigênio do ar, as moléculas do luminóforo transferem para aquelas, sua energia absorvida na forma de energia de vibração. Da mesma forma, conforme a temperatura aumenta, as moléculas perdem parte de sua energia absorvida por decaimento não radioativo, o que depende especificamente do tipo de binder.

Para efeitos de demonstração da aplicabilidade da técnica, foi realizado ensaio com o PSP no túnel transônico com número de Mach 0,9 e 1 para um modelo em escala reduzida do foguete VS-40 do IAE. Os resultados obtidos para as distribuições de pressão sobre o modelo são mostrados nas figuras 05 e 06.

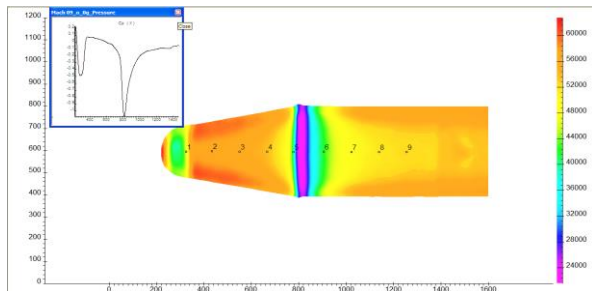


Figura 05. Modelo do VS-40 a  $M = 0.9$ .

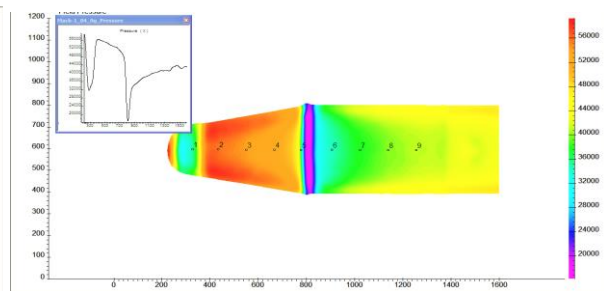


Figura 06. Modelo do VS-40 a  $M = 1$ .

Dentre as diversas aplicações possíveis da técnica *fast PSP*, uma aplicação de interesse no setor aeroespacial é o estudo do fenômeno de *buffeting* aerodinâmico. Segundo [5], o *buffeting* é uma instabilidade de alta frequência induzida em corpos aerodinâmicos pela oscilação de ondas de choque e conseqüente descolamento da camada limite. Esse efeito pode

induzir uma ressonância aeroelástica no corpo podendo levar a falha estrutural ou fadiga precoce.

Neste projeto de iniciação científica é proposta, como parte de um projeto de pesquisa desenvolvido na Divisão de Aerodinâmica do IAE, a implantação preliminar do sistema *fast* PSP, sua calibração e testes iniciais para avaliação da resposta do sistema, utilizando o túnel 3 e transônico, TTP. O objetivo principal do trabalho realizado é a calibração do sistema *fast* PSP e comparação preliminar dos resultados obtidos com aqueles disponíveis na literatura para aerofólios NACA 0012.

## 2. Materiais e métodos

O procedimento experimental adotado é o chamado método da intensidade para o cálculo da pressão distribuída no corpo e se baseia na medição da quantidade de fótons que são emitidos pela tinta, quando submetida à luz no comprimento ultravioleta. Para isso é necessária uma câmera de alta resolução, conhecida por “Cooled Scientific CCD Camera” (Fig.07) e uma fonte de excitação, que neste trabalho será uma luz ultravioleta emitida por um LED.

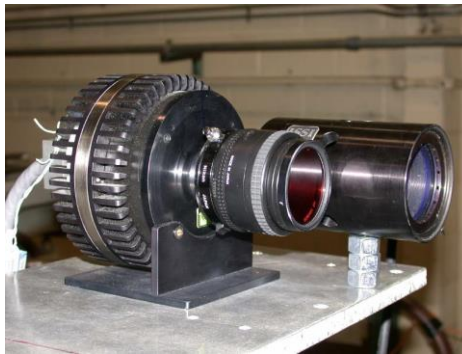


Figura 07. “Cooled Scientific CCD Camera”, à esquerda e LED, à direita da imagem. [1]

Depois que a imagem é capturada na região de interesse do corpo de prova, a pressão pode ser determinada em cada uma dessas regiões através da equação 1, de Stern-Volmer:

$$\frac{P}{P_{REF}} = A + B \frac{I_{REF}}{I} \quad (1)$$

O método utilizado para o cálculo de A e B e de  $P_{ref}$  e de  $I_{ref}$  é o mesmo mostrado em [7].

A calibração da tinta é uma etapa essencial para obtenção de resultados quantitativos se o objetivo é mapear os valores de pressão em torno do modelo de forma contínua e sem os problemas de cabeamentos encontrados quando se trabalha com tomadas de pressão ou microfones. Além disso, a técnica PSP torna possível uma análise mais detalhada do escoamento devido ao mapeamento contínuo da superfície.

Após a calibração da tinta, foram realizados experimentos no túnel de vento transônico em um modelo NACA 0012 a diferentes números de Mach. Adicionalmente foram realizados experimentos transientes nos quais o número de Mach variou aceleradamente de 0 até um valor pré definido. A montagem experimental para essas campanhas é mostrada na Figura 08.

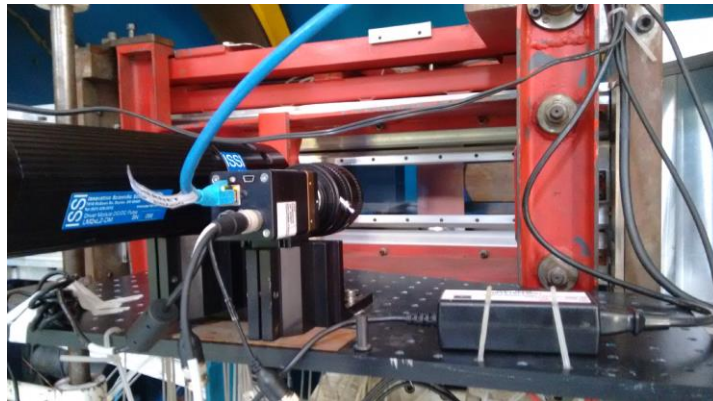


Figura 08. Aparato experimental para o sistema *fast* PSP, onde podem ser vistos da esquerda para direita o emissor LED, a câmera CCD, a janela da seção de testes do TTP e o aerofólio NACA 0012.

### 3. Resultados

Durante o segundo semestre de 2016 foi realizada a calibração da tinta PSP e alguns testes iniciais em túnel de vento. Para calibração foram realizados 5 testes variando-se a temperatura de 20°C até 45°C em um intervalo de 5°C. Dessa forma foram obtidas 6 curvas, da intensidade luminosa normalizada (ordenadas) por pressão em Pa (abscissas) colocadas em um gráfico comparativo onde cada cor é uma temperatura e cada formato de linha é um teste, como visto na figura 09.

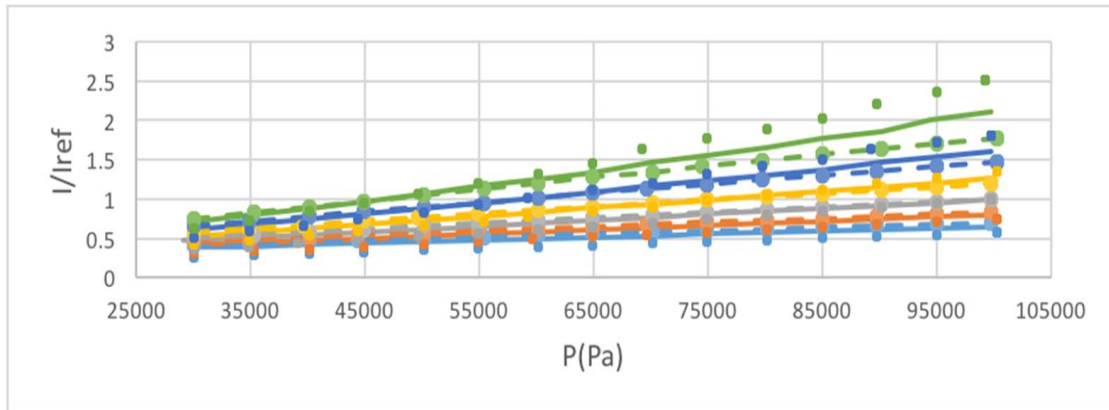


Figura 09. Gráfico de comparação.

Após a calibração foram realizados ensaios com o aerofólio NACA 0012 (figura 10) no túnel transônico TTP. O arranjo experimental completo na seção de teste é mostrado na figura 06.

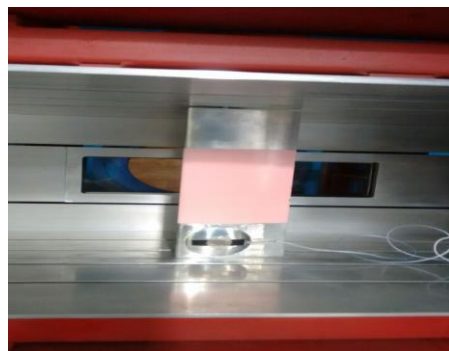


Figura 10. Corpo de prova para o teste do PSP.

Primeiramente foram realizados ensaios preliminares para avaliação da resposta da tinta. Nestes experimentos foram obtidas distribuições de intensidade luminosa sobre o modelo, variando-se o número de Mach e o ângulo de ataque. As regiões com cores mais frias, são as regiões de maior pressão a o traço vermelho mostra a posição da transição da camada limite, figura 11.

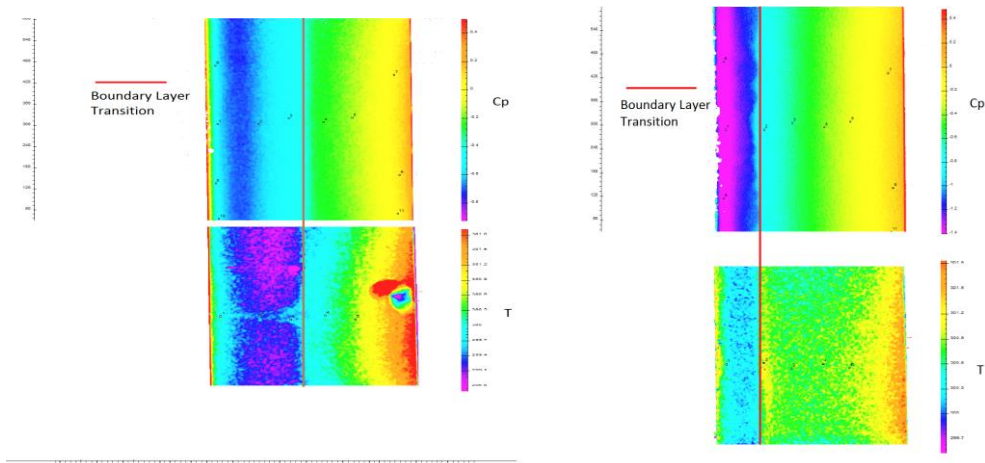


Figura 11. Espectro luminoso para ângulo de ataque nulo e número de Mach 0,75 na esquerda e ângulo de ataque 4° e número de Mach 0,65 na direita.

Após esses ensaios preliminares, realizou-se uma campanha de ensaios para testar a resposta transiente da tinta. Dessa forma, o mesmo modelo NACA 0012 foi usado, porém com uma nova pintura, uma vez que a tinta degrada em poucos dias quando não está protegida. Dessa forma foram obtidas 500 imagens a 200 Hz com o número de Mach variando de 0,5 até 0,998. As fotos sem filtro (figura 12) não possuem muita informação, uma vez que devem passar por uma análise mais profunda.

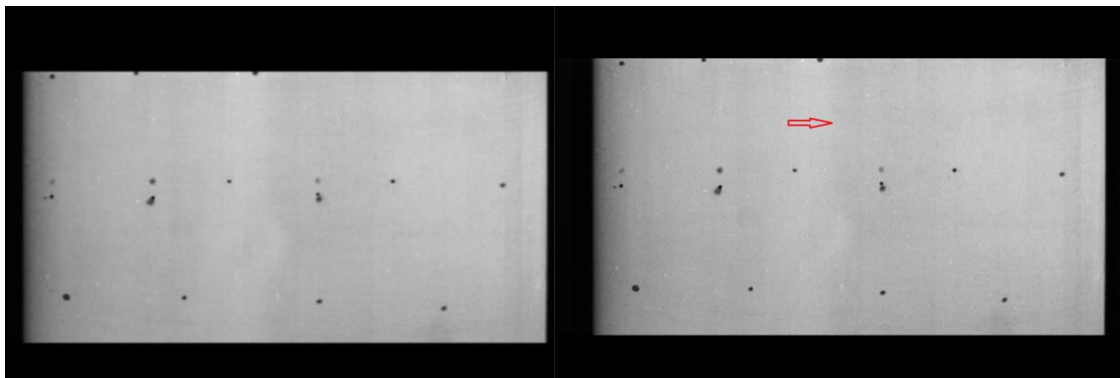


Figura 12. Modelos NACA 0012 em ensaio com número de Mach 0.998.

Na figura 12 é possível notar uma mancha branca, marcada na imagem da direita (seta em vermelho), que indica a onda de choque que ocorre sobre o modelo.

Feita a filtragem das imagens, obteve-se o conjunto de quadros, de 1 a 12, com o número de Mach variando de 0,5 até 0,998, juntos na figura 13.



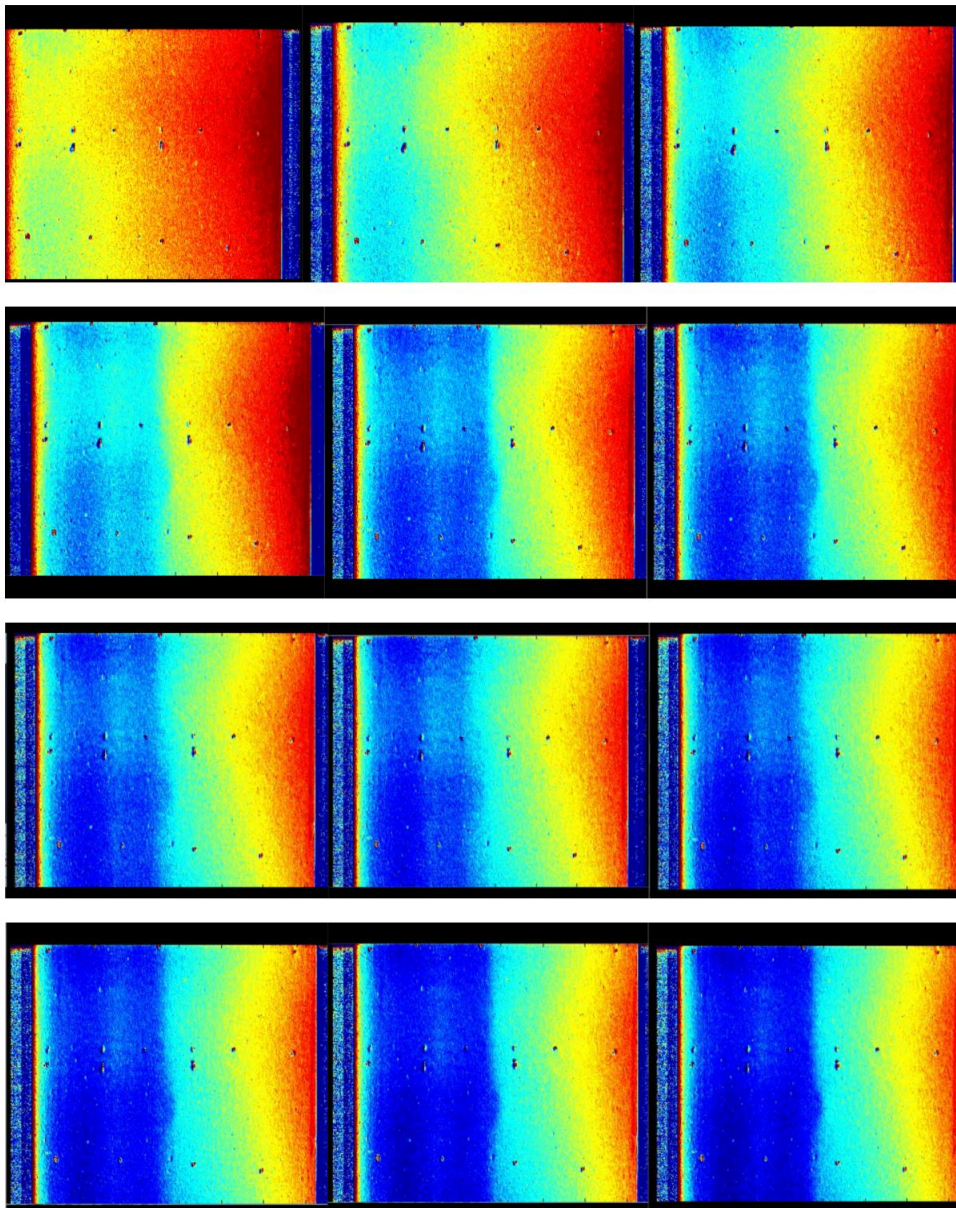


Figura 13. Quadros com o número de Mach variando de 0,5 até 0,998.

A onda de choque que começa a se formar no quadro 3 e está completamente formada no quadro 5, quando chega no quadro 7, se desloca em direção ao bordo de ataque até o quadro 8, depois disso ela volta a se deslocar em direção ao bordo de fuga, sugerindo uma oscilação que poderia dar origem ao efeito *buffeting*. Segundo [6], a onda de choque para  $M = 0,8$  deve estar muito próximo da metade da corda do perfil, assim como é observado na figura 13.



#### 4. Conclusões

Foi possível mostrar a aplicabilidade da tinta *fast* PSP e sua viabilidade para a análise de fenômenos transientes devido ao tempo de resposta rápido da tinta. Foi verificada experimentalmente a oscilação da onda de choque sobre o aerofólio NACA 0012 em condições transônicas, que pode originar o fenômeno aeroelástico de *buffeting*, mostrando a viabilidade da técnica *fast* PSP para análises futuras mais específicas como o cálculo da amplitude e da frequência desse efeito. Os resultados para distribuição de pressão sobre o modelo também foram coincidentes com os resultados mostrados por [6], o que ratifica a eficácia da técnica.

Dessa forma é possível concluir que a tinta *fast* PSP é uma ferramenta útil para o estudo experimental de fenômenos aerodinâmicos e aeroelásticos dependentes de flutuações no campo de pressão sobre a superfície de modelos a serem testados em túneis de vento.

#### Referências

- 1 - Aerospaceweb. (s.d.). <http://www.aerospaceweb.org/design/psp/images/f18.jpg> - 01/02/2017.
- 2 - BENCIC, T. Experimental Techniques: Optical surface pressure measurements using luminescent coatings. Optical Instrumentation Technology and NDE Branch; NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, 2008.
- 3 - Por HidekiD - Obra do próprio, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=49692416> - 01/02/2017.
- 4 - Aerospaceweb. (s.d.). [http://velocimetry.net/psp\\_principles.htm](http://velocimetry.net/psp_principles.htm). - 02/02/2017.
- 5 - Wikipédia. (s.d.). <https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroelasticity>. - 03/07/2017.
- 6 - Sergio Antonio de Oliveira Neto. (2015). *EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE TEST SECTION SLOTS IN WIND TUNNELS*. Rio de Janeiro: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering.
- 7 - Bahdur, A. D. (2017). *Relatório Parcial – Implementação do sistema PSP não estacionário em túneis de vento*. São José dos Campos: PIBIC.