

DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL DA DIVISÃO DE AERODINÂMICA

1. DESCRIÇÃO DO TÚNEL TRANSÔNICO PILOTO

O Túnel Transônico Piloto (TTP) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) é uma instalação moderna, construída em 1997 com recursos do Ministério da Aeronáutica da ordem de 3 milhões de dólares em equipamentos e operacionalizada em 2002. O túnel tem um circuito aerodinâmico convencional fechado que é continuamente acionado por um compressor principal axial de dois estágios com 830 kW de potência, e também pode ser operado intermitentemente por meio de um sistema de injeção combinado com o acionamento principal durante no mínimo 30 segundos. A seção de testes do túnel tem largura de 0,30 m, altura de 0,25 m e comprimento de 0,85 m com paredes fendidas com razão de área aberta de 5%. Com sistemas automáticos de controle de pressão total (de 50 kPa a 125 kPa) temperatura total (da condição ambiente a 45 C), umidade (até ponto de orvalho – 40 C) para simular condições estáveis de número de Mach (de 0,2 a 1,3) e número de Reynolds, relativos às condições na seção de testes. A Figura 1 mostra uma vista parcial do circuito aerodinâmico com algumas válvulas de controle e tubulações de sistemas auxiliares, e uma estrutura em cinza que é utilizada para abrir a porta da Câmara Plena que abriga a seção de testes.



Figura 1 – Vista parcial do circuito aerodinâmico do TTP.

A Figura 2 mostra o envelope operacional do TTP com sua capacidade em termos do número de Reynolds relativo a uma corda típica de 0,027 m. A potência instalada do compressor principal é suficiente para atingir praticamente todo o envelope continuamente (ver curva limite de potência). O túnel é uma escala 1/8 de um projeto industrial que não teve continuidade por falta de recursos financeiros na época. O túnel piloto foi projetado inicialmente para estudar as inovações técnicas do projeto industrial, especialmente em relação à operação do sistema de injeção combinada com o acionamento convencional. Além disso, sua operação também visa o treinamento de pessoal técnico no desenvolvimento de pesquisas básicas e acadêmicas em regimes transônicos, testes de veículos com geometrias simples como veículos de sondagem, mísseis e artefatos,

desenvolvimento de perfis aeronáuticos, testes qualitativos de aeronaves em configurações básicas, testes de anemômetros entre outros.

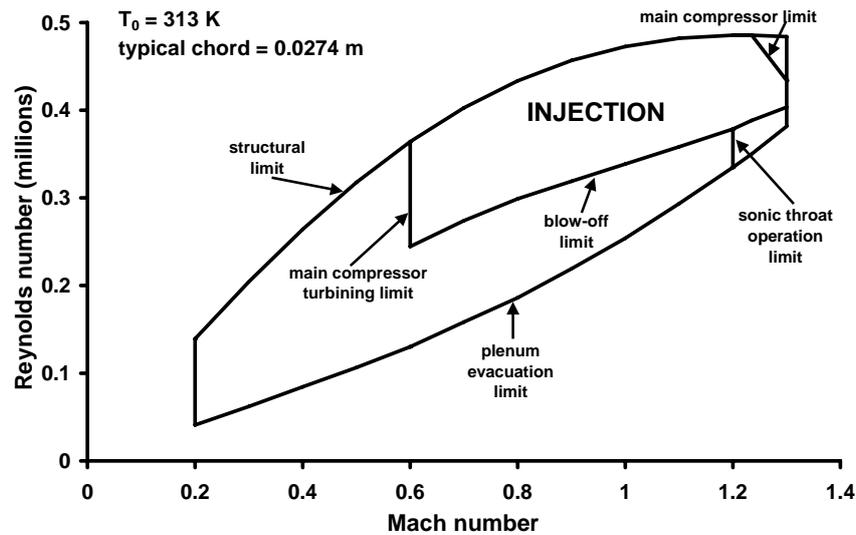


Figura 2 – Envelope operacional do TTP.

Para realizar seus ensaios o túnel conta com 3 balanças internas multi-componentes para medidas de forças e momentos, 3 módulos de varredura de sensores de pressão com 64 canais ao todo para testes de distribuição de pressão, um sistema de visualização tipo Schlieren, equipamento de fio-quente para medidas precisas de velocidade e sistema de aquisição baseado em tinta sensível a pressão (PSP – “Pressure Sensitive Paint”), para determinação de distribuição de pressão sobre superfícies. Além disso, o túnel possui sistema de posicionamento de sonda bidimensional, sistema de ajuste de ângulo de ataque, sistema de controle remoto de ângulo dos flapes de reentrada, sistema de acionamento de mastro auxiliar e dispositivos de calibração (plataforma para aplicação de cargas nas balanças internas, sonda de pressão com 34 tomadas, sonda de 5 furos, tubos de Pitot).

Recentemente foi concluída no TTP campanhas para ensaios dos veículos de sondagem Sonda III, VS-30 e VS-40 utilizando recursos da Agência Espacial Brasileira (AEB), nas quais foram investidos durante os anos de 2007 a 2011 recursos para melhoramentos, adaptações e implantações de sistemas de aquisição e de controle para aumento da capacidade de ensaios e de produtividade. A Figura 3 mostra o modelo completo do Sonda III em escala 1:20, com 0,35 m de comprimento, instalado no mastro da seção de testes.

A Figura 4 mostra um expressivo resultado com o modelo do veículo de sondagem VS-40 utilizando a técnica da tinta sensível a pressão. A figura mostra a capacidade de análise da técnica por meio da distribuição de pressão numa linha traçada sobre a imagem.

Desde sua operacionalização o túnel tem realizado muitos estudos científicos que têm sido apresentados em conferências e em revistas, contando com a colaboração de vários estudantes de graduação de diversas universidades (ITA, ETEP-São José dos Campos, UNIVAP, UNITAU, USP-São Carlos), através de bolsas de Iniciação Científica do CNPq. Além disso foram desenvolvidos vários trabalhos de conclusão de curso, e encontra-se em conclusão trabalho de mestrado no ITA explorando a capacidade do túnel em comparação com resultados de simulações numéricas. Este trabalho simula a seção de testes do túnel com um perfil aeronáutico instalado, utilizando as equações de Euler, com o objetivo de investigar as diversas interferências causadas pela presença

das paredes e das fendas longitudinais da seção de testes, comparando com os resultados experimentais, nos quais se utilizou tomadas de pressão e tinta sensível à pressão. O trabalho será apresentado ainda neste semestre e o mestrando tem a intenção de dar continuidade a seus estudos, possivelmente aprofundando a análise, por meio de uma análise com modelo de turbulência, razão pela qual está sendo pedida uma bolsa de doutorado. Este trabalho será de grande importância para o desenvolvimento computacional pretendido com este projeto da CAPES.

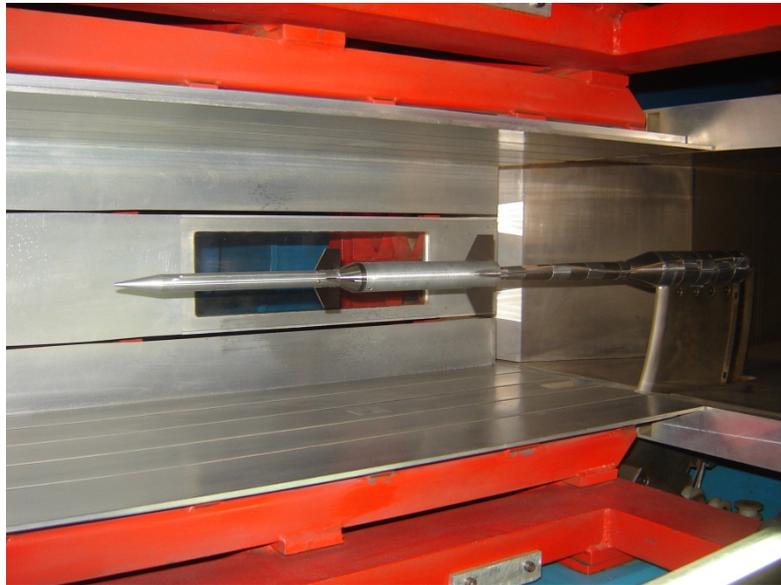


Figura 3 – Modelo do VS-30 instalado na seção de testes do TTP.

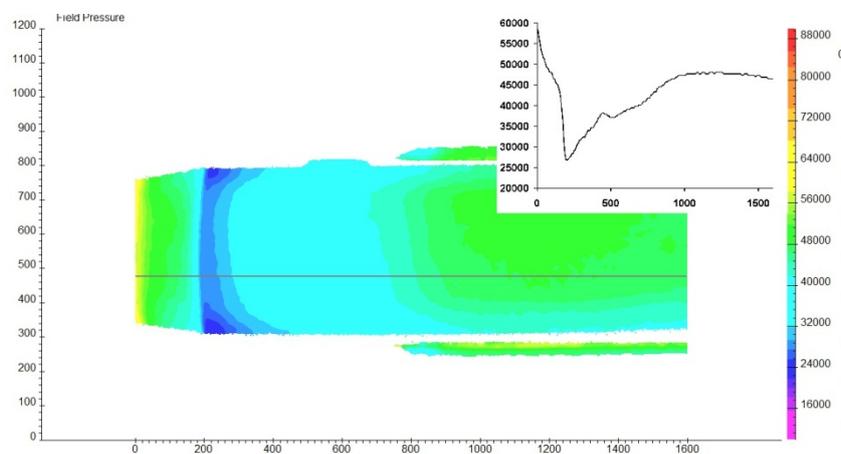


Figura 4 – Imagem obtida com a técnica PSP mostrando a distribuição de pressão sobre o modelo na região frontal a número de Mach 1,0 e ângulo de ataque nulo.

Atualmente o túnel executa um projeto com recursos do CNPq para a realização de ensaios com veículos de sondagem do IAE para número de Mach 1,3, contando com a colaboração de 4 bolsistas DTI. Este projeto com duração de 4 anos permitirá a realização de vários ensaios específicos com uso de veículos de sondagem, visando capacitar o túnel a ensaios que dêem apoio aos projetos na área espacial do IAE, por meio de vários dispositivos e modelos.

2. SISTEMA LIFETIME DE TINTA SENSÍVEL À PRESSÃO (PSP)

A técnica PSP é um método óptico que fornece medidas de pressão estática em toda a superfície pintada de um modelo, de forma não intrusiva, com alta resolução espacial e de forma mais simples e mais econômica que os métodos tradicionais de tomadas de pressão. A resolução espacial e a quantidade de informações sobre medidas de pressão obtidas utilizando-se dados de PSP é de grande importância para qualquer ensaio aerodinâmico. Por ser um método óptico, o PSP permite obter medidas de pressão mesmo em locais onde, devido às limitações físicas do modelo, seria impossível medir utilizando métodos convencionais. Esta técnica permite também a identificação de detalhes complexos do escoamento como, por exemplo, ocorrência de ondas de choque, pontos de separação de camada limite e de recolamento do escoamento, constituindo-se também em uma excelente ferramenta para validação de códigos computacionais.

A técnica PSP baseia-se na utilização de uma tinta especial, compostas por moléculas denominadas luminóforos, que ao serem iluminadas por uma fonte de radiação de determinado comprimento de onda absorvem os fótons provenientes da fonte e transicionam de seu estado fundamental para um estado eletrônico excitado. O retorno do luminóforo ao seu estado eletrônico fundamental ocorre por processos radioativos ou não radioativos. Os processos radioativos são denominados luminescência, um termo geral para a fluorescência e a fosforescência, que são fótons emitidos pelos luminóforos e caracterizados por comprimento de onda maior do que os fótons da fonte de radiação. O luminóforo ao invés de emitir um fóton pode também perder o excesso de energia através de interações com as moléculas de oxigênio presentes na matriz da tinta PSP. Essa interação entre os luminóforos e as moléculas de oxigênio é um processo não radioativo denominado de desativação pelo oxigênio (*oxygen quenching*). O oxigênio neste processo é denominado de agente desativador. O balanço que ocorre entre esses processos possibilita as medidas de pressão através da técnica PSP. A velocidade na qual estes dois processos ocorrem é totalmente dependente da pressão parcial do oxigênio, quanto maior a pressão do oxigênio mais intenso é o processo de desativação, o que resulta em uma menor intensidade de luminescência.

Um sistema PSP é composto de dispositivos de iluminação, detecção de imagens e processamento de dados, como representado na Fig.5.

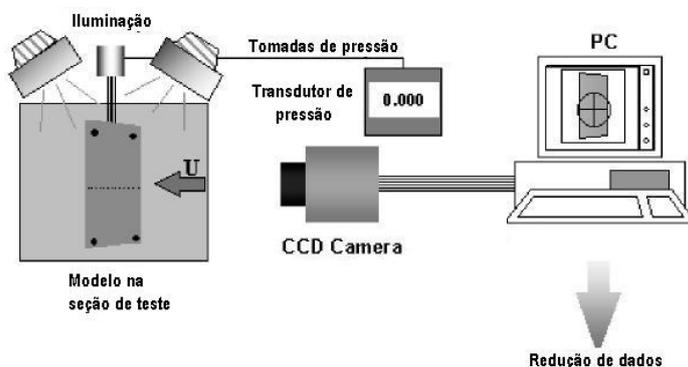


Figura 5. Componentes de um sistema PSP.

Na Fig. 6 são mostradas fotos do procedimento de pintura com a técnica PSP. Na Fig. 7 é mostrado um modelo do veículo de sondagem VS-30 pintado com a tinta PSP, e um modelo do VS-

40, também pintado com a tinta PSP e instalado no TTP. Componentes do sistema PSP instalado no túnel é mostrado na Fig. 8.



Figura 6. Procedimento de pintura com a tinta PSP.

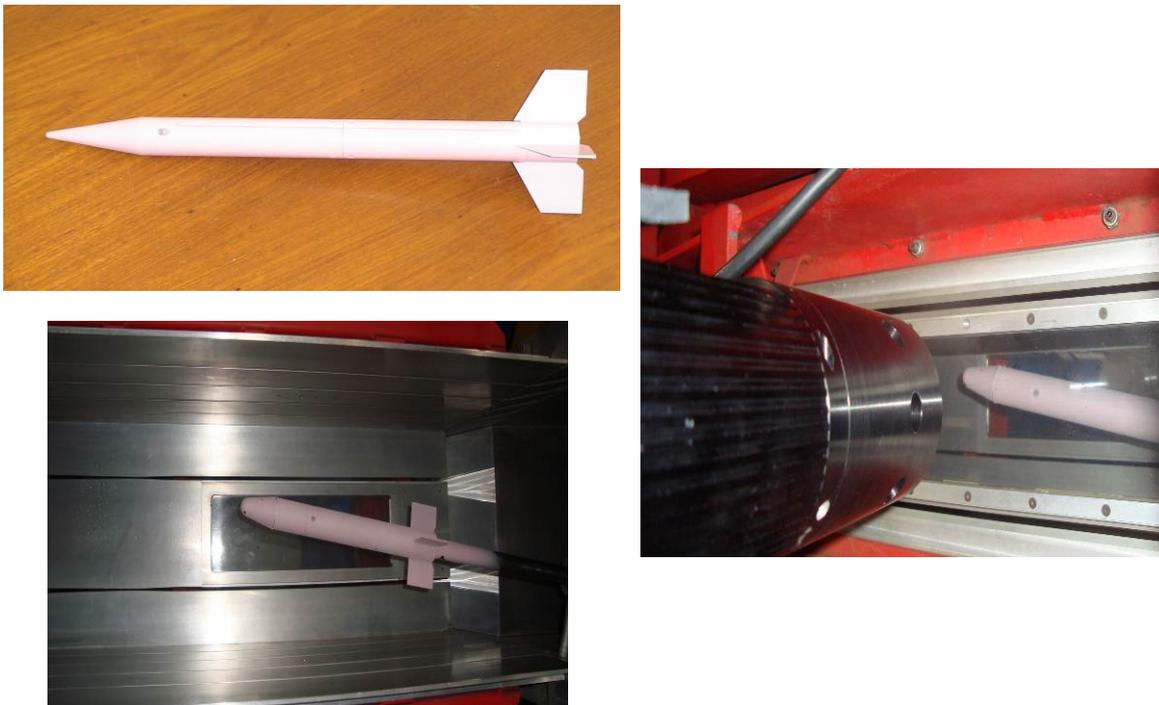


Figura 7. VS-30 pintado com a tinta PSP, e VS-40 pintado e instalado na seção de ensaios do TTP.

ANEMÔMETRO DE FIO-QUENTE

PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

Anemômetros de fio (ou filme) quente medem a velocidade de um fluido detectando variações de transferência de calor de um pequeno sensor aquecido exposto ao fluido (Moller, 1998). Um fio muito fino é exposto a um escoamento com uma determinada velocidade, como representado na Fig. 9. Quando uma corrente passa através do fio, calor é gerado (I^2R), e em

condição de equilíbrio, isto deve ser balanceado pela perda de calor (principalmente convectiva) para o meio.



Figura 8. Sistema PSP - Aparato experimental.

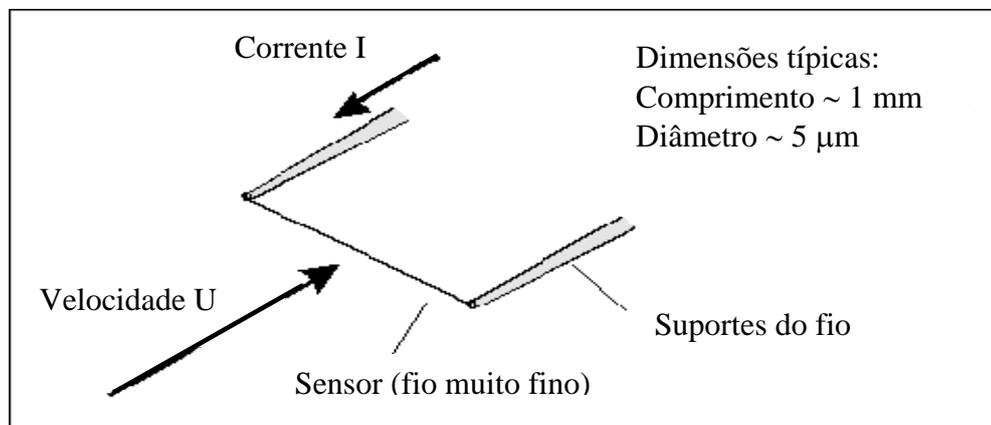


Figura 9 – Representação de um sensor de anemômetro de fio-quente (sonda).

Os sensores (sondas) normalmente utilizados em anemômetros de fio-quente possuem fio de tungstênio, com 1 mm de comprimento e 5 μm de diâmetro. É possível utilizar sondas com 1, 2 ou 3 fios, como representado na Fig. 10.

A Fig. 11 representa o circuito de medição de um anemômetro de fio quente. O fio de resistência R_w (sonda) é o braço ativo de uma ponte de Wheatstone. Este circuito é ajustado de tal forma que a sonda permaneça a uma temperatura constante (230°C a 350°C), independente do resfriamento imposto pelo escoamento. Uma vez colocada em escoamento, este tende a resfriar a sonda, fazendo com que a resistência elétrica da mesma caia, desbalanceando, assim, a ponte de Wheatstone. Isto é detectado pelo servo-amplificador, que faz com que a fonte de alimentação aumente sua tensão para re-aquecer o sensor. Este processo é praticamente instantâneo (Moller,

2000). A diferença de potencial da ponte, E , representa a transferência de calor, e é, portanto uma medida direta da velocidade.

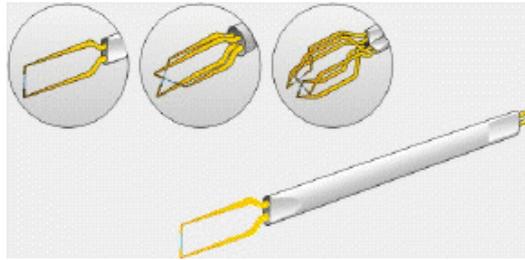


Figura 10 – Modelos de sondas de fio-quente (Dantec website).

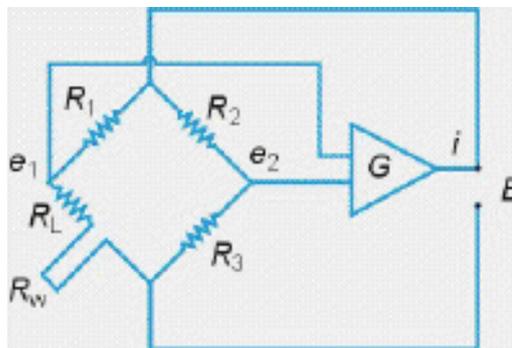


Figura 11 – Circuito eletrônico de um anemômetro de fio-quente (Dantec website).

A relação entre a voltagem de saída da ponte e a velocidade é obtida através da calibração do anemômetro, que é feita expondo-se o sensor a um fluxo de ar de temperatura constante a vários valores discretos de velocidade. Este fluxo pode ser obtido por meio de um bocal convergente ou um túnel de vento, comparando-se o anemômetro com um tubo de *pitot*.

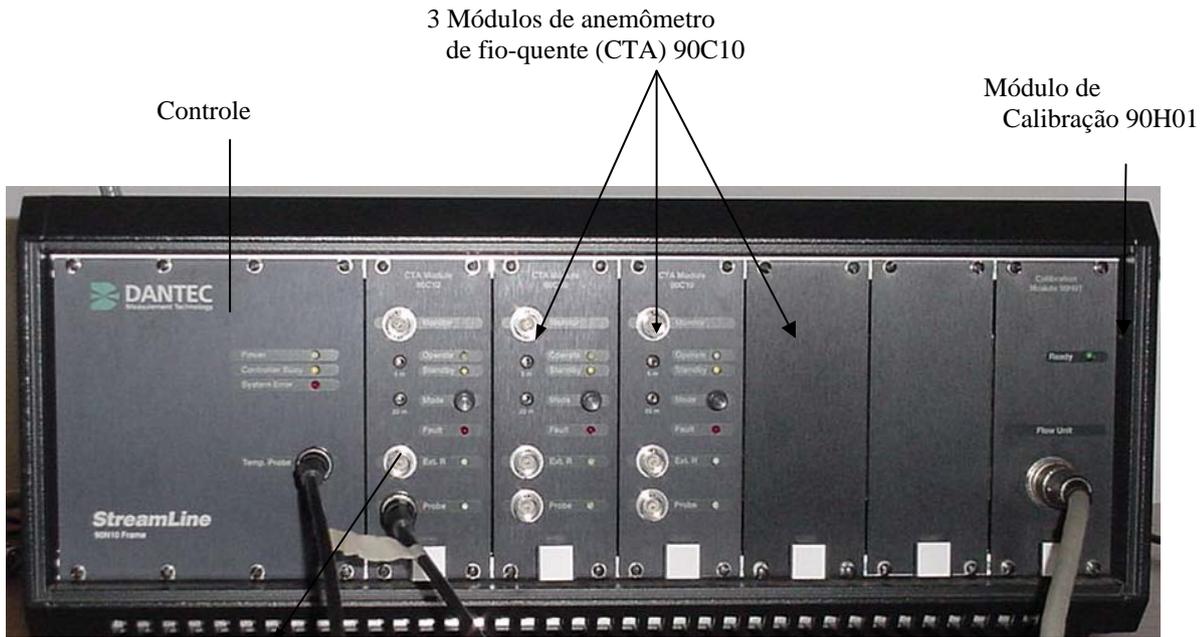
O ajuste da curva de calibração pode ser feito através de uma curva exponencial ou polinomial ou interpolando dados diretamente das tabelas de calibração (*look up tables*).

SISTEMA DE ANEMOTRIA DE FIO-QUENTE EXISTENTE NA ALA

O sistema de anemometria existente na ALA consiste em um sistema Dantec Streamline 90N10, Fig. 12, constituído de três módulos de anemômetro de fio-quente à temperatura constante (CTA), 90C10, e um módulo de calibração (90H10). O sistema de anemometria possui também uma entrada para uma sonda que mede a temperatura ambiente e um sistema de controle que cuida da comunicação entre o sistema de anemometria e o micro-computador.

Uma caixa de conexão National Instruments, Fig. 13, faz a interface entre o sistema de anemometria e o microcomputador utilizado.

Atualmente existem na ALA sondas de fio-quente unidimensionais e tridimensionais de fio e de filme quente, do tipo reto, Fig. 14, e também a 90° que permitem a realização de medidas de velocidade e intensidade de turbulência nas proximidades das paredes dos túneis de vento, conveniente para medidas de turbulência na camada limite. As sondas de filme quente, por serem mais robustas, são utilizadas para realização de medidas no TTP.



Entrada para transdutor
de temperatura ambiente

Figura 12 – Dantec StreamLine 90N10.



Figura 13 - Caixa de conexão National Instruments SCB-68.



Figura 14 – Sonda Dantec 55P01.

O sistema de calibração é projetado para calibrar sondas em velocidades que vão de 0.02m/s até Mach igual a 1.0, Fig. 15. O sistema utiliza ar pressurizado para criar um jato livre no local onde é posicionada a sonda. O ar deixa a unidade de fluxo através de um bocal como um

jato plano, uniforme e de baixa turbulência. Existem quatro bocais (20, 60, 120 e 1400 mm²) que são selecionados de acordo com a velocidade desejada na saída do jato.

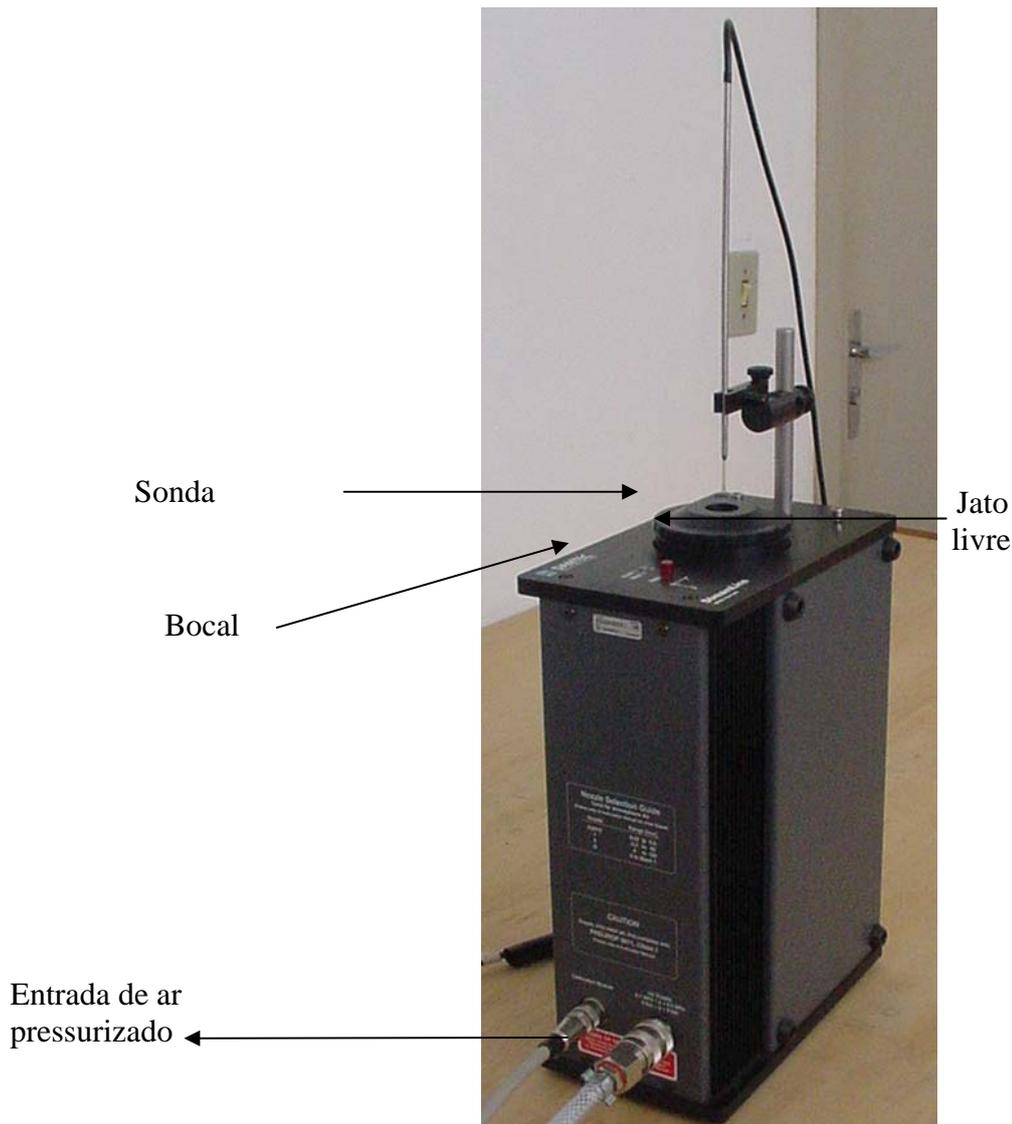


Figura 15 – Calibrador JATM – StreamLine 90H02.

O sistema de calibração é projetado para calibrar sondas em velocidades que vão de 0.02m/s até Mach igual a 1.0. O sistema utiliza ar pressurizado para criar um jato livre no local onde é posicionada a sonda. O ar deixa a unidade de fluxo através de um bocal como um jato plano, uniforme e de baixa turbulência. Existem quatro bocais (20, 60, 120 e 1400 mm²) que são selecionados de acordo com a velocidade desejada na saída do jato.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS EXISTENTES

1. VEÍCULO DE SONDAGEM SONDA III

Há inúmeros resultados de determinação experimental de parâmetros aerodinâmicos (forças e momentos) e de distribuição de pressão (com uso de PSP) que foram obtidos durante projeto

apoiado pela AEB durante os anos de 2007 e 2011. Alguns desses resultados estão reportados em: João Batista Pessoa Falcão Filho, Maria Luísa Collucci Costa Reis, Algacyr Morgenstern, Experimental Results of the Sounding Vehicle Sonda III Test Campaign in the Pilot Transonic Wind Tunnel, Journal of Aerospace Technology and Management, Vol. 3, No. 3, pp. 311-324, Sept.-Dec., 2011,.

2. VEÍCULO DE SONDAGEM VS-40

O veículo VS-40 é instrumentado com diversas tomadas de pressão que permite uma boa comparação com os resultados da tinta sensível à pressão (PSP), cujos resultados obtidos durante projeto apoiado pela AEB durante os anos de 2007 e 2011 estão sendo submetidos no “Journal of Aerospace Technology and Management”.

3. VEÍCULO CONE-CILINDRO

Alguns resultados foram obtidos com 3 escalas diferentes de modelo cone-cilindro com uso da tinta sensível à pressão (PSP) e um deles instrumentado com balança interna para determinação de esforços aerodinâmicos. Alguns desses resultados estão reportados em: Fábio da Silva Neves, Ensaio Aerodinâmico de Modelo Cone-Cilindro em Túnel Transônico, Trabalho de Graduação, UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Guaratinguetá, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2011.

TRABALHOS PRETENDIDOS

Para um projeto com duração de 4 anos e que objetiva comparações entre experimentos e cálculo numérico, é imprescindível que haja uma diversidade de geometrias e configurações a serem testadas para dar confiabilidade à pesquisa. Por esta razão, propõe-se o emprego de alguns tipos de veículos, desde uma geometria simples (cone-cilindro) e crescendo em complexidade, com os veículos desenvolvidos no IAE, o VS-40 (corpo único), o Sonda III e o VS-30 (com dois estágios e região importante interestágios), e finalmente um veículo com geometria mais complexa, com vários módulos e interações entre eles (VLS).

1. ENSAIOS COM O MODELO CONE-CILINDRO

Propõe-se o retrabalho dos modelos ora existentes no TTP para inclusão de tomadas de pressão e realização de diversos ensaios com modelos. Os modelos têm razão de bloqueio de 2%, 0,8% e 0,4% em relação à área da seção de testes. Os modelos serão retrabalhados para inclusão de, no mínimo, 5 tomadas de pressão em regiões importantes que serão utilizadas para comparação com os resultados com a tinta sensível à pressão (PSP). Ensaios varrendo toda a faixa de operação do túnel (número de Mach de 0,2 a 1,3) e variando a pressão (0,5 bar a 1,2 bar) para ângulos de ataque de 0°, 5° e 10° permitirão uma ampla análise aerodinâmica e elaboração de banco de dados.

