

## **DESCRIÇÃO DE CÂMARA DE MISTURA SUPERSÔNICA/SUBSÔNICA E PRIMEIROS RESULTADOS**

**André Fernando de Castro da Silva, andre.fernando.t10@gmail.com<sup>3</sup>**  
**Rodrigo de Oliveira Braz, ro-braz@uol.com.br<sup>1</sup>**  
**Alcides Rocha, arocha@iae.cta.br<sup>2</sup>**  
**João Batista Pessoa Falcão Filho, jb.falcao@ig.com.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade de Taubaté (UNITAU), Rua Daniel Danelli, s/n, Jardim Morumbi, CEP: 12060-440, Taubaté, São Paulo

<sup>2</sup>Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Divisão de Aerodinâmica (ALA), Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP: 12228-904, São José dos Campos, São Paulo

<sup>3</sup>Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP: 12228-900, São José dos Campos, São Paulo

**Resumo:** *O TTP (Túnel Transônico Piloto) do IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço) é um túnel convencional em circuito fechado, acionado por compressor principal na faixa de número de Mach de 0,2 a 1,3, com seção de testes com dimensões 0,30 m x 0,25 m. Uma constante preocupação com a questão energética, quer pela escassez dos recursos naturais do planeta ou pela desejável redução de custos, tem levado ao uso de soluções inovadoras. Nesse sentido, o TTP também pode operar intermitentemente com o uso de sistema de injeção de ar comprimido a alta pressão, estendendo o envelope de operação do túnel, com a mesma potência elétrica instalada. O sistema de injeção descarrega ar comprimido através de bicos injetores que operam entupidos com número de Mach de 1,9 promovendo a aceleração do escoamento primário na câmara de mistura. É de fundamental importância o ajuste dos parâmetros do sistema de injeção durante a operação combinada com o circuito principal do túnel, visando à redução de perdas na câmara de mistura. Um estudo paramétrico experimental da câmara de mistura é extremamente desejado, embora de difícil execução no circuito do túnel. Por isso, foi desenvolvido o projeto e a construção de uma câmara de mistura para avaliação paramétrica experimental, visando a otimização do processo de mistura – minimização das perdas de carga. O trabalho apresenta as bases teóricas empregadas na elaboração do projeto desta câmara de mistura, uma análise das equações da Mecânica dos Fluidos aplicadas a um volume de controle que modela esta câmara, como também a descrição de suas principais características. Finalmente, são apresentados os sistemas de medição para obtenção dos principais parâmetros da câmara de mistura juntamente com uma análise dos primeiros resultados experimentais obtidos.*

**Palavras-chave:** *Túnel Transônico, Câmara de Mistura, Experimental, Jato Supersônico, Volume de Controle*

### **1. INTRODUÇÃO**

A sociedade contemporânea tem mostrado crescente preocupação com questões ambientais que levam a um intenso fluxo de investimentos em pesquisas acerca de novos métodos e processos que tanto buscam a otimização da questão energética (preservando os recursos naturais restantes e minimizando os custos) como também a minimização dos impactos dos mesmos sobre o meio ambiente (poluição atmosférica, sonora, dentre outras). O setor aeroespacial não poderia ser diferente (Jardine, 2005, POST, 2003).

Quer seja na busca de soluções inovadoras, no que diz respeito à operação de túneis de vento por meio da utilização de sistemas de injeção (Falcão Filho, 2006), quer na busca de alternativas que reduzam a emissão sonora dos motores aeronáuticos, ou mesmo no desenvolvimento de lasers gasosos, o estudo e a descrição dos fenômenos envolvidos na mistura de jatos de alta velocidade é de grande importância científica e tecnológica sobretudo após a constatação de que a descrição dos fenômenos observados no regime compressível não é extensível para velocidades maiores, sendo em muitos casos questionável, e muitos trabalhos de pesquisa são desenvolvidos para uma melhor compreensão (Georgiadis *et al.*, 2003, Goebel e Dutton, 1991, Alperin e Wu, 1983a, 1983b, Abramovich, 1963, 1973).

Apesar do uso de injetores como única forma de potência para acionamento de túneis de vento ser bastante difundida, principalmente nos túneis russos (Bedrzhitsky e Roukavets, 1997), o seu uso de forma combinada com compressores ainda desperta o interesse da comunidade científica.

Há vários estudos teóricos importantes como o clássico de indução de escoamento de Carrière (1973) e a publicação de Abramovich (1973) que apresenta vários casos básicos de escoamentos de alta velocidade. Experimentalmente, destacam-se importantes contribuições, como o trabalho desenvolvido por Muhlstein *et al.* (1974)

que analisa a questão do ponto de vista energético e também da qualidade do escoamento em um túnel operado somente com injeção especialmente construído para este fim. Outro trabalho experimental importante é o de Rose *et al.* (1982) que descreve uma experiência bem sucedida do uso combinado de acionamento contínuo com compressor com o sistema intermitente de injeção no túnel transônico da Calspan, que teve sua capacidade dobrada em termos do número de Reynolds com uso de apenas 4% de fluxo de massa em alta velocidade (número de Mach 3,0), em relação ao fluxo total de ar na seção de testes.

Para apoiar a análise dos fenômenos ligados à mistura de jatos foram desenvolvidos importantes trabalhos experimentais, como o de Trentacoste e Sforza (1967) que investiga as várias etapas no desenvolvimento do jato, e o trabalho de Goebel e Dutton (1991) que apresenta os resultados de experimentos realizados no túnel de vento da Universidade de Illinois, descrevendo sete casos de estudo da mistura entre dois escoamentos em alta velocidade e investigando a camada de mistura turbulenta, quanto a sua região de similaridade e sua taxa de crescimento. Estudos baseados em cálculos de CFD (“Computational Fluid Dynamics”) sempre foram utilizados como apoio na compreensão dos fenômenos físicos, como o de Georgiadis *et al.* (2003) que reproduziu alguns casos da experiência de Goebel e Dutton (1991), o estudo de Chinzei *et al.* (1986) que investiga camadas de mistura de dois jatos compressíveis, correlacionando suas taxas de crescimento com a razão de velocidades entre si, e o de Samimy e Addy (1986) que apresenta resultados referentes à mistura entre dois escoamentos supersônicos, avaliando a influência da placa de separação entre eles.

Nesse contexto, um estudo de otimização da câmara de mistura do sistema de injeção do Túnel Transônico Piloto (TTP) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), instituto do DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial), é altamente desejável pois permitirá tanto obter uma configuração que minimiza a perda de carga do sistema (por meio de um estudo paramétrico) quanto uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na mistura de jatos de alta velocidade. Tal empreendimento possibilitará complementar com dados experimentais os estudos numéricos em CFD que vem sendo realizados acerca da operação da câmara de mistura do TTP (Falcão Filho e Ortega, 2007, 2008, 2009).

O TTP é o único túnel semi-industrial e de maior porte da América Latina para ensaios aerodinâmicos na região transônica (geralmente definida pela faixa de números de Mach de 0,8 a 1,2). A Figura 1 mostra o circuito aerodinâmico do TTP, no qual pode-se ver as diversas tubulações que ligam o circuito do túnel aos sistemas auxiliares de ar comprimido instalados em prédio adjacente. O túnel é de projeto moderno, com área de seção de testes de 0,25 m x 0,30 m, e com sistemas automáticos de número de Mach (de 0,2 a 1,3), controle de pressão (de 0,5 bar a 1,2 bar), controle de temperatura e umidade, para garantir o estabelecimento dos números de Mach e Reynolds relativos à seção de testes (Falcão Filho e Mello, 2002).



**Figura 1. Vista do circuito aerodinâmico do TTP.**

O túnel é uma escala 1:8 de um projeto de túnel transônico industrial concebido para dotar o país de capacidade de ensaios em larga escala, mas que, por falta de recursos, ainda está em fase de projeto. A instalação do TTP em 1997 custou 3 milhões de dólares em equipamentos e está em plena operação, realizando campanha de ensaios de veículos de sondagem do IAE com término previsto para 2010, com perspectivas de atender a demanda de ensaios de pesquisa da Embraer e de universidades (Falcão Filho *et al.*, 2009). O túnel é particularmente adequado para o desenvolvimento básico de perfis, análise de configurações de veículos de geometria simples na região transônica (veículos de sondagem etc.) e de dispositivos aeronáuticos (“trailing cones”, anemômetros etc.). Possui sistemas de aquisição de dados para tomadas de pressão, anemômetro de filme-quente, três balanças internas de 6 componentes para medidas de esforços aerodinâmicos e sistema de visualização tipo schlieren.

O túnel opera continuamente por meio de compressor principal axial de 2 estágios com 830 kW de potência, mas também opera intermitentemente com uso de sistema de injeção em ação combinada com o compressor principal, estendendo o envelope de operação do túnel. O sistema de injeção consiste em 10 bicos injetores localizados após a seção de testes que operam em entupimento aerodinâmico com número de Mach 1,9 e induzem o escoamento, recuperando as perdas de carga ao longo do circuito.

Para melhor controlar as condições na seção de testes de um túnel transônico, esta é envolvida por uma câmara plena, cujo esquema está apresentado na Figura 2. A câmara plena abriga a primeira garganta (onde o escoamento é acelerado), a seção de testes com paredes com fendas longitudinais (onde o modelo para testes é instalado), os flapes de reentrada (cujo posicionamento pelo ângulo de abertura controla a extração de massa através das paredes da seção de testes), a segunda garganta (que confina o escoamento estável no caso de ensaios na região supersônica) e a câmara de mistura da injeção com os 10 injetores (5 rentes ao teto e 5 rentes ao piso). Em continuação, a câmara plena é ligada ao difusor de alta velocidade do túnel.

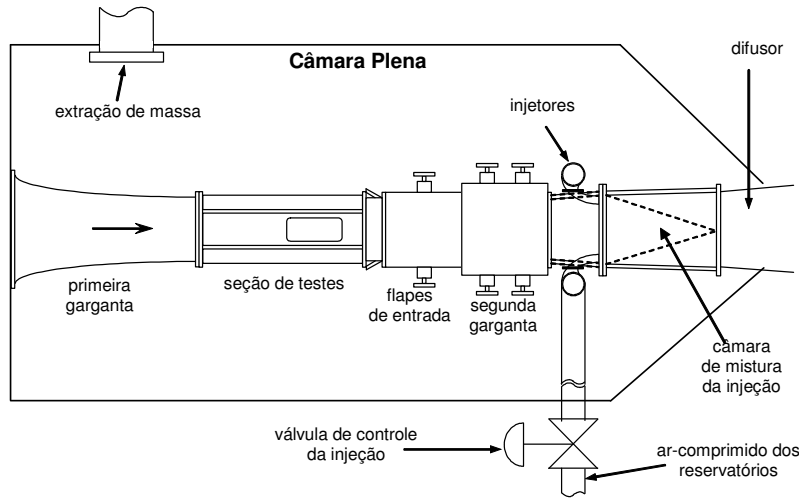


Figura 2. Diagrama do interior da câmara plena.

Como um estudo paramétrico do comportamento da câmara de mistura da injeção seria de difícil realização no circuito do túnel, segundo o que se propõe, projetou-se e confeccionou-se uma câmara de mistura externa ao circuito convencional do túnel que permitisse uma avaliação paramétrica experimental visando a uma otimização do processo de mistura. Neste trabalho estão apresentadas as bases teóricas utilizadas na análise (Shapiro, 1953, Nogueira *et al.*, 1988), a descrição do aparato experimental instalado na Divisão de Aerodinâmica do IAE, bem como os resultados experimentais preliminares obtidos.

## 2. ANÁLISE TEÓRICA

Optou-se, inicialmente, por uma análise em volume de controle da mistura de jatos, pela sua simplicidade e pela necessidade de inicialmente apurar as características globais de desempenho da câmara de mistura. O problema é então analisado utilizando as equações básicas da Mecânica dos Fluidos (Shapiro, 1953) aplicadas a um modelo de um volume de controle que compreende as paredes da câmara de mistura e as seções de saída e entrada da mesma, bem como o injetor em estudo, conforme ilustrado na Fig. 3.

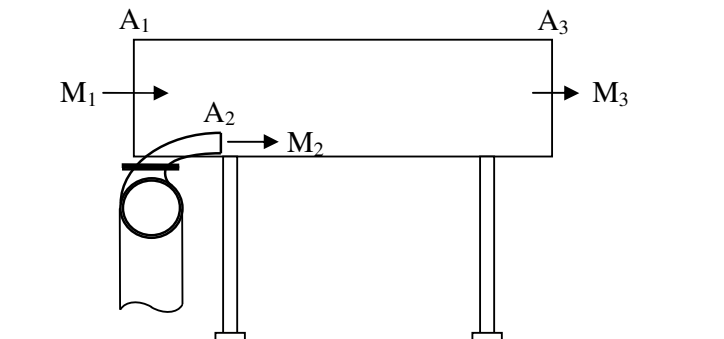


Figura 3. Esquema da configuração básica da câmara de mistura.

Na câmara de mistura um escoamento de alta velocidade, indicado por “2”, transfere quantidade de movimento para o escoamento principal que é admitido do ambiente, indicado por “1”, através da camada de mistura dos jatos. Tal fenômeno ocorre em função do caráter viscoso do ar, que passa a difundir quantidade de movimento para o ar circundante através de uma região com grande gradiente de velocidade e alta vorticidade, a camada de cisalhamento livre. Tal processo de mistura ocorre ao longo da câmara até que o escoamento esteja totalmente desenvolvido, de forma que suas características se aproximem às de um escoamento uniforme. Teoricamente admite-se que o comprimento da câmara de mistura é suficiente para promover uma mistura completa do jato, resultando no escoamento uniforme verificado em sua saída, indicada por “3”.

## 2.1 Equacionamento

As equações básicas da Mecânica dos Fluidos (Shapiro, 1953) podem, então, ser aplicadas ao sistema apresentado. São estas: continuidade (Eq. (1)), quantidade de movimento (Eq. (2)), conservação da energia (Eq. (3)) e, considerando o ar como sendo térmica e caloricamente perfeito, a equação dos gases perfeitos (relação constitutiva mostrada na Eq. (4)):

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3, \quad (1)$$

$$(\dot{m}_1 V_1 + p_1 A_1) + (\dot{m}_2 V_2 + p_2 A_2) = (\dot{m}_3 V_3 + p_3 A_3) + \text{perdas}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_1 T_{01} + \dot{m}_2 T_{02} = \dot{m}_3 T_{03}, \quad (3)$$

$$p = \rho R T, \quad (4)$$

onde  $\dot{m}$  é o fluxo mássico de ar,  $V$ , a velocidade do escoamento,  $p$ , a pressão estática do ar,  $A$ , a área da seção transversal,  $\rho$ , a massa específica do ar,  $R$ , a constante dos gases para o ar,  $T$ , a temperatura estática e  $T_0$ , a temperatura total do escoamento. Considerando que as perdas presentes na equação da quantidade de movimento sejam dadas proporcionais à quantidade de movimento na saída do aparato experimental e nomeando como  $\sigma$  uma constante que quantifica tais perdas, a Eq. (2) pode ser reescrita como:

$$(\dot{m}_1 V_1 + p_1 A_1) + (\dot{m}_2 V_2 + p_2 A_2) = \left( \frac{\dot{m}_3 V_3}{\sigma} + p_3 A_3 \right). \quad (5)$$

Substituindo a equação da continuidade nas demais equações e conhecendo-se as características do escoamento nas seções 1 e 2, a resolução do sistema de equações resultante pode fornecer três entre quatro incógnitas ( $T_3$ ,  $M_3$ ,  $p_3$  e  $\sigma$ ), desde que a restante seja verificada experimentalmente, conforme será demonstrado algebricamente a seguir. Ou seja, a formulação aqui proposta pode ser tanto utilizada para a medição da perda de carga do sistema a partir da medição de parâmetros na saída quanto para determinação dos parâmetros de saída após ter sido feita uma calibração apropriada do fator de perda de carga.

### Equação da Continuidade

Dessa forma, desenvolvendo a Eq. (1) utilizando a expressão para o fluxo de massa  $\dot{m} = \rho VA$ , obtém-se:

$$\rho_1 V_1 A_1 + \rho_2 V_2 A_2 = \rho_3 V_3 A_3. \quad (6)$$

Utilizando a definição do número de Mach ( $M = V/a$ ), onde a velocidade do som é dada por  $a = \sqrt{\gamma RT}$ , para o ar como gás perfeito, obtém-se, realizando algumas manipulações algébricas:

$$\frac{p_1 M_1 A_1}{\sqrt{T_1}} + \frac{p_2 M_2 A_2}{\sqrt{T_2}} = \frac{p_3 M_3 A_3}{\sqrt{T_3}}. \quad (7)$$

### Equação da Quantidade de Movimento

Partindo da Eq. (5), realiza-se a substituição da expressão para o fluxo de massa  $\dot{m} = \rho VA$  e da expressão  $V^2 = M^2 \gamma RT$  (que vem da definição do número de Mach e da expressão da velocidade do som), obtendo a seguinte expressão:

$$\left( \rho_1 M_1^2 \gamma R T_1 A_1 + p_1 A_1 \right) + \left( \rho_2 M_2^2 \gamma R T_2 A_2 + p_2 A_2 \right) = \left( \frac{\rho_3 M_3^2 \gamma R T_3 A_3}{\sigma} + p_3 A_3 \right). \quad (8)$$

Por fim, aplica-se a equação dos gases perfeitos e colocam-se os termos afins em evidência para obter:

$$p_1 A_1 (1 + \gamma M_1^2) + p_2 A_2 (1 + \gamma M_2^2) = p_3 A_3 \left( 1 + \frac{\gamma M_3^2}{\sigma} \right). \quad (9)$$

### Equação da Conservação da Energia

Para a equação da energia (Eq. (3)), basta aplicar a Eq. (1) e a expressão da temperatura total na saída em função do número de Mach e da temperatura estática para obter:

$$\frac{\dot{m}_1 T_{01} + \dot{m}_2 T_{02}}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = T_3 \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2 \right). \quad (10)$$

Note que em todas as equações obtidas (Eqs. (7), (9) e (10)), o lado esquerdo é expresso somente em termos das condições da entrada e do injetor, as quais são supostas conhecidas. Assim, nomeiam-se as seguintes constantes:

$$c_1 = \frac{p_1 M_1 A_1}{\sqrt{T_1}} + \frac{p_2 M_2 A_2}{\sqrt{T_2}} = \frac{p_3 M_3 A_3}{\sqrt{T_3}}, \quad (11)$$

$$c_2 = p_1 A_1 (1 + \gamma M_1^2) + p_2 A_2 (1 + \gamma M_2^2) = p_3 A_3 \left( 1 + \frac{\gamma M_3^2}{\sigma} \right), \quad (12)$$

$$c_3 = \frac{\dot{m}_1 T_{01} + \dot{m}_2 T_{02}}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = T_3 \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2 \right). \quad (13)$$

Expressando  $p_3$  e  $T_3$  em termos das novas constantes definidas a partir das Eqs. (12) e (13), obtém-se:

$$T_3 = \frac{c_3}{\left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2 \right)}, \quad (14)$$

$$p_3 = \frac{c_2}{A_3 \left( 1 + \frac{\gamma M_3^2}{\sigma} \right)}. \quad (15)$$

Substituindo as Eqs. (14) e (15) na Eq. (11), obtém-se uma equação em duas incógnitas:  $M_3$  e  $\sigma$ :

$$c_1 = \frac{c_2 M_3 A_3}{A_3 \left( 1 + \frac{\gamma M_3^2}{\sigma} \right)} \sqrt{\frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2}{c_3}}. \quad (16)$$

Definindo uma nova constante como:

$$c = \frac{c_1 \sqrt{c_3}}{c_2}, \quad (17)$$

pode-se então elevar ambos os membros da equação ao quadrado para obter:

$$c^2 \left( 1 + \frac{\gamma M_3^2}{\sigma} \right)^2 = M_3^2 \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2 \right). \quad (18)$$

Esta equação pode então ser resolvida em termos do coeficiente de perda de carga ( $\sigma$ ) ou do número de Mach na saída do volume de controle ( $M_3$ ). Para evidenciar o número de Mach, basta expandir a potência do lado esquerdo da Eq. (18) e agrupar as potências de  $M_3^2$  para obter a seguinte equação biquadrada:

$$\left( \frac{\gamma^2 c^2}{\sigma^2} - \frac{\gamma - 1}{2} \right) M_3^4 + \left( \frac{2\gamma c^2}{\sigma} - 1 \right) M_3^2 + c^2 = 0. \quad (19)$$

A solução desta equação pode ser finalmente expressa por

$$M_3 = \sqrt{\frac{\left( 1 - \frac{2\gamma c^2}{\sigma} \right) \pm \sqrt{1 - 2c^2 + 4\gamma c^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{\sigma} \right)}}{2 \left( \frac{\gamma^2 c^2}{\sigma^2} - \frac{\gamma - 1}{2} \right)}}, \quad (20)$$

que apresenta duas soluções, uma supersônica e uma subsônica, dependendo das condições físicas de pressão na entrada e na saída da câmara, para o estabelecimento do problema. No caso presente, a solução subsônica é o que ocorrerá, visto que as condições na entrada e na saída são a atmosfera e a relação de fluxos de massa não garante o estabelecimento do regime supersônico na saída da câmara de mistura.

Se, por outro lado,  $M_3$  é conhecido, então pode-se determinar o coeficiente de perda de carga, partindo da Eq. (18), pela expressão:

$$\sigma = \frac{\gamma M_3^2}{\frac{M_3}{c} \sqrt{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2} - 1}. \quad (21)$$

### 3. DESCRIÇÃO DO PROJETO E INSTALAÇÃO DA CÂMARA DE MISTURA

Para o projeto da câmara de mistura foram adotadas as principais idéias já empregadas no TTP, utilizando o mesmo sistema de pressurização, a mesma válvula de controle, cuja tubulação de saída foi derivada por meio de uma mangueira de pressão para o acionamento do injetor. A Figura 4 mostra uma foto da instalação, onde se pode ver a mangueira de pressão que foi derivada da tubulação do TTP, a tubulação de distribuição em forma de "O", o circuito da câmara de mistura e as fixações ao piso do galpão. Os sub-itens a seguir descrevem os detalhes dos principais componentes de toda a instalação, começando com o sistema de geração de ar comprimido.



Figura 4. Vista em perspectiva da câmara de mistura montada.

### 3.1 O Sistema de Suprimento de Ar da Injeção

A Figura 5 mostra um esquema funcional da instalação do sistema de suprimento de ar e da câmara de mistura, destacando seus principais componentes e indicando com setas a direção seguida pelo fluxo de massa admitido e entregue ao ambiente. Inicialmente dois compressores a pistão com 3 estágios e 92 kW de potência cada (1) carregam de ar os dois reservatórios de alta pressão (2), com capacidade de 10 m<sup>3</sup> cada, com até 40 bar. Este processo dura cerca de 40 minutos. Depois o ar é descarregado através da válvula de bloqueio de segurança (3) e da válvula controladora de pressão (4), cuja abertura é modulada a partir do sinal da pressão na tubulação de distribuição em forma de “O” (ver Fig. 4) por meio de um sensor de pressão ali instalado. A válvula de controle regula a pressão na tubulação da estagnação dos injetores (6) para valores desejados até 12 bar, mantendo estável o fluxo de massa na saída do injetor que opera com número de Mach de 1,9. Para prevenir uma sobrepressão nos bicos injetores, uma válvula de alívio (5) abre se a pressão após a válvula de controle atingir 16 bar com a ruptura de um disco de metal. Maiores detalhes sobre a instalação do sistema de injeção do TTP podem ser obtidos em Falcão Filho e Mello (2002) e Goffert *et al.* (2008).

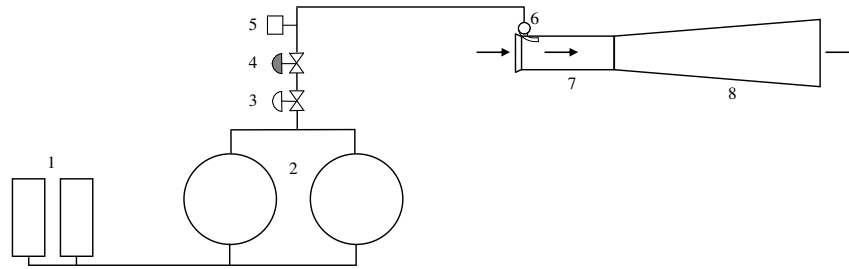


Figura 5. Esquema da configuração do sistema de injeção da câmara de mistura.

### 3.2 O injetor

O bico injetor (6) teve um projeto específico e está localizado junto à parede superior da câmara de mistura (7), operando em entupimento aerodinâmico com número de Mach 1,9. O fluxo mássico proveniente do injetor induz um escoamento através da câmara de mistura, por meio do processo de transferência de quantidade de movimento através da camada de mistura entre os jatos, que ocorre ao longo da câmara de mistura até percorrer o difusor (8). Visto que o injetor é projetado de forma que trabalhe subexpandido, o fluxo mássico é determinado pela pressão de estagnação na entrada do bico injetor pela Eq. (22), onde  $T_0$  é a temperatura de estagnação no injetor,  $M$  o número de Mach na saída e  $A$  a área de saída (Shapiro, 1953).

$$\dot{m} = \frac{p_0 A M}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}} \sqrt{\frac{\gamma}{R T_0}} \quad (22)$$

O projeto aerodinâmico do injetor é o mesmo empregado nos injetores do TTP. Ele incorpora critérios para obtenção de um escoamento uniforme na saída por meio de cálculo pelas relações características, cujo projeto específico é descrito em Silva *et al.* (2010a). O injetor foi adequadamente fixado na parede superior da câmara de mistura, através de uma abertura retangular, que permite seu giro de zero grau (perfeitamente rente à parede) até 22°. A Figura 6 mostra algumas das posições do bico injetor durante o ajuste do ângulo. O ar comprimido acessa o injetor por meio de uma tubulação de distribuição que conduz o fluxo de ar para o injetor por ambos os lados simultaneamente, garantindo uma melhor distribuição na câmara de estagnação do injetor. A ligação entre a câmara de estagnação do injetor e a linha de suprimento de ar comprimido é feita através de mangueiras apropriadas.

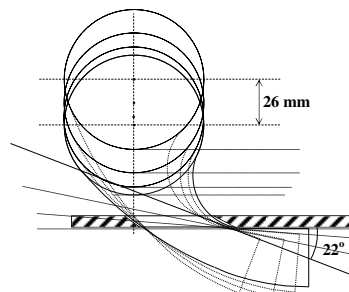


Figura 6. Ajuste de ângulo do injetor na abertura da câmara de mistura.

### 3.3 A Câmara de Mistura

A câmara de mistura é constituída basicamente de um coletor, a câmara propriamente dita, o difusor de alta velocidade, o bico injetor e a tubulação de pressão. Tendo em vista que o objetivo primeiro da construção da mesma é um estudo de otimização para a câmara de mistura do TTP, seu projeto original foi tomado como ponto de partida para a confecção da câmara de mistura experimental (7 na Fig. 5).

O coletor deve ser projetado para permitir uma aceleração suave do escoamento. Dessa forma foi escolhido um perfil aerodinâmico que permitisse que o escoamento induzido encontrasse uma menor resistência durante a entrada na câmara de mistura.

A estrutura da câmara de mistura foi confeccionada com paredes de aço, com 6,4 mm de espessura, de forma que fosse capaz de suportar os esforços a que estaria sujeita em virtude do diferencial de pressão e da fadiga decorrente da intensa vibração. Sua seção transversal retangular constante tem medidas internas de 0,228 m de altura por 0,173 m de largura e 0,685 m de comprimento. O injetor encontra-se fixado em sua parede superior por meio de uma abertura retangular que permite o alinhamento perfeito do jato com a parede da câmara, bem como a variação do ângulo em relação a ela.

### 3.4 O Difusor

Os difusores, em especiais aqueles que se encontram a jusante de seções com alta velocidade, são extremamente sensíveis a erros de projeto que podem causar o descolamento do escoamento em suas paredes (gerando vibrações na estrutura, não uniformidade do escoamento na seção de alta velocidade, aumento da perda de carga do sistema, dentre outros efeitos indesejáveis). Dessa forma, o difusor a ser empregado foi projetado de acordo com as recomendações técnicas empregadas em túneis de vento, principalmente em relação à razão de abertura. Eckert *et al.* (1976) recomenda que o ângulo de divergência dos difusores com seção transversal dotada de cantos vivos seja de  $0,5^\circ$  a  $1^\circ$  menor do que aquele que seria utilizado em um difusor cônico equivalente. Tomando como base o projeto do difusor do TTP (de formato cônico), buscou-se utilizar um ângulo de divergência menor ( $3,69^\circ$  no TTP, contra  $2,36^\circ$  e  $3,35^\circ$  nos planos vertical e horizontal, respectivamente, do difusor da câmara de mistura) numa tentativa qualitativa de compensar os efeitos nocivos dos cantos vivos de um difusor de seção retangular. Foi escolhido um ângulo de abertura menor para o plano vertical ( $2,36^\circ$ ) para diminuir possível efeito adverso de descolamento da camada limite, causado por alto gradiente de velocidade devido à esteira do injetor localizado na parede superior da câmara de mistura. A seção de entrada do difusor tem dimensões 0,173 m x 0,228 m e a seção de saída, 0,290 m x 0,360 m, com comprimento total de 1,60 m. Seu projeto e análise está descrito em Silva *et al.* (2010b).

## 4. RESULTADOS PRELIMINARES

Embora tenha sido construído há pouco tempo, a câmara de mistura já foi submetida a inúmeros testes, tanto para operacionalizá-la, quanto para obter os primeiros dados de desempenho da mesma. Nestes ensaios preliminares foram utilizados tubos de Pitot, que são de fácil instalação, acoplados ao sistema de aquisição de dados de pressão já utilizado no TTP. Futuramente pretende-se instalar dispositivo para movimentação remota dos tubos de Pitot para uma verificação mais detalhada dos perfis de velocidade, além de outros dispositivos especiais, como filme-quente, PIV e schlieren. Os sub-itens seguintes descrevem os principais resultados obtidos, começando pela operacionalização da instalação.

### 4.1 Calibração do Sistema de Injeção

Partindo-se do atual sistema de controle utilizado na operação do TTP (Goffert *et al.*, 2008), foi realizada uma calibração preliminar do comando de abertura da válvula de controle de forma a possibilitar a manutenção de uma pressão de estagnação constante nos injetores durante a realização dos ensaios.

O controle do sistema de injeção no TTP pode ser realizado por uso de controlador PID (Proporcional mais Integral mais derivativo) em malha fechada ou, em malha aberta, por uso de uma tabela de valores obtidos por meio de calibração. Numa primeira aproximação, seguiu-se a mesma idéia do procedimento desenvolvido para controle por malha aberta (Goffert *et al.*, 2008), que até o presente tem tido melhor desempenho na operação do TTP. Entretanto, a tabela de calibração do TTP, que tem 10 bicos injetores, não se aplica ao sistema desenvolvido, com apenas um bico injetor. Com a mesma válvula de controle, o controle para um bico injetor implicará na utilização da válvula em aberturas bem menores, e uma nova tabela de calibração será necessária.

A calibração consiste na determinação da abertura correta da válvula de controle para uma desejada pressão de estagnação no injetor, em função da pressão lida no reservatório. Para isto, um sensor de pressão é colocado no reservatório e outro na chegada da tubulação de distribuição (ver Fig. 4). A estratégia adotada para obtenção desses pontos de calibração foi partir com uma determinada pressão no reservatório e realizar manualmente uma abertura contínua da válvula até atingir a pressão máxima de utilização do injetor (inicialmente de 10 bar) e depois um fechamento contínuo até a pressão mínima (3 bar). Repetindo-se este procedimento com pressões diferentes iniciais no reservatório, e registrando-se a abertura da válvula em porcentagem (%A), são obtidos muitos pontos do relacionamento



entre as variáveis: porcentagem de abertura da válvula e pressões no reservatório e no injetor. Esses valores apresentam uma correlação, quando se busca uma representação física do comportamento de uma válvula de controle, na qual se permite relacionar a abertura da válvula como uma função (f) do coeficiente característico de pressão ( $\lambda$ ) (Goffert *et al.*, 2008), dada por

$$\%A = f(\lambda) = f \left[ \frac{P_{0,\text{inj}}}{\sqrt{\left( P_{\text{res}}^2 - P_{0,\text{inj}}^2 \right)}} \right], \quad (23)$$

onde  $p_{0,\text{inj}}$  é a pressão de estagnação no injetor e  $p_{\text{res}}$  a pressão nos reservatórios, considerando que o fluxo de massa é pequeno e as perdas de carga nas tubulações são desprezíveis.

A Figura 7 mostra este relacionamento para os pontos obtidos durante o processo de calibração. Na figura está destacada a equação de ajuste de curva do terceiro grau a ser empregada no programa de controle desenvolvido em LabView©.

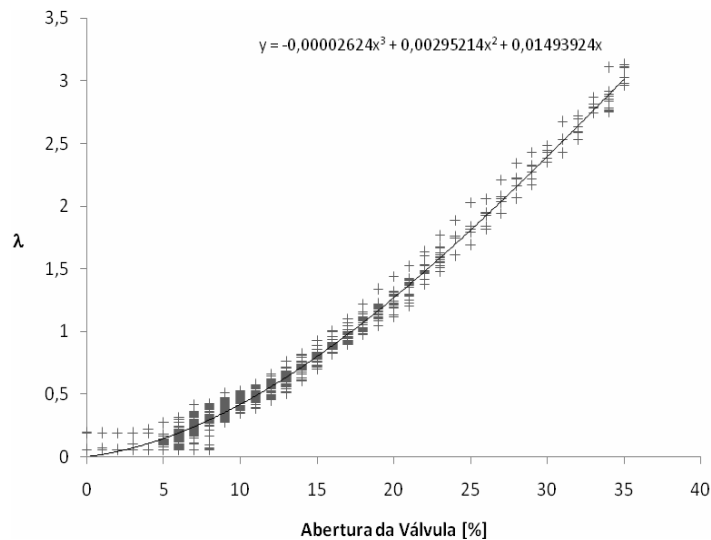


Figura 7. Curva de calibração do sistema de controle da injeção.

#### 4.2 Características de Operação da Câmara de Mistura

Com o intuito de avaliar as capacidades de aceleração de um escoamento que o injetor instalado possui, bem como as características gerais de operação da câmara de mistura, foram montados três tubos de Pitot na entrada da câmara de mistura logo antes da posição na qual se encontra o injetor visando a obtenção do número de Mach do escoamento induzido na entrada da câmara. A pressão de estagnação no injetor foi obtida separadamente pelo sistema de controle de injeção.

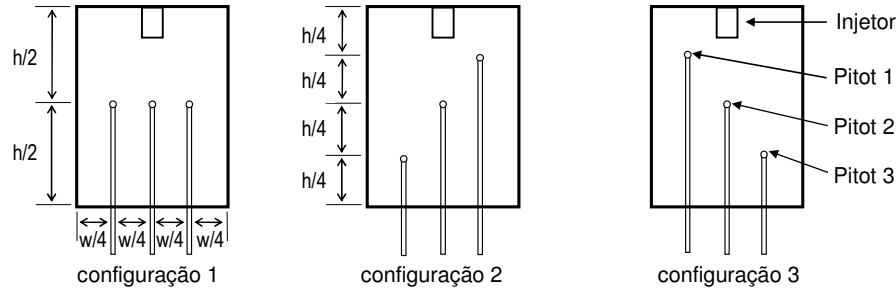
Os tubos de Pitot foram conectados a um módulo transdutor de pressão com 16 canais (PSI, 2000) ligados a um sistema de aquisição de dados controlado através de uma rotina desenvolvida em LabView©, permitindo a aquisição automática das pressões manométricas referentes a pressão total e estática de cada tubo de Pitot. De posse desses dados e da pressão ambiente, o número de Mach pode ser obtido a partir da relação isentrópica expressa pela Eq. (24) em função das pressões total e estática absolutas ( $p_0$  e  $p$ ) (Shapiro, 1953).

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]}. \quad (24)$$

Partiu-se da configuração na qual os três tubos de Pitot encontram-se alinhados na horizontal a meia distância das paredes inferior e superior e igualmente espaçados das paredes laterais. Seja esta disposição chamada de

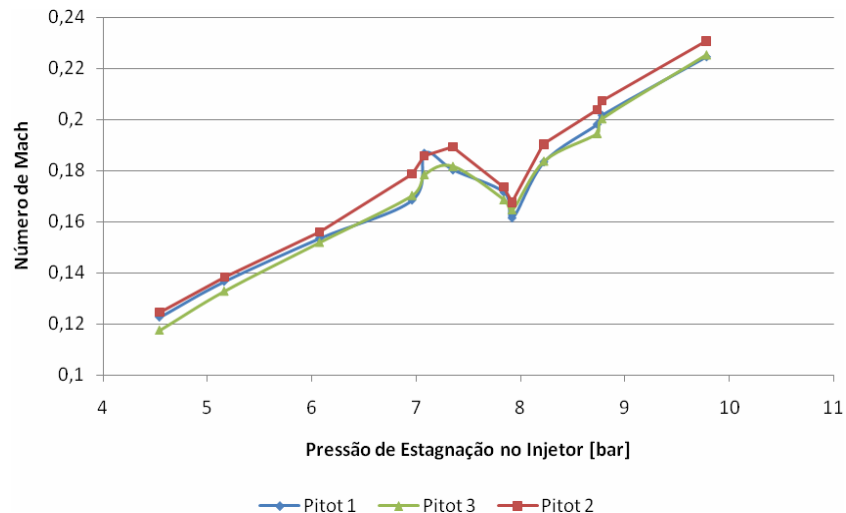
configuração 1, como mostrada na Fig. 8. Obteve-se o gráfico do número de Mach em função da pressão de estagnação nos injetores mostrado na Fig. 9.

Note que, com exceção da região em torno de 8 bar, a tendência é de crescimento do número de Mach com o aumento da pressão de estagnação nos injetores. Isso é esperado uma vez que com o aumento da pressão de estagnação no injetor, cresce também o fluxo mássico através do mesmo, como explicita a Eq. (22) (Shapiro, 1953), e, em decorrência disso, o fluxo total de massa que passa pela câmara de mistura. Conforme Nogueira *et al.* (1988), a relação em massa para condições semelhantes às apresentadas aqui é da ordem de 6.



**Figura 8. Configurações dos tubos de Pitot para estudo de similaridade.**

A quebra dessa tendência para pressões próximas a 8 bar foi verificada por repetitivos ensaios e demanda uma investigação mais minuciosa para identificar o fenômeno envolvido. Dentre as hipóteses levantadas cita-se a possibilidade de ocorrência de um fenômeno de ressonância mecânica seguido de descolamento do escoamento no difusor para pressões próximas de 8 bar.



**Figura 9. Número de Mach na entrada da câmara de mistura em função da pressão de estagnação no injetor.**

Conhecer a configuração geral do escoamento no que diz respeito à distribuição de velocidade na entrada da câmara de mistura também é desejável. Nesse sentido, foram realizados ensaios nos quais os tubos de Pitot foram dispostos com diferentes posições na entrada da câmara de mistura (aqui denominadas de configurações 2 e 3). A Figura 8 mostra as três configurações apresentadas, nas quais as distâncias são sempre uniformemente espaçadas em relação às paredes laterais da câmara.

Os resultados obtidos em termos dos valores médios do número de Mach e seus respectivos desvios para diferentes valores da pressão de estagnação dos injetores estão apresentados na Tabela 1. Comparando os resultados obtidos, pode-se notar uma razoável uniformidade do número de Mach na entrada da câmara de mistura, mostrando que apesar do injetor se encontrar apenas na superfície superior (configuração assimétrica) o escoamento adquire uma razoável regularidade. Para a configuração 1, considerando o desvio, as medidas de velocidades são iguais, indicando um perfil uniforme do escoamento na região instrumentada. O mesmo se observa para as configurações 2 e 3, que apontam a uniformidade do escoamento também na direção vertical da entrada da câmara. Os resultados parecidos das configurações 2 e 3 apontam que o escoamento na entrada é bastante simétrico. Aparentemente, o efeito da presença do injetor, instalado a partir de aproximadamente 5 cm após a linha de tomada de pressão estática dos tubos de Pitot, não

conseguiu distorcer o perfil de velocidades na entrada da câmara de mistura (indicando também que o coletor em forma de perfil demonstrou bom desempenho). Uma investigação mais aprofundada dos perfis de velocidade, tanto na entrada, quanto na saída da câmara de mistura, pode ser encontrada em Silva *et al.* (2010c). Tais estudos são muito interessantes, dada a aplicação da injeção como meio de fornecimento de potência para um túnel de vento, nos quais a qualidade do escoamento na seção de teste é de fundamental importância.

**Tabela 1. Resultados obtidos com os tubos de Pitot para as configurações 1, 2 e 3, segundo Fig. 8.**

Configuração 1			
Pressão no Injetor (bar)	número de Mach – Pitot 1	número de Mach – Pitot 2	número de Mach – Pitot 3
4,54 ± 0,04	0,122 ± 0,007	0,125 ± 0,007	0,117 ± 0,006
5,16 ± 0,04	0,136 ± 0,008	0,138 ± 0,009	0,133 ± 0,008
6,07 ± 0,03	0,153 ± 0,007	0,160 ± 0,010	0,150 ± 0,010
7,01 ± 0,03	0,170 ± 0,010	0,180 ± 0,010	0,166 ± 0,009
7,80 ± 0,10	0,169 ± 0,009	0,168 ± 0,007	0,164 ± 0,007
Configuração 2			
Pressão no Injetor (bar)	número de Mach – Pitot 1	número de Mach – Pitot 2	número de Mach – Pitot 3
4,50 ± 0,10	0,127 ± 0,008	0,126 ± 0,008	0,120 ± 0,008
5,23 ± 0,02	0,143 ± 0,008	0,140 ± 0,010	0,137 ± 0,008
5,93 ± 0,07	0,159 ± 0,007	0,157 ± 0,008	0,149 ± 0,007
6,97 ± 0,09	0,173 ± 0,005	0,170 ± 0,010	0,170 ± 0,010
Configuração 3			
Pressão no Injetor (bar)	número de Mach – Pitot 1	número de Mach – Pitot 2	número de Mach – Pitot 3
4,75 ± 0,05	0,124 ± 0,008	0,124 ± 0,008	0,127 ± 0,007
5,54 ± 0,05	0,158 ± 0,009	0,153 ± 0,008	0,152 ± 0,008
6,27 ± 0,05	0,170 ± 0,010	0,160 ± 0,010	0,170 ± 0,010
6,90 ± 0,10	0,180 ± 0,010	0,180 ± 0,010	0,180 ± 0,010
7,98 ± 0,04	0,174 ± 0,009	0,172 ± 0,008	0,174 ± 0,007
8,84 ± 0,03	0,200 ± 0,010	0,200 ± 0,010	0,200 ± 0,010
9,78 ± 0,08	0,230 ± 0,020	0,220 ± 0,020	0,220 ± 0,020

A partir da seleção dos 10 casos mais representativos obtidos, foram determinados os principais parâmetros dos escoamentos 1 e 2 (da entrada da câmara de mistura e do injetor) que estão apresentados na Tabela 2, e parâmetros adimensionais que caracterizam a instalação. Um desses parâmetros é a razão de fluxos de massa, que variou de 7,5 para baixas pressões no injetor, reduzindo para 5,9 na região que já foi observada por ter um desempenho pobre (ver Fig. 9), tornando a aumentar para 6,4 para altas pressões. Isto significa que a câmara operou de forma satisfatória, induzindo um fluxo de massa muito maior, subsônico. A razão de áreas foi de 111,2 e, se a razão for menor (da ordem de 30 como no TTP) o injetor promoverá uma aceleração maior no escoamento de entrada, provavelmente da ordem de número de Mach 0,5, como observado no TTP. Esta modificação e estudo será feito futuramente.

**Tabela 2. Principais parâmetros dos escoamentos de entrada e do injetor para alguns casos escolhidos das configurações 1, 2 e 3 (Tabela 1), e parâmetros característicos da câmara de mistura.**

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>escoamento na saída do injetor (2)</b>										
$A_2$ (cm <sup>2</sup> )	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55
$p_{02}$ (bar)	4,54	5,16	5,50	5,93	6,00	6,27	7,00	7,80	8,80	9,80
$M_2$	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
$p_2$ (bar)	0,6775	0,7701	0,8208	0,8850	0,8954	0,9357	1,0447	1,1641	1,3133	1,4625
$\dot{m}_2$ (kg/s)	0,2398	0,2724	0,2905	0,3132	0,3168	0,3312	0,3699	0,4121	0,4651	0,5179
<b>escoamento na entrada da câmara de mistura (1)</b>										
$A_1$ (cm <sup>2</sup> )	394,44	394,44	394,44	394,44	394,44	394,44	394,44	394,44	394,44	394,44
$p_{01}$ (bar)	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937
$M_1$	0,122	0,136	0,158	0,159	0,153	0,170	0,173	0,169	0,200	0,230
$p_1$ (bar)	0,9273	0,9250	0,9208	0,9206	0,9218	0,9183	0,9176	0,9185	0,9112	0,9031
$\dot{m}_1$ (kg/s)	1,7879	1,9878	2,3015	2,3157	2,2298	2,4705	2,5134	2,4573	2,8890	3,2969
<b>parâmetros adimensionais da câmara de mistura</b>										
$\dot{m}_1 / \dot{m}_2$	7,46	7,30	7,92	7,39	7,04	7,46	6,80	5,96	6,21	6,37
$M_2/M_1$	15,6	14,0	12,0	11,9	12,4	11,2	11,0	11,2	9,5	8,3
$A_1/A_2$	111,2	111,2	111,2	111,2	111,2	111,2	111,2	111,2	111,2	111,2
$p_{02}/p_{01}$	4,8	5,5	5,9	6,3	6,4	6,7	7,5	8,3	9,4	10,5
$p_1/p_2$	1,37	1,20	1,12	1,04	1,03	0,98	0,88	0,79	0,69	0,62

Outro fato interessante a observar é a razão de pressões estáticas entre os dois jatos, que fica em torno de 1. Segundo Arkadov (1997) a razão ótima de pressões estáticas para operação dos injetores é perto de 1. Um valor diferente causará formação de choques e expansões em cascata que produzem maior perda. Neste caso, prevê-se que a câmara tem um melhor rendimento para pressões da ordem de 6,5 bar, o que será verificado futuramente por meio de uma medição mais detalhada.

## **5. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS**

Foi apresentada a Câmara de Mistura Supersônica da Divisão de Aerodinâmica do IAE, desde sua concepção e modelo matemático simplificado até suas principais características de projeto, bem como os procedimentos para a operacionalização da câmara de mistura e os principais resultados obtidos.

Estes resultados preliminares já comprovam a eficiência da utilização da injeção como forma de fornecer potência para a operação de túneis de vento, com razão de fluxo de massa de cerca de 7 (fluxo de massa induzido pelo fluxo de massa da injeção), fornecendo uma alternativa mais barata para os caros compressores de funcionamento contínuo. Os ensaios futuros propõem encontrar uma configuração (ângulo, pressão de estagnação do injetor, razão de áreas, etc.) que otimize o processo de mistura, minimizando as perdas de carga envolvidas e aumentando ainda mais a eficiência da solução proposta.

Embora apenas com uso de tubos de Pitot, os ensaios preliminares permitiram comprovar uma razoável uniformidade no escoamento na entrada da câmara de mistura, indicando que tanto o coletor projetado na entrada da mesma funcionou bem quanto que a presença do injetor não perturba de forma significativa o escoamento a montante do mesmo.

Paralelamente a isso, cabe ainda a investigação do fenômeno responsável pela perda de eficiência do processo para um valor intermediário de pressão de estagnação do injetor. Isso corrobora com o fato de que a busca pelo entendimento do processo físico pelo qual se dá o processo de mistura assume papel fundamental na busca da solução otimizada. Imbuída deste propósito, a câmara de mistura ora desenvolvida e operacionalizada permitirá um aprofundamento nos problemas relacionados à mistura de jatos de alta velocidade e ainda mais com uso de dispositivos de medidas mais sofisticados (filme-quente, PIV, Schlieren), além de produzir informações importantes para comparação e desenvolvimento de códigos em CFD.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, ao Instituto de Aeronáutica e Espaço e ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pela viabilização deste trabalho.

## **7. REFERÊNCIAS**

- Abramovich, G. N., 1963, "The Theory of Turbulent Jets", The MIT Press Classics.
- Abramovich, G. N., 1973, "Applied Gas Dynamics", Foreign Technology Division of Wright-Patterson Air Force Base, AD-762 307.
- Alperin, M., Wu, J. J., 1983a, "Thrust augmenting ejectors: part I," AIAA Journal, Vol. 21, No. 10, p. 1428-1436.
- Alperin, M., Wu, J. J., 1983b, "Thrust augmenting ejectors: part II," AIAA Journal, Vol. 21, No. 12, p. 1698-1706.
- Arkadov, Y. K., 1997, "Lições Sobre Injetores," ciclo de palestras e discussões com o engenheiro especialista russo do TsAGI (Centro de Aeronáutica de Moscou em Jukowski) durante missão de trabalho dos engenheiros Sidney Lage Nogueira e João Batista Pessoa Falcão Filho em Moscou.
- Bedrzhitsky, E. I. and Roukavets, V. P., 1996, "Historical Review of the Creation and Improvement of Aerodynamic Test Facilities at TsAGI," AGARD CP-585, No. 1, Artigo apresentado em "79th Fluid Dynamics Panel Symposium", Moscou, Rússia.
- Carrière, P., 1973, "The Injector Driven Tunnel," von Kármán Institute for Fluid Mechanics, Lectures Series on Large Transonic Wind Tunnels.
- Chinzei, N., Masuya, G., Komuro, T., Murakami, A., Kudou, K., 1986, "Spreading of Two-Stream Supersonic Turbulent Mixing Layers," Physics of Fluids, Vol. 29, No. 5, pp. 1345-1347.
- Eckert, W. T., Mort, K. W., Jope, J., 1976, "Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance", National Aeronautics and Space Administration, NASA Technical Note D-8246.
- Falcão Filho, J. B. P., 2006, "Estudo Numérico do Processo de Injeção em um Túnel de Vento Transônico," Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Mecânica-Aeronáutica do ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- Falcão Filho, J. B. P., Mello, O. A. F., 2002, "Descrição Técnica do Túnel Transônico Piloto do Centro Técnico Aeroespacial," Anais do IX Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia, ENCIT-2002, Caxambu-MG, artigo CIT02-0251.

- Falcão Filho, J. B. P., Avelar, A. C., Reis, M. L. C. C., 2009, "Historical Review and Future Perspectives for Pilot Transonic Wind Tunnel of IAE," *Journal of Aerospace Technology and Management*, ISSN 1984-9648, Vol. 1, No. 1, pp. 19-27.
- Falcão Filho, J. B. P., Ortega, M. A., 2007, "Numerical Study of the Injection Process in a Transonic Wind Tunnel. Part I: The Design Point." *ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 129, June, Issue 6, pp 682-694. DOI: 10.1115/1.2734236.
- Falcão Filho, J. B. P., Ortega, M. A., 2008, "Numerical Study of the Injection Process in a Transonic Wind Tunnel. The Numerical Details," *Computers and Fluids*, Vol 37, Issue 10, pp 1276-1308. Disponível na internet: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). DOI: 10.1016/j.compfluid.2007. 10.015.
- Falcão, J. B. P., F., Ortega, M. A., 2009, "Numerical Study of the Injection Process in a Transonic Wind Tunnel. Part II: The Off-Design Points." *Computers and Fluids*. Vol. 38, Issue 4, pp. 888-898. DOI: 10.1016/j.compfluid.2008.09.009.
- Georgiadis, N. J., Alexander, J. I. D. and Reshotko, E., 2003, "Hybrid Reynolds-Averaged Navier-Stokes/Large-Eddy Simulations of Supersonic Turbulent Mixing," *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 2, pp. 218-229.
- Goebel, S. G. and Dutton, J. C., 1991, "Experimental Study of Compressible Turbulent Mixing Layers," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 538-546.
- Goffert, B., Truyts, C. F., Lima, D. S. A., Falcão Filho, J. B. P., 2008, "Control of Injection System for the Pilot Transonic Wind Tunnel of IAE in Closed Circuit" *Anais do XII Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia*, ENCIT-2008, Belo Horizonte-MG.
- Jardine, C. N., 2005, "Calculating the Environmental Impact of Aviation Emissions", *Environmental Change Institute, Oxford University Centre for Environment*.
- POST, 2003, "Aviation and the Environment", *Parliamentary Office of Science and Technology*, POSTNote número 195 Abril 2003, Resumo de relatório.
- PSI, 2000, "ESP-16BP Pressure Scanner User's Manual," catálogo de produto da firma Esterline Pressure Systems 3<sup>rd</sup> Edition- [www.PressureSystems.com](http://www.PressureSystems.com).
- Muhlstein, L., Jr., Petroff, D. N., Jillie, D. W., 1974, "Experimental Evaluation of an Injector System for Powering a High Reynolds Number Transonic Wind Tunnel," *AIAA Paper 74-632*, Bethesda, Maryland.
- Nogueira, S. L., Ortega, M. A., Falcão, J. B. P., F., Fico, N. G. C. R., Jr., 1988, "Injection Optimization and its Application to Wind Tunnels," *Anais do "2nd Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences"*, ENCIT-1988, Águas de Lindóia, SP, pp. 151-153.
- Rose, W. C., Hanly, R. D., Steinle, F. W., Jr., Chudyk, D. W., 1982, "The Effect of Ejector Augmentation on Test-Section Flow Quality in the Calspan 8-ft Transonic Wind Tunnel," *AIAA Paper 82-0571*.
- Samimy, M., Addy, A. L., 1986, "Interaction Between Two Compressible, Turbulent Free Shear Layers," *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 12, pp. 1918-1923.
- Shapiro, A. H., 1953, *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Vol. I and II, Ronald Press, New York, 1953.
- Silva, A. F. C., Ortega, M. A., Nogueira, S. L., Falcão Filho, J. B. P., 2010a, "Supersonic Injector Design for Using in a Mixing Chamber," *Proceedings of ENCIT 2010, 13rd Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering* (submetido).
- Silva, A. F. C., Ortega, M. A., Falcão Filho, J. B. P., 2010b, "Diffuser Design for a Supersonic/Subsonic Mixing Chamber," *Proceedings of ENCIT 2010, 13rd Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering* (submetido).
- Silva, A. F. C., Ortega, M. A., Falcão Filho, J. B. P., 2010c, "Parametric Analysis of a Supersonic/Subsonic Mixing Chamber," *Proceedings of ENCIT 2010, 13rd Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering* (submetido).
- Trentacoste, N., Sforza, P., 1967, "Further Experimental Results for Three-Dimensional Free Jets," *AIAA Journal*, Vol. 5, No. 5, pp. 885-891.

## **8. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING  
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil  
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

## SUPERSONIC/SUBSONIC MIXING CHAMBER DESCRIPTION AND FIRST RESULTS

André Fernando de Castro da Silva, andre.fernando.t10@gmail.com<sup>3</sup>

Rodrigo de Oliveira Braz, ro-braz@uol.com.br<sup>1</sup>

Alcides Rocha, arocha@iae.cta.br<sup>2</sup>

João Batista Pessoa Falcão Filho, jb.falcao@ig.com.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Taubaté (UNITAU), Rua Daniel Danelli, s/n, Jardim Morumbi, CEP: 12060-440, Taubaté, São Paulo

<sup>2</sup>Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Divisão de Aerodinâmica (ALA), Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP: 12228-904, São José dos Campos, São Paulo

<sup>3</sup>Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP: 12228-900, São José dos Campos, São Paulo

**Abstract.** *The PTT (Pilot Transonic Tunnel) of IAE (Institute of Aeronautics and Space) is a conventional closed-loop tunnel, powered by a main compressor within a Mach number range of 0.2 to 1.3, with test section dimensions of 0.30 m x 0.25 m. A frequent concern about the energetic issue, even for the leakage of the planet natural resources or for the desired cost reduction, has led to the use of innovative solutions. In this context, the PTT is also able of intermittent operation with the utilization of the compressed air injection system, extending the tunnel operation envelope with the same installed power. The injection system discharges compressed air through injector nozzles, which operates choked with Mach number of 1.9, in a mixing chamber promoting the primary flow acceleration. It is of fundamental importance to adjust the injection system parameters during the combined operation with the tunnel main circuit, in order to reduce the mixing chamber losses. A parametric experimental study on the mixing chamber is highly desired, although it is of difficult execution in the tunnel circuit. To this purpose, it was developed the project and construction of a mixing chamber for an experimental parametrical evaluation, in order to allow the mixing process optimization (load loss minimization). This work presents the theoretical principles that support a mixing chamber project, a Fluid Mechanics equations analysis applied to a control volume model and a brief description of its main characteristics. Finally, the measurement systems for the mixing chamber main parameters acquisition are described simultaneously to a first experimental results analysis presentation.*

**Keywords:** *Transonic Windtunnel, Mixing Chamber, Experimental, Supersonic Jet, Control Volume*

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.