

A PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM HIPERSÔNICA NO IEAv

A.M. dos Santos*

CTA, Instituto de Estudos Avançados, Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica, 12.231-970, São José dos Campos, SP

Recebido: 11 de outubro, 2007; Revisado: 17 de fevereiro, 2008

Palavras-chave: hipersônica, ondas de choque, túneis de choque, técnicas de diagnóstico, IEAv.

RESUMO

São apresentadas as atividades na área de escoamentos em velocidades hipersônicas desenvolvidas no Instituto de Estudos Avançados do CTA. Descrevem-se a infra-estrutura disponível, as pesquisas e desenvolvimentos sobre a interação de escoamentos hipersônicos sobre aeronaves e veículos espaciais e os métodos de diagnóstico e computacionais para a compreensão dos parâmetros envolvidos no processo.

ABSTRACT

The activities related to hypersonic velocities flows developed at the Instituto de Estudos Avançados / CTA are presented in this paper. The research and development on the interaction of hypersonic flows with aircrafts and spatial vehicles are described. The diagnostics and computational methods for the understanding of the related parameters are also mentioned.

1. INTRODUÇÃO

Viajar em velocidades superiores à velocidade do som é uma tecnologia já dominada há várias décadas. Datas marcantes dos avanços alcançados são o dia 14 de outubro de 1947, em que ocorreu o primeiro vôo de um avião supersônico, o Bell X-1, e o ano de 1969 em que o supersônico Concorde realizou o primeiro vôo comercial.

Vôos em velocidades supersônicas têm uma característica importante que é o estrondo provocado pela ultrapassagem da “barreira do som”. Isto se deve às ondas de choque que são formadas pela reflexão do meio gasoso sobre a superfície do objeto em vôo. Como a propagação da massa gasosa refletida não pode ultrapassar a velocidade do som no meio, forma-se em torno da superfície do objeto uma região de alta pressão, superior à pressão do meio em que ele se movimenta. Na interface entre a região de alta pressão produzida pelas reflexões e o meio propagante, ocorre uma descontinuidade da pressão, um “degrau” de pressão, que é a onda de choque.

A este aumento de pressão está associado um aumento de temperatura, semelhante ao que ocorre na compressão de um gás. Quanto maior o número de Mach, que é o número de vezes que a velocidade de deslocamento é maior que a

velocidade do som, maior diferença de pressão e maior o aumento da temperatura da camada do gás junto ao objeto que se desloca. Além disso, o próprio atrito do gás com as paredes do objeto é outro fator que contribui para o aumento da temperatura. Para valores suficientemente elevados da velocidade e, conseqüentemente, da temperatura após a onda de choque (região de altas pressões e temperatura) começa a ocorrer a decomposição do meio gasoso com a ionização e a ocorrência de reações químicas entre os constituintes do meio. O regime de velocidades em que esses fenômenos são observados é chamado de regime hipersônico e ocorre, para o ar, para números de Mach superiores a aproximadamente 5.

2. DISPOSITIVOS UTILIZADOS NA PESQUISA EM HIPERSÔNICA

Em laboratório, o modo mais conveniente para pesquisas em velocidades elevadas é fazer com que o meio gasoso esco sobre o objeto em estudo que se acha em repouso. Os dispositivos empregados usualmente para este fim são os chamados túneis de choque que são um tipo de túneis de vento hipersônicos. Os túneis de choque são uma extensão dos tubos de choque, dispositivos amplamente usados em estudos de cinética de reações químicas a altas pressões e temperaturas [1].

Um tubo de choque (Figura 1) é simplesmente um tubo fechado em suas extremidades e separado internamente por um diafragma. Em uma das seções do tubo coloca-se um gás a alta pressão (seção do “driver”) e na outra o sistema que se deseja estudar, onde a pressão é bem mais baixa (região do “driven”). Para se alcançar as pressões elevadas no “driver” utilizam-se compressores ou a combustão de gases.



Figura 1 – Tubo de choque.

Através de um dispositivo adequado, o diafragma é rompido e o gás a alta pressão comprime o gás em estudo que, deste modo, atinge pressões e temperaturas bastante elevadas, di-

* alberto@ieav.cta.br

fíceis de serem obtidas por meios normalmente usados em laboratório. Sensores são montados na extremidade do tubo para medição das condições produzidas durante o processo, bem como janelas para observação que permitam a colocação de dispositivos ópticos de medição.

Um túnel de choque (esquema na Figura 2) nada mais é do que um tubo de choque em que se acrescenta na extremidade de baixa pressão uma tubeira ou bocal de expansão, separado do tubo de choque por um segundo diafragma. Na operação do túnel de choque, o segundo diafragma é rompido devido à alta pressão que é atingida na extremidade do tubo de choque e o gás, atravessando a tubeira, é expandido e atinge velocidades elevadas, função da relação entre as áreas de saída (A) e da garganta (A*) da tubeira, conforme a equação [2] (válida para gases caloricamente perfeitos, isto é, em que γ é constante):

$$\left(\frac{A}{A^*}\right) = \frac{1}{M^2} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)} \quad (1)$$

em que M é o número de Mach do escoamento à saída da tubeira e γ é a relação C_p/C_v entre os calores específicos a pressão e volume constantes.

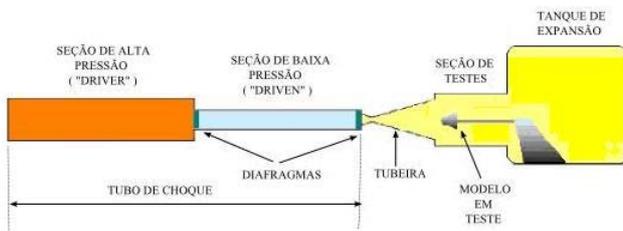


Figura 2 – Túnel de choque.

A parte final do túnel de choque é o tanque de expansão onde é colocado o modelo a ser testado e é, em geral, provido de janelas de observação para a realização de medidas dos parâmetros de interesse nos experimentos.

Para evitar a formação de ondas de choque no interior da tubeira, a pressão no tanque de expansão deve ser mantida abaixo da pressão prevista na saída da tubeira (p_e), que é dada por:

$$\frac{p_e}{p_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{-\gamma/(\gamma - 1)} \quad (2)$$

onde p_0 é a pressão na entrada da tubeira. Em operação normal mantém-se o tanque em vácuo a uma pressão da ordem de 10^{-2} mbar.

A operação dos túneis de choque hipersônicos é pulsada, isto é, após o rompimento do diafragma da região de alta pressão, estabelece-se um escoamento hipersônico à saída da tubeira que dura alguns milésimos de segundo, suficientes, entretanto, para a realização das medições sobre o comportamento dos modelos submetidos a estas velocidades.

3. PESQUISA EM HIPERSÔNICA NO INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS (IEAv): HISTÓRICO

As atividades relacionadas aos estudos em hipersônica no IEAv estão concentradas na Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica. O objetivo da Divisão é a realização de pesquisas e desenvolvimento na área de escoamentos em velocidade hipersônica, para aplicação ao voo de veículos aeroespaciais.

Em 1961 foi projetado e construído no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), órgão do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA), ao qual o IEAv também está subordinado, um tubo de choque como parte de um trabalho de graduação de aluno de engenharia [3]. Alguns outros trabalhos [4] de aplicações deste tubo de choque foram ainda realizados como parte de trabalho de graduação e tese de mestrado.

A este tubo de choque, já no IEAv, em 1986, foram acrescentados uma tubeira e um tanque de exaustão, transformando-o em um túnel de choque hipersônico, que foi denominado T1 (túnel 1) e com o qual velocidades de escoamento superiores a Mach 6 foram obtidas (Figura 3). Nesse túnel foram realizados experimentos em lasers de dinâmica de gases, com emissão na região de 16 μm de comprimento de onda, em que a inversão de população foi alcançada pela expansão rápida do CO_2 na tubeira do túnel [5].



Figura 3 – Túnel de choque T1.

Paralelamente, foram também desenvolvidos os processos de resfriamento dinâmico em tubeiras, para aplicações em espectroscopia em temperaturas baixas, da ordem de 100 K. Em dezembro de 1992 foi colocado em operação um segundo túnel de choque (T2) (Figura 4), para permitir estudos com modelos de dimensões maiores e tempos de testes superiores aos obtidos no T1. O túnel T2 tem cerca de 12 m de comprimento total, possui uma seção de teste em que podem ser colocados modelos de até 20 cm de diâmetro e 60 cm de comprimento e com ele é possível alcançar-se números de Mach de até 15 com tempos de teste da ordem de 1 ms. Em um procedimento típico de operação deste túnel, coloca-se hélio no “driver” a uma pressão de 200 atm (aproximadamente 3000 psia). As condições do gás do “driven” são escolhidas de tal modo que a composição e a pressão do gás

na região de teste (após a tubeira de expansão) simulem o ambiente de voo do modelo testado. A Ref. [6] mostra um dos trabalhos realizados neste túnel.



Figura 4 – Túnel de choque T2.

Finalmente em dezembro de 2006 foi inaugurado o maior túnel de choque hipersônico pulsado do hemisfério sul (T3) cuja característica principal é a possibilidade de se colocar modelos de até 1,4 m de comprimento e 40 cm de diâmetro na região de testes, com velocidades de escoamentos de até Mach 25 e tempos de teste da ordem de 10 ms. Esse túnel, que tem cerca de 24 m de comprimento total, foi inteiramente projetado e construído no Brasil (Figura 5) através de projeto financiado pela FAPESP [7].



Figura 5 – Túnel de choque T3.

4. ATIVIDADES EM HIPERSÔNICA NO IEAv

A Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica do IEAv está dividida em três subdivisões:

- Subdivisão de Hipersônica Experimental que tem por finalidade a pesquisa em túneis de choque e dispositivos que permitam a geração de escoamentos hipersônicos;
- Subdivisão de Simulação Computacional que realiza pesquisa e desenvolvimento na modelagem de sistemas

aeroespaciais e de métodos computacionais para estudos de aerodinâmica de sistemas hipersônicos;

- Subdivisão de Técnicas de Diagnóstico que tem como objetivo a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico para medições de parâmetros de interesse em escoamentos hipersônicos.

4.1 LINHAS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

Três principais linhas de pesquisa são conduzidas atualmente no IEAv:

a) Aerodinâmica de veículos espaciais em velocidades hipersônicas:

Veículos enviados ao espaço que necessitam ser recuperados, como por exemplo as cápsulas espaciais e veículos transportando astronautas de volta à superfície da Terra, atingem velocidades extremamente elevadas ao reentrar na atmosfera, o que acarreta severos efeitos de aquecimento da superfície do veículo. Assim também, vôos em velocidades hipersônicas, o que possibilitaria viagens para qualquer parte do globo em poucas horas, ou o desenvolvimento de veículos hipersônicos para colocação em órbita de satélites de uma maneira mais eficaz e econômica, necessitam da solução para novos problemas, em especial aerodinâmicos e de materiais, que ocorrem nesse regime de velocidades.

Uma das áreas estudadas, dentro dessa linha de pesquisa, é a da interação de veículos espaciais em reentrada na atmosfera. Para utilização em pesquisas em condições de microgravidade, está sendo desenvolvido no CTA o satélite SARA (Satélite Recuperável Atmosférico). Os efeitos da reentrada do satélite estão sendo testados nos túneis de choque do IEAv. A Figura 6 mostra um experimento em que o fluxo de ar a velocidades hipersônicas interage com um modelo em escala do satélite, resultando na ionização do ar, constatada através da luminosidade observada nos experimentos. Medições de pressão, de transferência de calor e de temperatura são feitas para determinar as condições que o satélite deverá suportar ao atravessar a atmosfera terrestre.

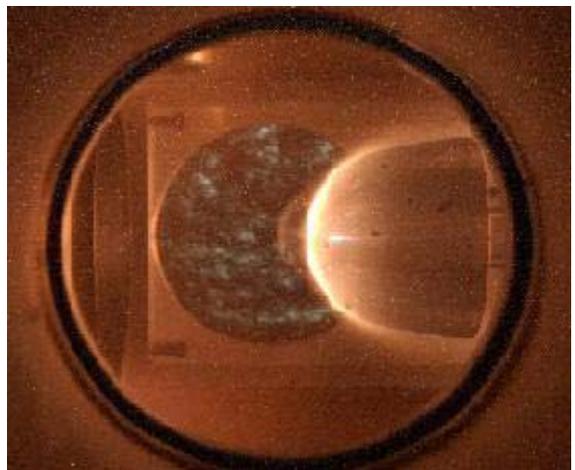


Figura 6 – Modelo do SARA no túnel hipersônico T2.

As temperaturas elevadas e o arrasto aerodinâmico em escoamentos hipersônicos podem ser reduzidos através da técnica de adição de energia eletromagnética ao escoamento. Experimentos realizados em laboratório utilizam pulsos de laser de alta intensidade que provocam o “breakdown” do ar à frente do veículo viajando a velocidade hipersônica. A diminuição da intensidade da onda de choque é mostrada na Figura 7 em experimento realizado no túnel de choque T2. Observa-se uma redução de arrasto de cerca de 40%, comprovada pela diminuição da pressão na superfície do modelo testado. Com esta técnica pode ser obtido o controle do escoamento em torno do veículo, permitindo inclusive a sua dirigibilidade, sem a presença de partes móveis na sua estrutura externa.

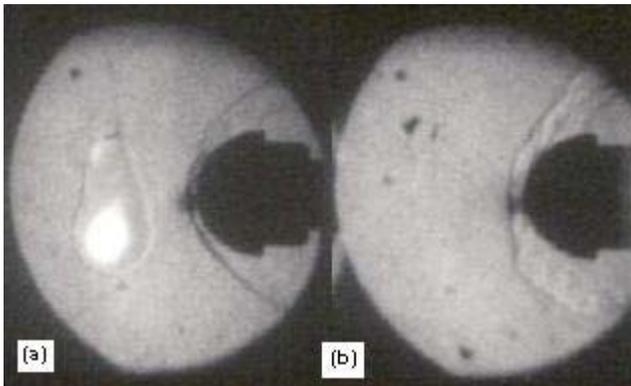


Figura 7 – Redução de arrasto aerodinâmico por meio da adição de energia ao escoamento: (a) “breakdown” produzido por laser de CO₂ (b) deformação da onda de choque sobre o veículo.

b) Sistema de propulsão aspirada hipersônica

O desenvolvimento de veículos que atinjam velocidades hipersônicas vem sendo perseguido em vários países. Notícias sobre os sucessos dos protótipos de demonstração da série Hyper-X (X-43A, X-43C), desenvolvidos pela NASA [8], e pelo modelo australiano HyCause [9] foram publicados recentemente.

O IEAv também tem o seu programa de desenvolvimento de scramjets, dispositivos que, através da combustão supersônica são capazes de atingir velocidades hipersônicas.

Os scramjets (“supersonic combustion ramjets”) correspondem a uma variação dos ramjets em que a diferença fundamental é a velocidade do escoamento onde a combustão se processa. Ambos consistem essencialmente de um tubo em que o ar é comprimido para dentro da câmara de combustão pela formação de ondas de choque. Nos scramjets, viajando a velocidades hipersônicas, o ar é comprimido e penetra na câmara de combustão em velocidade supersônica e temperatura elevada, diferentemente dos ramjets em que a velocidade é reduzida a valores subsônicos (Figura 8).

O combustível, em geral hidrogênio, é injetado na corrente de gás supersônico. As temperaturas elevadas e uma relação adequada de combustível/ar promovem a ignição e queima da mistura, aumentando o volume, a pressão e a temperatura

e produzindo empuxo necessário para acelerar o veículo. É importante ressaltar que o “scramjet” necessita atingir velocidades iniciais supersônicas para que o processo de combustão supersônica ocorra. Essa velocidade inicial, nos modelos americanos e australianos testados até agora, foi atingida com o auxílio de foguetes. Diferentes destes, entretanto, os “scramjets” não carregam o comburente, que é o próprio ar atmosférico.

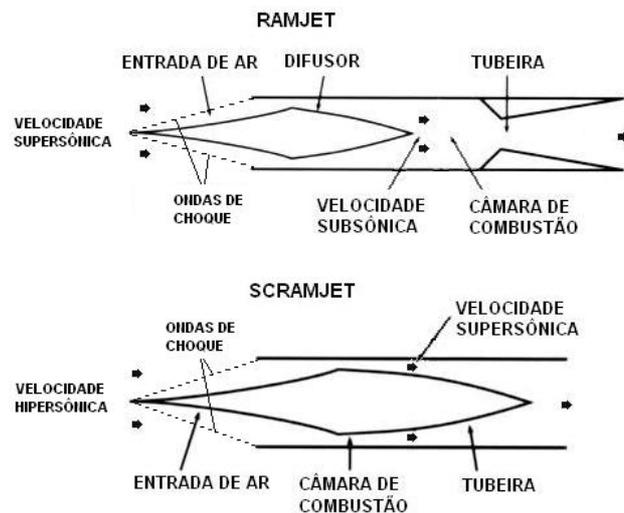


Figura 8 – Ramjets e Scramjets.

Um modelo de scramjet estudado é mostrado na Figura 9, dentro da câmara de teste do túnel de choque T2. Atualmente estão sendo realizados experimentos para comprovar a ocorrência da combustão no interior da câmara do modelo, através da aplicação de técnicas de diagnóstico não intrusivas.

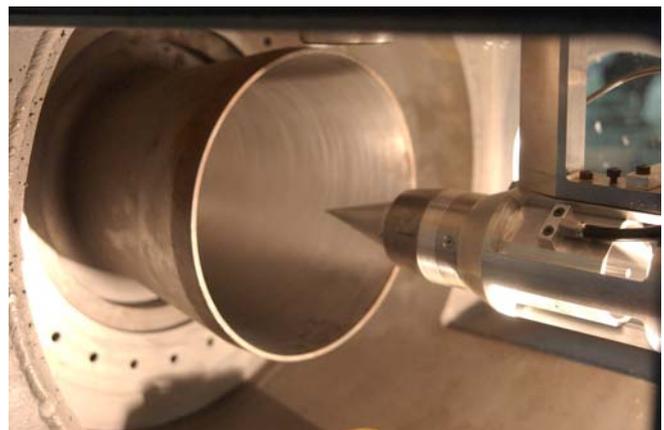


Figura 9 – Modelo de Scramjet na seção de testes do túnel T2.

c) Propulsão a laser

Quando um feixe de laser pulsado de suficientemente alta potência é focalizado em uma região de dimensões reduzidas em um meio gasoso, ocorre o chamado rompimento dielétrico do meio ou “breakdown”. Isto se dá porque o meio

através da absorção de vários fótons tem sua temperatura elevada a tal ponto que processos de ionização e dissociação dos gases geram uma pequena “explosão” na região focal, resultando em uma expansão dos gases.

No processo de propulsão a laser para utilização em dispositivos para colocação de objetos em órbita, o veículo tem a sua região posterior formada por um espelho parabólico que focaliza o feixe de laser em uma região próxima à superfície do veículo. A “explosão” do ar nessa região resulta no empuxo necessário à aceleração. Lasers de CO₂ ou lasers químicos pulsados são as fontes de lasers cogitados para este processo. Para atravessar a atmosfera é necessária uma alta taxa de repetição do laser, colocado na superfície terrestre, bem como um sistema que mantenha o feixe de laser apontado corretamente na parte posterior do veículo.

A partir de uma certa altura, quando a densidade do ar for insuficiente para permitir a formação do “breakdown”, utiliza-se um processo de ablação a laser, em que a focalização do feixe se dá sobre um material plástico, preso à superfície do veículo, fazendo com que partículas do material sejam ejetadas, produzindo o empuxo necessário ao deslocamento. A vantagem da propulsão a laser é que o veículo não carrega nem o propelente nem o oxidante. O laser utilizado na propulsão tem base na superfície terrestre, de modo que os veículos são mais leves, o que significa que a carga útil pode ser aumentada.

Experimentos preliminares estão em andamento no túnel de choque T3, envolvendo a construção de um modelo de veículo e a colocação em operação dos lasers que serão utilizados nos estudos.

4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A compreensão mais aprofundada dos fenômenos que ocorrem nos escoamentos hipersônicos necessita de uma base teórica adequada. São conhecidas e bem desenvolvidas as técnicas de CFD (“Computational Fluid Dynamics”) para a descrição de escoamentos em velocidades abaixo da velocidade do som. Para escoamentos hipersônicos, com a formação de ondas de choque, e hipersônicos, em que ocorrem reações químicas no meio, a complexidade de cálculo aumentam significativamente.

A Subdivisão de Simulação Computacional é a responsável pelo desenvolvimento de códigos computacionais que procurem descrever e prever propriedades dos escoamentos presentes nos experimentos desenvolvidos em laboratório. Alguns dos resultados de cálculo já efetuados, apresentados na Figura 10, mostram o perfil de temperatura resultante da interação de um escoamento hipersônico (Mach 7) sobre uma placa plana.

4.3 TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO

A aplicação de técnicas convencionais de medições em escoamentos, como, por exemplo, a utilização de termopares para determinação de temperaturas, são muitas vezes inviáveis em escoamentos hipersônicos. Isto porque, além de perturbarem o escoamento, os instrumentos utilizados não suportariam as altas temperaturas e velocidades presentes.

A necessidade da utilização de técnicas não intrusivas é fundamental para a medição de propriedades como velocidades, temperatura, pressão e concentração das substâncias e radicais presentes. As técnicas empregando propriedades ópticas do meio são particularmente úteis e vem sendo largamente aplicadas. Uma das técnicas que estão sendo estudadas no IEAv é descrita em artigo desta edição desta Revista [10]. Duas outras técnicas são apresentadas a seguir.

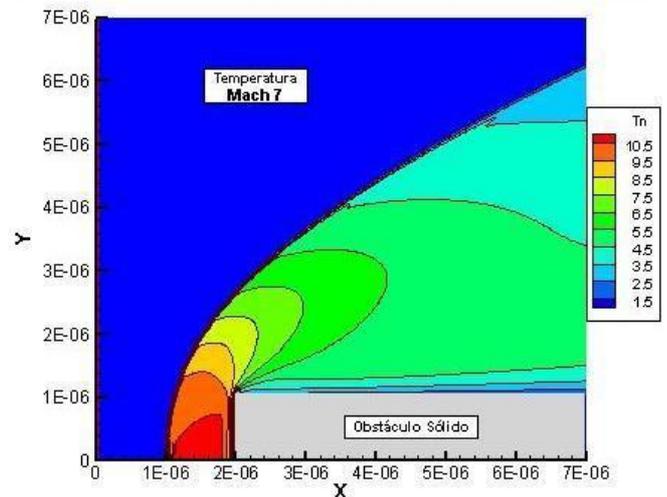


Figura 10 – Perfil de temperatura para escoamento hipersônico (Mach 7) incidindo sobre placa plana. $T_n = T/T_0$ em que T_0 é a temperatura do escoamento livre; X e Y: unidades arbitrárias.

a) “Schlieren”

Esta é uma técnica utilizada para a visualização de escoamentos e que se baseia na deflexão da luz devido a uma diferença de índice de refração do meio, o que está relacionado com sua densidade. Uma fonte de luz ilumina a região que se deseja observar e a luz defletida e a não defletida, esta parcialmente bloqueada por uma lâmina, podem ser visualizadas em um anteparo ou com uma câmara de vídeo ou fotográfica. A Figura 11 mostra um experimento realizado no túnel de choque T2 em que um fluxo de ar em velocidade hipersônica incide sobre um corpo de prova. As ondas de choque, que separam escoamentos em pressões diferentes, e, conseqüentemente, de densidades diferentes, aparecem distintamente na foto.

b) Fluorescência induzida por laser (LIF - “Laser-induced fluorescence”)

Esta técnica se baseia na emissão de radiação por uma molécula quando ela é excitada através da absorção de radiação de um laser. Radicais, como o OH, e substâncias, como o NO, formados durante processos envolvendo a combustão, são os que apresentam as melhores qualidades para aplicação da técnica.

A fluorescência induzida por lasers se presta para a determinação da temperatura dos gases em um escoamento hipersônico bem como mapear a concentração da substância, isto é,

visualizar como ela se distribui ao longo do escoamento. Um esquema do arranjo experimental utilizado no mapeamento de uma chama é mostrado na Figura 12.

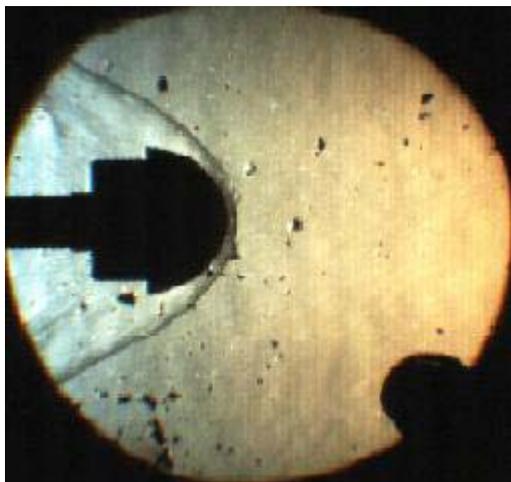


Figura 11 – Schlieren.

Como ilustração, a Figura 13 mostra a imagem da distribuição de concentração do radical OH em um queimador simples, usando gás etanol como combustível.

A visualização de um escoamento hipersônico de ar, em que não há combustão, é possível pela adição de, por exemplo, NO ou acetona à corrente de gás.

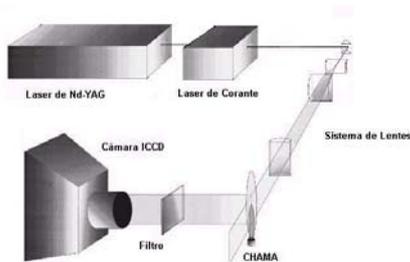


Figura 12 – Esquema da montagem para visualização de chamas usando fluorescência induzida por laser.

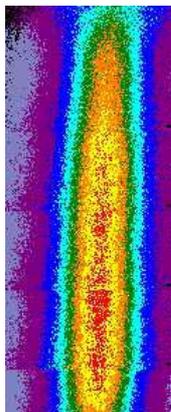


Figura 13 – Imagem de chama de etanol visualizada utilizando-se a fluorescência induzida por laser.

5. CONCLUSÕES: EXPECTATIVAS FUTURAS

O objetivo da Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica é o desenvolvimento de um veículo hipersônico e, para isso, realiza experimentos em túneis de choque de modelos baseados em propulsão a combustão supersônica e a laser. Para apoiar as pesquisas, são aplicados métodos computacionais para descrever e prever o comportamento dos modelos em vôos hipersônicos e as técnicas de medidas para observar as condições de vôo dos veículos.

Os objetivos imediatos da Divisão, após os testes que estão sendo conduzidos em túneis de choque, é lançar o modelo com propulsão supersônica que vem sendo estudado, utilizando-se um foguete de sondagem (VS-30 ou VS-40, desenvolvidos no CTA) como estágio inicial, para demonstrar a viabilidade do projeto do veículo. Do mesmo modo, o projeto e construção de um protótipo de veículo propulsionado com laser deverão também ser concluídos em cerca de quatro anos.

REFERÊNCIAS

1. FERRI, A., *Fundamental Data obtained from shock-tube experiments*, Pergamon Press, 1961.
2. ANDERSON JR., J.D., *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw Hill Intern. Editions, 1984.
3. MIRANDA, A.T., *Projeto e construção de um tubo de choque de área transversal constante*, Trabalho de Graduação, 1961, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)/CTA.
4. BOBENRIETH, R.F., *Extensão do método de Keller para o cálculo de camada limite compressível e sua aplicação no cálculo de fluxo de calor na parede de um tubo de choque*, Dissertação de Mestrado (1988). Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)/CTA.
5. MINUCCI, M.A.S., *Medidas de ganho em um laser de CO₂ cw gás dinâmico*, Dissertação de Mestrado (1986). Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)/CTA.
6. NASCIMENTO, M.A.C. do, *Gaseous piston effect in shock tube/tunnel when operating in the equilibrium interface condition*, Dissertação de Doutorado (1999). Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)/CTA.
7. TORO, P.G.P., *Investigação Preliminar da Tecnologia da Combustão Supersônica*. Projeto FAPESP (2005). Processo No. 04/00525-7.
8. NASA "Hyper-X" Program Demonstrates Scramjet Technologies. Página da internet acessada em 8/10/2007 <http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-040-DFRC.html>
9. Avião hipersônico australiano bate recorde mundial de velocidade. Página da internet acessada em 8/10/2007 <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010130070618>
10. SANTOS, L.R.; TORO, P.G.P.; SBAMPATO, M.E.; BARRETA, L.G.; RIBEIRO, R.J., BOTELHO, M.I.M.F.; SANTOS, A.M., *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, this issue.