

DESENVOLVIMENTO DE UM BOCAL SUPERSÔNICO PARA UMA BANCADA DE TESTES DE COMBUSTORES SUPERSÔNICOS.

E.W.N. Silva¹; J.S. Guimarães^{2*}; V.S.F.O. Leite²; D. Carinhana Jr²

1 Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Professor Jessen Vidal
Av. Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 - Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP,
CEP.: 12247-014, Brasil.

Telefone: (12) 3905-2423

2 Instituto de Estudos Avançados – IEAv

Trevo Coronel Aviador José Alberto Albano do Amarante, 1 – Putim, São José dos
Campos/SP, CEP: 12228-001, Brasil.

Telefones: (12) 3947-5538

*jeftesg@gmail.com

RESUMO: Os equipamentos de ensaio em solo são utilizados como ferramentas para a obtenção de dados representativos de um voo real. Atualmente o IEAv possui uma versão Piloto de uma Bancada de Testes de Combustores Supersônicos (BTCS), que está sendo utilizado para os estudos de escoamentos supersônicos e estudos de combustão supersônica, e também para obtenção de dados que ajudarão na montagem da BTCS definitiva. A BTCS Piloto é formada basicamente de uma câmara de combustão que tem como finalidade aquecer o escoamento, acoplado a um bocal supersônico, para acelerar o mesmo até as condições de ensaio. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de bocais, para serem utilizados na BTCS piloto, visando a obtenção de números da Mach entre 2 e 3, adaptados à vazão e à pressão fornecida atualmente pela linha de alimentação de gases da bancada.

PALAVRAS-CHAVE: bocal supersônico, ensaios em solo, técnica schlieren.

ABSTRACT: Ground test equipments is used as a tool for obtaining representative data of a real flight. IEAv currently has a Pilot version of a Supersonic Combustion Test Bench (SCTB), which is being used for supersonic flow and supersonic combustion studies, and also for obtaining data that will assist in the assembly of the definitive SCTB. The SCTB Pilot is basically formed of a combustion chamber designed to heat the flow, coupled to a supersonic nozzle, to accelerate it to the test conditions. This work purpose is to develop nozzles to be used in SCTB pilot, aiming to obtain Mach numbers between 2 and 3, adapted to the flow and pressure currently supplied by the bench gas supply line.

KEYWORDS: supersonic nozzle, ground tests, schlieren technique

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), vem desenvolvendo pesquisas na área de veículos hipersônicos por meio do projeto PropHiper (Propulsão Hipersônica 14-X), tendo em vista que esta área de estudo tornou-se estratégica para os Ministérios da Defesa e da Ciência e Tecnologia, que visam garantir por meio deste a igualdade tecnológica com as demais nações (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2009). Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um veículo que seja capaz de demonstrar os conceitos de propulsão hipersônica por meio do desmontador

14 -X. Na Figura 1 é apresentado o modelo do 14 - X que vem sendo utilizado em ensaios laboratoriais em túneis de choque disponíveis na Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica (EAH) do IEAv. O modelo que vem sendo desenvolvido usará a tecnologia *waverider*, onde o veículo hipersônico usa a própria onda de choque formada no seu bordo de ataque para gerar sustentação do veículo, e a tecnologia *scramjet* (*supersonic combustion ramjet*), que utiliza da compressão do ar provocada pela onda de choque para comprimir o escoamento no interior do seu combustor e assim gerar a propulsão e manter o veículo em voo.



Figura 1. Modelo do 14-X testado em túnel de choque (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2019).

Para o estudo do escoamento hipersônico e da combustão supersônica são utilizados um conjunto de três equipamentos de ensaio em solo, que são: túnel de choque, lançador hipersônico de massa, e a Bancada de Testes de Combustores Supersônicos (BTCS). Estes três equipamentos representam o conjunto necessário para a realização de ensaios de aerodinâmica e hipersônica (LEITE, 2006)

1.1. Banca De Testes De Combustores Supersônicos - BTCS

O estudo experimental da combustão supersônica tem sido de interesse de diversos países desde os anos 50 (CURRAN,2001), tornando assim a BTCS um equipamento de interesse dos grandes centros de pesquisas aeroespaciais, sendo encontrada em duas configurações principais, uma por aquecimento com arco elétrico, onde uma fonte de alta tensão conectada às extremidades do GAV gera um arco elétrico que aquece o ar que em seguida é acelerado por um bocal até as condições de ensaio desejadas, e outro com aquecimento do ar no interior do GAV por combustão. Neste o ar é aquecido através da combustão e acelerado por um bocal convergente-divergente. O Gerador de Ar viciado recebe esse nome devido a resíduos da combustão do combustível utilizado para o aquecimento do ar (BRANDÃO, 2017; GUIMARÃES et al, 2018).

A BTCS é constituída basicamente por uma câmara de combustão denominada GAV, que tem por finalidade aquecer o ar até as condições de temperaturas desejadas, acoplado as suas extremidades tem-se uma placa de injeção de combustíveis de um lado, que é utilizada para pré mistura e injeção dos gases e do outro lado tem-se um bocal supersônico (convergente-divergente) que tem por finalidade acelerar o escoamento aquecido até as condições de ensaio. (GUIMARÃES, 2018). Sua finalidade é de simular as condições do escoamento gerados pelas ondas de choque provocadas pela geometria do veículo hipersônico, na entrada do combustor de um scramjet.

Para a montagem da BTCS que será utilizada para ensaiar o combustor do 14-X se faz necessário a construção de um laboratório adequado juntamente com uma sala de controle, para a segurança dos operadores, bem como um sistema de alimentação de reagentes adequado, incluindo as linhas de ar comprimido, de gás natural veicular (GNV) e de oxigênio. Tendo em vista que o projeto deste laboratório ainda está em fase de desenvolvimento, foi fabricada uma unidade piloto da BTCS (Figura 2), entretanto foram utilizados o mesmo bocal e a mesma placa de injeção de

combustível que foram projetados para serem utilizados na BTCS que será utilizada para ensaiar o combustor do 14 - X.

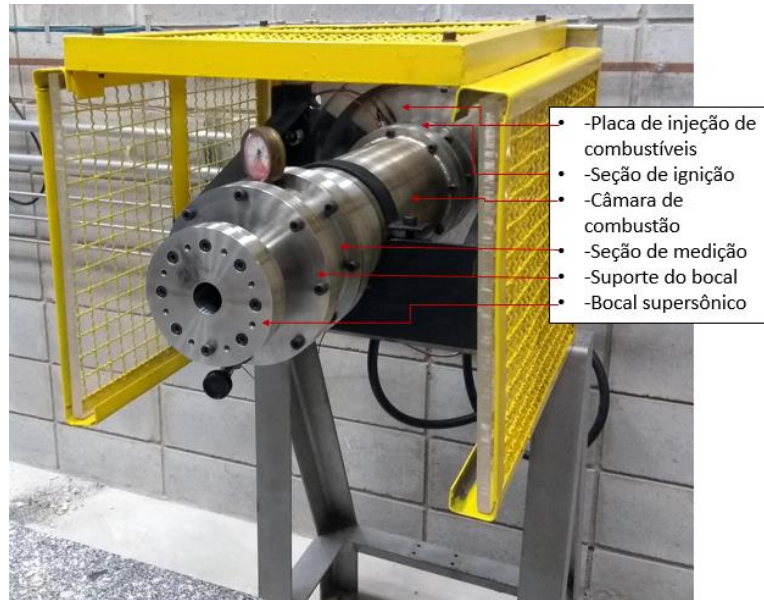


Figura 2. Bancada piloto para testes de combustores supersônicos montada no IEAv (GUIMARÃES *et al*, 2018).

Após a realização de alguns ensaios experimentais observou-se uma limitação da BTCS piloto em atingir uma pressão de estagnação necessária na entrada do bocal para que fosse possível a obtenção de um escoamento completamente desenvolvido. Isso se deve ao fato de que o bocal utilizado possuía um diâmetro de garganta muito grande para o atual sistema de alimentação de gases. Dessa forma, o presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um bocal adequado de Mach 2 a 3 para a BTCS Piloto, com um diâmetro de garganta máximo que permita atingir a pressão de estagnação necessária para a geração de um escoamento completamente desenvolvido, e também estudar outros possíveis bocais que poderão ser aplicados nesta configuração de BTCS.

2. METODOLOGIA

Realizados os ensaios com o bocal oriundo da BTCS Definitiva, observou-se que a pressão máxima de estagnação medida foi de $p_0 = 500$ kPa (5 bar), sendo que como a bancada está aberta para a atmosfera (+/- 100 kPa ou 1 bar) a pressão de estagnação necessária para a bancada produzir um escoamento completamente desenvolvido para um número de Mach em torno de 2,6 deveria ser em torno de $p_0 = 2000$ kPa (20 bar), uma vez que a relação de pressões p_0/p para este número de Mach é igual a 19,95. Observou-se também neste ponto que o fato da pressão de estagnação máxima alcançada ser a acima citada (500 kPa) era devido ao diâmetro da garganta do bocal ($\varnothing 20$ mm) ser grande demais para a vazão de alimentação de gases hoje existente da BTCS piloto. Neste caso para manter-se o sistema de alimentação de gases utilizado pela BTCS Piloto, foi necessário o projeto de um novo bocal, com um diâmetro de garganta que fornecesse a pressão de estagnação necessária para as condições de desejadas nos experimentos (Mach 2 a 3).

2.1 Teste de Estanqueidade

Inicialmente, foi realizado um teste de estanqueidade para averiguar a existência de possíveis vazamentos no sistema da BTCS Piloto. Para a realização do teste de estanqueidade foi retirado do conjunto tanto o bocal como o suporte do bocal, sendo montado no respectivo lugar do bocal um flange de alumínio, de forma que todo o sistema permanecesse pressurizado. Por questões de segurança uma vez que todo o sistema foi pressurizado, foi instalada uma válvula de alívio no centro de medições, de forma que fosse possível o alívio de pressão de forma segura, após a realização dos ensaios. Na Figura 3 é apresentado a montagem da BTCS preparada para o teste de estanqueidade, onde é possível ver o flange de alumínio conectado na saída da BTCS e a válvula de alívio de pressão instalada no centro de medições.



Figura 3. Montagem da BTCS piloto para a realização do teste de estanqueidade.

Durante a realização do teste de estanqueidade foram detectados pontos de vazamento de gás nas áreas de fixação do conjunto, como entre a placa de injeção e a câmara de combustão, a câmara de combustão e o centro de medição e o centro de medição e o flange. Como forma de solucionar os vazamentos de gás encontrado, optou-se pela vedação do sistema por meio da utilização de papelão hidráulico (junta mecânica) S1212 da fabricante Teadit® que tem como característica trabalhos com pressão de até 14000 kPa (140 bar) e temperaturas de até 540 °C (YUMPU, 2017).

Com a confecção das vedações o conjunto foi novamente montado para a realização de um novo teste de estanqueidade, sendo verificado se as vedações selecionadas se adequavam ao sistema da BTCS. Sendo o sistema pressurizado novamente e após a sua estabilização foi possível identificar a ausência de vazamento no conjunto, tendo que tanto o manômetro da entrada da câmara de combustão quanto o manômetro do centro de medições permaneceram com a mesma pressão liberada pelo cilindro. Na Figura 4 é possível visualizar o momento e que o sistema se encontrava completamente estabilizado onde foram registrados tanto a pressão de entrada da câmara de combustão, quanto a pressão no centro de medições, sendo o registro das mesmas de 1500 kPa (15 bar).

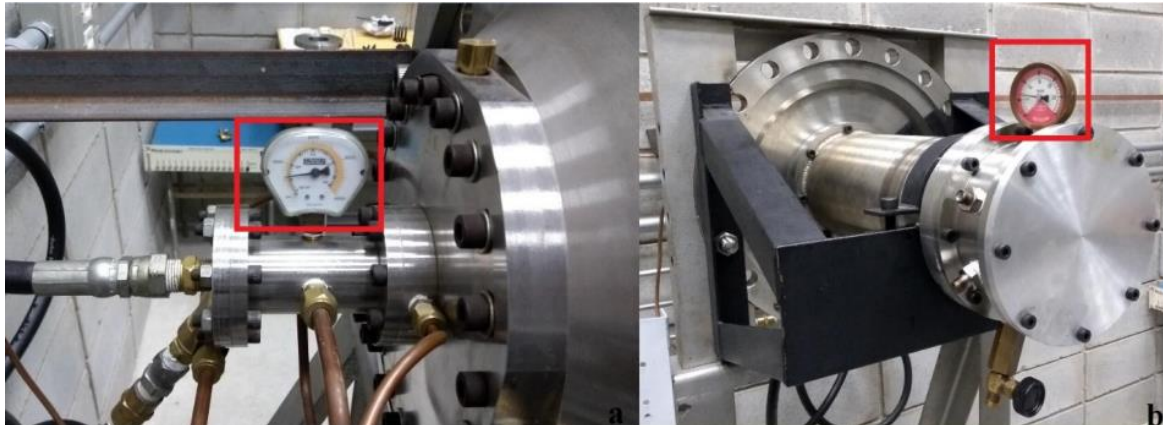


Figura 4. Registro da pressão na entrada da câmara de combustão (a), no centro de medições (b) durante o teste de estanqueidade.

Sendo sanado todos os vazamentos de gases existente no conjunto da BTCS piloto, deu-se início ao desenvolvimento de um bocal que fornecesse as condições necessárias para um escoamento completamente desenvolvido para o sistema de gases da BTCS.

2.2 Método semiempírico para determinação do bocal

Tendo em vista que não era possível medir com exatidão a vazão do escoamento nas linhas de alimentação de gases da bancada, o método elaborado consistiu em encontrar o maior diâmetro de garganta possível para uma pressão de estagnação de 2000 kPa (20 bar) de forma experimental. Para isso foram necessárias a confecção de um flange com um furo central que serviu de suporte para um simulador de bocal, onde nele foram realizados furos escalonados de 0,5 mm, partindo de 1,0 mm e medindo-se a pressão de estagnação para cada furo realizado. Quando a pressão de estagnação medida atingisse um mínimo em torno de 2.000 kPa (20 bar), o furo correspondente a esta pressão seria o diâmetro máximo possível que a garganta do bocal deveria possuir.

Na Figura 5(a) é apresentado o flange adaptador confeccionado em aço inox que foi utilizado para fixação do simulador do bocal, já na Figura 5(b) é apresentado o simulador do bocal confeccionado em alumínio, onde foram realizados os furos escalonados.



Figura 5. Flange adaptadora do simulador do bocal (a), simulador do bocal (b).

Na Figura 6 é apresentada a montagem da BTCS piloto utilizada para a determinação experimental do novo bocal. Ao atingir a furação de 7,0 mm de diâmetro no simulador do bocal,

observou-se que o parâmetro desejado de pressão de estagnação de 2000 kPa (20 bar), utilizando a capacidade máxima do sistema de alimentação da BTCS Piloto foi alcançado. Com isso determinou-se que o diâmetro da garganta do novo bocal deveria ser de 7 mm, dando-se início ao projeto e fabricação do novo bocal para a flange adaptativa.

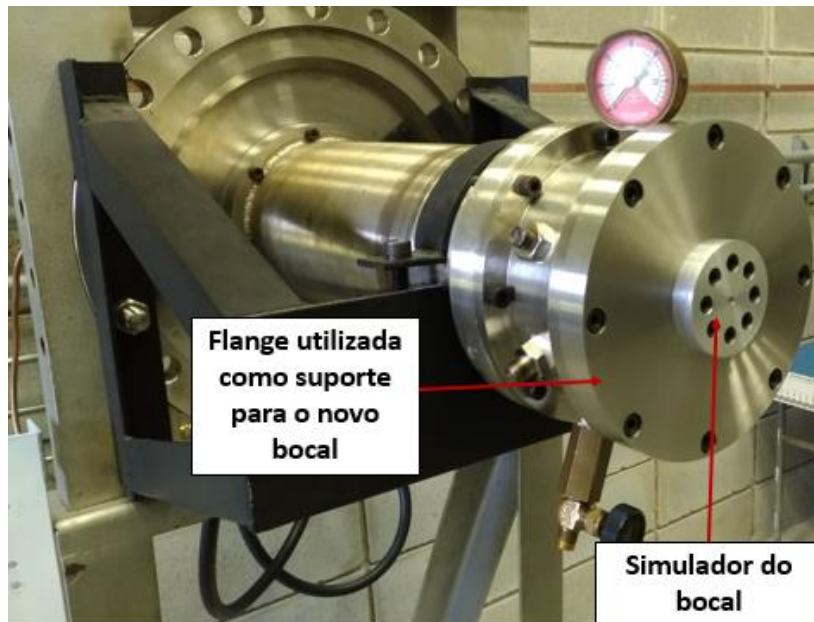


Figura 6. Configuração da BTCS piloto utilizada para a determinação do novo bocal.

2.3 Projeto e confecção do novo bocal

Tendo sido estipulado o diâmetro máximo da garganta do novo bocal para as condições desejadas, foi utilizado a equação de relações de área (Equação 1) apresentada por Anderson (2001) que leva em consideração as razões de área, sendo elas a área da garganta do bocal (A^*) e a área da saída do bocal (A).

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

Tendo que o número de Mach (M) é uma condição desejada e que a razão entre os calores específicos (γ) é igual a 1,4 uma vez que o escoamento pode ser considerado caloricamente perfeito temos que para um bocal com uma garganta 7 mm de diâmetro e uma razão de áreas de 2,896, temos que o diâmetro da saída do bocal deve ser igual a 11,9 mm. Definindo-se o diâmetro de saída e garganta, para o caso desejado, foi confeccionado um bocal em alumínio (Figura 7), sendo este instalado na flange adaptadora no lugar do simulador do bocal. Com a nova montagem deu-se início a caracterização do escoamento na saída da BTCS piloto de forma a se identificar a velocidade de saída do mesmo.



Figura 7. Novo bocal confeccionado em alumínio para ensaio de caracterização do escoamento na saída da BTCS piloto.

2.4 Caracterização do escoamento

Para a caracterização do escoamento foi utilizado a técnica Schlieren, sendo esta uma técnica óptica não intrusiva que permite a visualização de escoamentos complexos (SETTLES, 2006) ao se fazer uso de uma câmera junto com um arranjo específico de equipamentos ópticos, para permitir a visualização da área desejada, podendo registrar imagens com diferentes contrastes dependendo da quantidade de luz que a câmera recebe, e da visualização da variação da densidade do ar, que se torna possível através dessa técnica. A configuração utilizada para os experimentos, foi a configuração em “Z” exemplificada pela Figura 8. Esta configuração é largamente utilizada devido ao fato de reduzir bem os efeitos indesejáveis que podem ser vistos durante o uso desta técnica Schlieren (SETTLES, 2006).

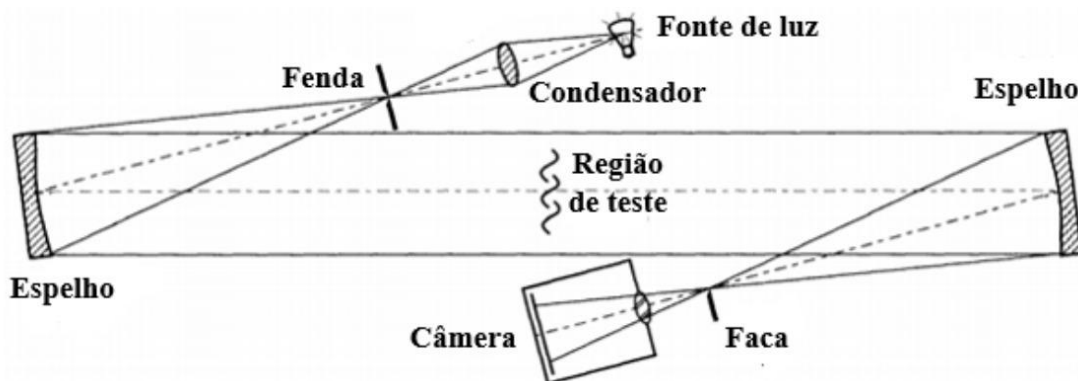


Figura 8. Exemplificação da técnica Schlieren na configuração em “Z”, utilizada para a visualização do escoamento gerado na saída da BTCS piloto (SETTLES, 2006).

Por meio da técnica Schlieren foi possível medir o ângulo da onda de choque formada sobre um modelo, que no caso apresentado foi escolhido uma rampa (cunha) com um ângulo conhecido. Sendo assim identificando o ângulo da onda choque (β) formado sobre a rampa e sabendo o ângulo da rampa (θ), foi possível calcular o número de Mach na saída do bocal da BTCS por meio da equação θ - β - M (Equação 2).

$$\tan\theta = 2\cot\beta \left[\frac{M_1^2 \sin^2\beta - 1}{M_1^2(\gamma + \cos 2\beta) + 2} \right] \quad (2)$$

Na Figura 9 é apresentado um exemplo da análise do escoamento na saída do bocal por meio da técnica Schlieren que foi utilizado neste trabalho sendo está já aplicada em estudos anteriores na BTCS piloto, onde é possível identificar a direção do escoamento e a onda de choque sendo formada sobre a rampa de teste.

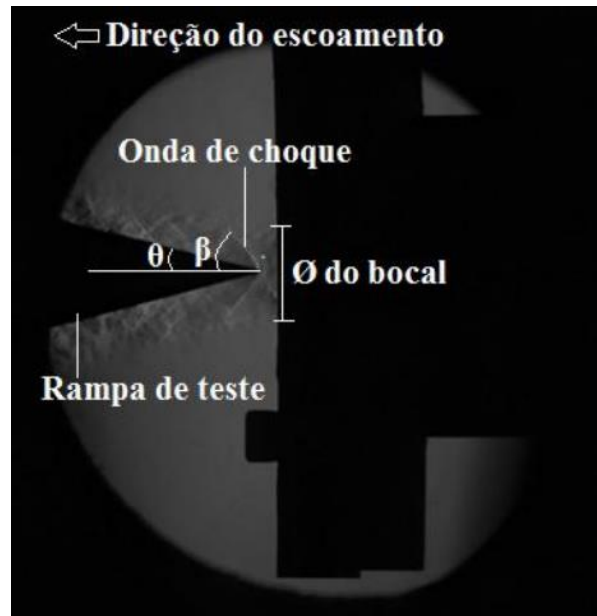


Figura 9. Exemplo da análise do número de Mach por meio da técnica schlieren (GUIMARÃES *et al*, 2018)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a montagem do novo bocal na BTCS piloto, e com a aplicação da técnica Schlieren foi possível observar um escoamento completamente desenvolvido na saída do bocal, demonstrando assim a eficiência do bocal projetado. Entretanto mesmo com o escoamento completamente desenvolvido, não foi possível determinar o número de Mach com a rampa de teste utilizada, tendo que o diâmetro da saída do novo bocal é de apenas 11,9 milímetros sendo este um valor muito inferior a espessura da rampa utilizada tendo que o diâmetro da saída do bocal anterior era de 34,04 mm, essa diferença gerou uma perturbação na ponta da rampa de teste impedindo a identificação do final da onda de choque, isso pode ser observado na Figura 10 onde é apresentado uma sequência de imagens schlieren obtidas com o novo bocal e com a rampa de teste de $\theta = 15^\circ$ que já vinha sendo empregado nos ensaios anteriores.

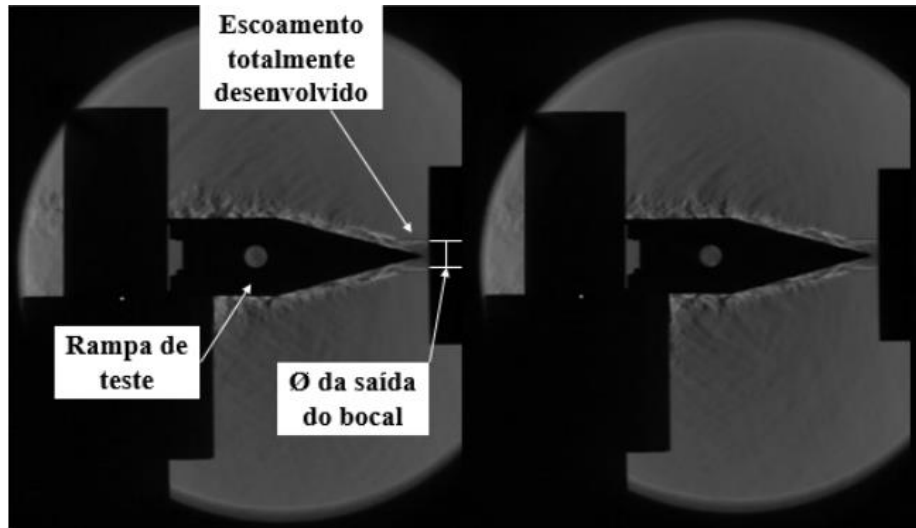


Figura 10. Imagens obtidas através da técnica Schlieren (rampa de $\theta = 15^\circ$).

Dessa forma, foi necessário produzir uma rampa de testes com uma espessura menor, que se adequasse melhor com o novo bocal. Assim foi fabricada uma nova rampa com espessura de 10,00 mm, tendo dois ângulos diferentes na parte superior e inferior respectivamente (ângulo superior $\theta_s = 10^\circ$ e o ângulo inferior $\theta_i = 5^\circ$), que foi denominada de rampa mista. Os ensaios se repetiram agora utilizando a rampa mista sendo possível a visualização e a medição da onda de choque formada sobre o modelo. Os ensaios com a rampa mista são apresentados na Figura 11, onde é possível identificar um escoamento completamente desenvolvido, e a formação da onda de choque sobre a rampa mista.

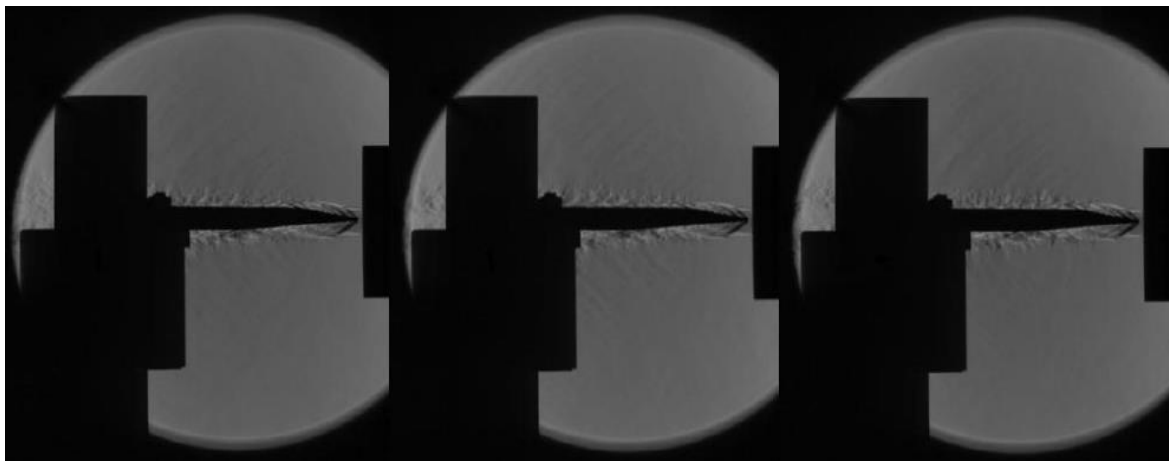


Figura 11. Imagens obtidas através da técnica schlieren (rampa mista).

Com a confecção da nova rampa de testes (rampa mista) foi possível identificar e validar o número de Mach na saída do bocal aplicando-se a Equação 2. Essa metodologia se mostrou importante, uma vez que para um único experimento foram analisados dois ângulos de choque.

Os resultados das análises do número de Mach encontrados na saída do bocal para o escoamento incidindo sobre a rampa mista são apresentados nas Tabelas 1 e 2. O número de Mach considerado, foi a média de dez experimentos realizados, sendo analisado os ângulos da onda de

choque (β) para cada um dos lados da rampa de teste mista: ângulo $\theta = 5^\circ$ (Tabela 1) e $\theta = 10^\circ$ (Tabela 2), obtidos através do conjunto de imagens obtidas pela técnica Schlieren. Para os dois casos, foi verificado que mesmo sendo fabricado um bocal para número de Mach igual a 2,6, este valor de velocidade é encontrado nas bordas do bocal (diâmetro maior = 11,9 mm) sendo que no centro do bocal, onde a rampa estava posicionada, o valor do número de Mach encontrado foi igual a 1,9/1,8, conforme encontrado neste trabalho.

Tabela 1. Número de Mach encontrado através do ângulo $\theta = 5^\circ$

Imagem	Ângulo β (radianos)	Número de Mach
1	0,68573	1,76549
2	0,69474	1,74531
3	0,61630	1,94597
4	0,66964	1,80333
5	0,69045	1,75484
6	0,7474	1,79102
7	0,69474	1,74531
8	0,63108	1,90345
9	0,63108	1,90345
10	0,68573	1,76549
Média		1,81235

Tabela 2. Número de Mach encontrado através do ângulo $\theta = 10^\circ$

Imagem	Ângulo β (radianos)	Número de Mach
1	0,68892	1,99217
2	0,78540	1,76742
3	0,78540	1,76742
4	0,68232	2,01099
5	0,78540	1,76742
6	0,75093	1,83809
7	0,78540	1,76742
8	0,74838	1,84371
9	0,74542	1,85030
10	0,82885	1,69077
Média		1,82957

4. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi fazer com que BTCS Piloto do IEAv fosse capaz de produzir um escoamento totalmente desenvolvido, com as condições de número de Mach conhecida, para assim dar início a novos tipos de ensaios e a novas pesquisas, que contribuirão para o desenvolvimento do projeto PROHIPER, e também para aprimorar a própria BTCS, com o intuito de melhorar os ensaios que possam nela serem realizados futuramente.

O método utilizado para a obtenção do diâmetro de garganta mantendo a pressão de estagnação de 2000 kPa (20 bar), mostrou-se válido e eficiente, podendo ser aplicado novamente caso seja implementado um novo sistema de alimentação, entretanto como o diâmetro da garganta encontrado para o novo bocal foi de apenas 7 mm, o diâmetro da seção de saída do mesmo obteve um tamanho de 11,9 mm, sendo assim a seção de testes ficou muito reduzida. Assim, como continuação dos trabalhos de melhoria da BTCS Piloto, serão consideradas algumas alternativas para o aumento dos diâmetros das tubulações de alimentação de gases da bancada para com isto, aumentando vazão, ser possível aumentar a pressão de estagnação da mesma para ser possível utilizar um bocal com um diâmetro de garganta maior e conseqüentemente com uma seção de teste maior.

Através dos números de Mach encontrados para os dois ângulos da rampa mista, é possível identificar que a metodologia utilizada para a obtenção do valor do número de Mach do escoamento na saída do bocal apresentou um ótimo resultado, podendo ainda ser aprimorado no futuro.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Estudos Avançados – IEAv pelo apoio financeiro mediante as bolsas de estudos concedidas. A Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica (EAH) e a Divisão de Suporte Tecnológico (SUTEC) pelo apoio na confecção e ajustagem da BTCS piloto. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. REFERÊNCIAS

ANDERSON, J.D., Jr. **Fundamentals of Dynamics**, Boston: McGraw-Hill, 2001.

BRANDÃO, K.M.B. **Montagem e caracterização de uma bancada para testes de combustores supersônicos**. 2017. 135 f. Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CURRAN, E. T. **Scramjet engines: the first forty years**. Journal of Propulsion and Power, v. 27, n. 6, p. 1138-1148, Nov.-Dec. 2001.

GUIMARÃES, J.S. **Investigação do Escoamento a Frio em uma Bancada de Testes de Combustores Supersônicos**. 2018. 129f. Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

GUIMARÃES, J.S.; BRANDÃO, K.M.B.; MARCOS, T.V.C.; LEITE, V.S.F.O.; CARINHANA JR, D. Diagnóstico do escoamento a frio de uma Bancada de Testes de Combustores Supersônicos, In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - 20 a 24 de maio de 2018**, Salvador, 2018. 10f.

LEITE, V.S.F.O. **Caracterização do Escoamento de uma Bancada de Testes de Combustores Supersônicos Alimentada por Ar Viciado**. 2006. 203f. Tese de doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

MINISTÉRIO DA DEFESA/MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Concepção Estratégica – Ciência, Tecnologia e Inovação de Interesse da Defesa Nacional**. Brasília, 2003.



SETTLES, G. S.; **Schlieren and Shadowgraph Techniques**, Berlin: Springer, 2006.

SITE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. 14-X: Avião hipersônico brasileiro avança rumo ao primeiro voo. 24/01/2019. Online. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=14-x-aviao-hipersonico-brasileiro&id=010170190124#Imprimir>>. Acessado em 30/07/2019.

YUMPU. Vedação e isolamento: papelão hidráulico com amianto. 2017. Disponível em <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/5119966/adesivo-p-pvc-rigido-adesivo-decontato-a-base-de-vinil-adesivo-1/55>> Acesso em 05 de agosto de 2019.