

FILME DIDÁTICO PARA VISUALIZAÇÃO E ESTUDO DE ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL EM BOCAIS DE LAVAL**Márcio Staschower**

marcio.staschower@poli.usp.br

Marcelo Mendes Vieira

mmendes@usp.br

José R. Simões-Moreira

jrsimoes@usp.br

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica
SISEA – Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
Caixa Postal 61548, CEP: 05424-270, São Paulo - SP, Brasil

Resumo. O objetivo deste trabalho é apresentar um filme digital para servir como recurso didático no estudo do escoamento de gases compressíveis em bocais. A visualização do escoamento foi realizada empregando uma bancada existente no laboratório dotada com o sistema “schlieren”. Um bocal bidimensional do tipo convergente-divergente ou de Laval foi empregado. Os testes foram realizados com pressão de reservatório em uma faixa até 1000 kPa, o que permitiu a visualização de ondas de choque normais (dentro do bocal) e oblíquas (fora do bocal). Utilizou-se nitrogênio como gás de trabalho. As imagens obtidas foram registradas por uma câmara CCD e posteriormente digitalizadas e armazenadas em um computador. Técnicas de processamento de imagens foram utilizadas para realçar os fenômenos de ondas de choque e de expansão, campo de gradientes de pressão entre outros, e com isso quantificar e correlacionar com os parâmetros de ensaio. Complementarmente adotou-se o modelo teórico de escoamento unidimensional e isoentrópico como referência analítica para a edição de um vídeo didático apresentando as situações experimentais demonstradas.

Palavras chave: Escoamento compressível, Schlieren, Ondas de choque, Bocal.

1. Introdução

Escoamento compressível em bocais é um assunto sempre presente em nosso dia a dia, seja em uma válvula de expansão de uma geladeira ou como mostrado na Fig. (1), um escoamento com presença de ondas de choque em um simples conector de válvula de gás.

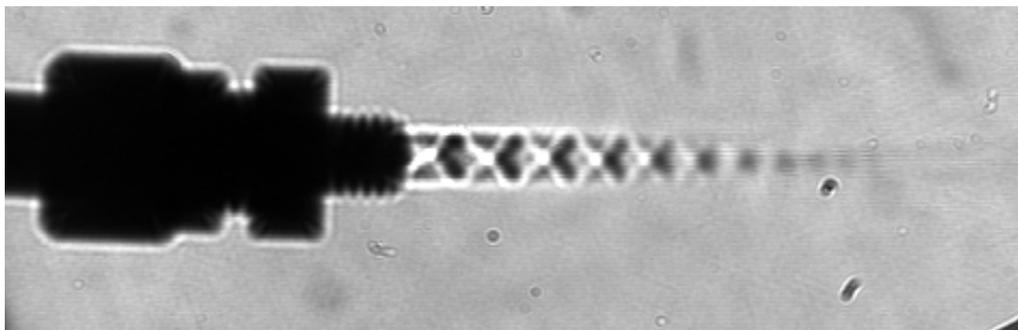


Figura 1. Escoamento supersônico com ondas de choque em um conector de válvula.

No escoamento compressível as variações de densidade (ou volume específico) são significativas e não podem ser assumidas constantes, como ocorre com o escoamento incompressível. Nos escoamentos compressíveis subsônicos ($Mach < 1$ ou $M < 1$), o escoamento é “avisado” do obstáculo à frente e as linhas de corrente se auto-ajustam para que o escoamento contorne o obstáculo de forma suave. No caso supersônico ($M > 1$) as ondas acústicas (sônicas) não conseguem “avisar” o escoamento supersônico da presença de um obstáculo. Assim, a natureza cria uma onda de descontinuidade (choque) e o escoamento torna-se subsônico à jusante e, as linhas de corrente pós onda de choque podem se ajustar ao contorno do obstáculo.

A condição supersônica não pode ser atingida dentro de um bocal convergente simples, sendo então necessário que uma seção divergente seja adicionada à seção convergente para acelerar o fluido até números de *Mach* acima da unidade. Esse arranjo do bocal convergente-divergente também é conhecido como bocal de Laval.

Quatro regimes de escoamento são possíveis em um bocal convergente-divergente. Na Fig. (2) vemos um gráfico ilustrativo destes regimes, eles são caracterizados pela variação da razão da pressão local na seção de interesse, P , pela pressão de estagnação, ou de reservatório, P_0 , em função da posição do eixo axial do bocal. A pressão do ambiente em que o bocal esta descarregando é chamada de contrapressão e ela também desempenha um papel importante, como se verá.

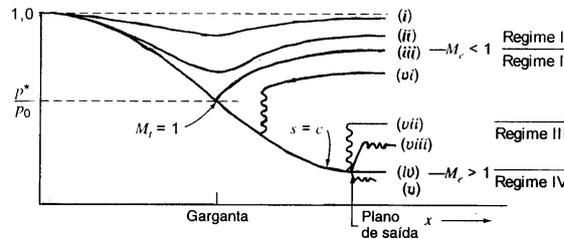


Figura 2. Distribuição de pressão para o escoamento em um bocal convergente divergente para diferentes contrapressões.

No regime I o escoamento é totalmente subsônico, a vazão em massa aumenta com o decréscimo da contrapressão, como o caso comumente conhecido do escoamento incompressível e estão indicados pelas curvas *i* e *ii* da Fig. (2). A condição *iii* é o limiar entre os regimes I e II, em que o escoamento na garganta é sônico, isto é, $M = 1$.

À medida que a contrapressão é reduzida abaixo da condição *iii*, um choque normal aparece à jusante da garganta e interior ao bocal. Como o escoamento é subsônico após o choque, ocorre uma imediata desaceleração do fluido que é acompanhada de um aumento de pressão através do duto divergente do bocal como ilustrado pela condição *vi* da Fig. (2).

Quando a contrapressão é reduzida ainda mais, o choque move-se mais à jusante da garganta até se estabelecer no plano de saída do bocal (condição *vii*). No regime II, assim como no I, o escoamento de saída é subsônico. No regime II como nos subseqüentes, verifica-se que na garganta do bocal o escoamento atinge a condição sônica, sendo que as propriedades nesta seção permanecem constantes e portanto a vazão em massa não varia. Mais precisamente, a partir do regime II, o bocal assume a condição de bloqueado, tendo a vazão atingido seu valor máximo.

No regime III, conforme exemplificado pela condição *viii*, a contrapressão é mais alta que a pressão de saída, mas não o suficiente para manter um choque normal no plano de saída. O escoamento ajusta-se para a contrapressão através de uma série de choques de compressão oblíquos fora do bocal, como o caso ilustrado na Fig. (1).

Baixando a contrapressão para abaixo da condição *iv*, ou seja, como o caso da curva *v*, ocorre um efeito interessante. O escoamento é inteiramente isoentrópico dentro do bocal até o plano de saída, a partir do plano de saída um leque de expansão ocorre (Prandt-Meyer) para o valor da contrapressão. Um bocal operando nestas condições é dito estar subexpandido, uma vez que a expansão adicional até o valor da contrapressão ocorre fora dele.

Ainda na Fig. (2), vemos uma condição interessante (*iv*) em que não se formam ondas de choque, esta é a chamada condição de projeto do bocal, em que o bocal opera isoentropicamente.

O objetivo deste trabalho é obter imagens de um bocal operando nos quatro regimes acima apresentados, e com estas elaborar um filme didático sobre o assunto. Nas seções que seguem explica-se o método de obtenção de imagens tanto quanto todo o aparato experimental. Os resultados são apresentados na Seção 4 juntamente com uma seção comparativa com dados teóricos calculados. Importante ressaltar que todas figuras aqui apresentadas são fragmentos do filme didático.

2. Bancada Experimental

2.1 Método “Schlieren”

As ondas de choque apresentam um elevado gradiente de densidade na direção do escoamento. Segundo Liepmann e Roshko (1957) o índice de refração do meio varia com a densidade de acordo com a Eq. (1)

$$n = 1 + \beta \frac{\rho}{\rho_s}, \tag{1}$$

onde ρ_s é uma densidade de referência do gás para a determinação experimental do coeficiente β ; ρ é a densidade do gás. Por esta razão foi adotado o método “Schlieren” para a bancada de visualização.

O sistema óptico “Schlieren” para visualização do escoamento do jato de ar consiste basicamente de um feixe luminoso paralelo que atravessa a região do evento e depois é focalizado por um espelho parabólico sobre o filtro espacial (também chamado de fenda ou “pin-hole”) conforme ilustrado na Fig. (3).

Se um raio de luz sofrer um desvio devido às variações de densidade do meio do evento, este será refletido pelo segundo filtro espacial e, portanto, não será projetado sobre a câmara fotográfica. Essa região de luz refletida aparece como uma região escura na imagem. É possível ver que o feixe da fonte luminosa é concentrado ao passar pela lente convergente, coincidindo o foco do feixe com a posição do filtro espacial. Isto faz com que a fonte luminosa tome um caráter pontual, sendo que o diâmetro do filtro espacial é de 0,28mm. Assim como na lente, a posição do filtro espacial coincide com a distância focal do espelho parabólico, fazendo com que o feixe expandido pelo filtro espacial percorra a seção do evento de forma paralela.

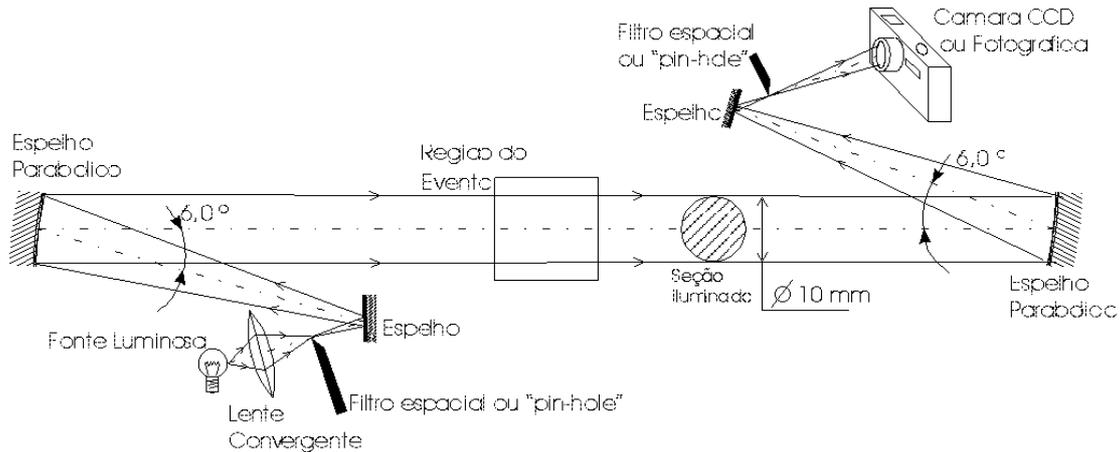


Figura 3. Esquema da geometria do sistema “Schlieren” (Vieira e outros, 2000).

2.2 Bocal Bidimensional

Um bocal bidimensional convergente-divergente foi projetado e construído para obtenção do escoamento supersônico de maneira que fosse possível observar os fenômenos compressíveis que acontece em seu interior. O perfil lateral foi usinado em duas chapas de latão de 3,175 mm de espessura, sendo que quando colocadas frente a frente formam a geometria desejada do bocal como se vê em detalhe na Fig. (4a).

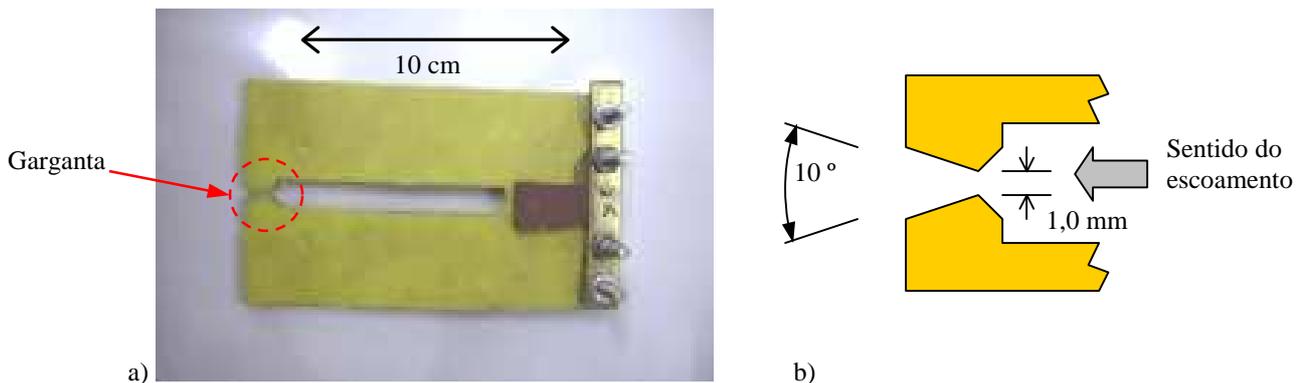


Figura 4. a) Fotografia do bocal bidimensional construído; b) Esquema do bocal.

O esquema que se vê na Fig. (4b) enfatiza a região da garganta do bocal. O ângulo de divergência da garganta é de 10° para evitar o descolamento de escoamento, já o ângulo de entrada é mais abrupto (30°). A distância entre as placas na região da garganta também é calculada para que a abertura na garganta seja da ordem de 1 mm, considerado suficiente para que ao mesmo tempo permita a visualização do escoamento e se tenha uma baixa vazão mássica de gás. O sentido do escoamento é da direita para esquerda da figura.

Duas placas de vidro formam um “sanduíche” das chapas de latão, que além de garantirem a vedação no interior do bocal, possibilitam a visualização interna e a passagem dos raios de luz colimados para o registro em forma de filme dos fenômenos compressíveis internos. A Fig. (5) mostra o bocal montado com o dispositivo de entrada do gás já instalado e todo conjunto protegido por um suporte de alumínio.

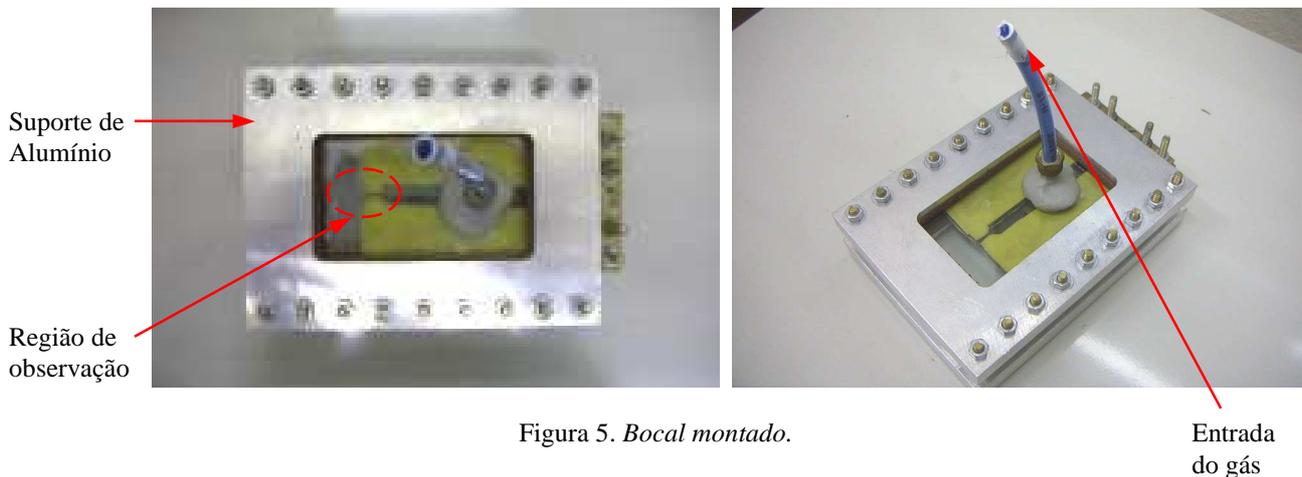


Figura 5. *Bocal montado.*

3. Procedimento Experimental

Para se iniciar o ensaio o primeiro passo é executar o programa de captura de imagens, VCR (feito pela empresa AMS). O “software” juntamente com o “hardware” têm capacidade de adquirir 360 quadros por segundo; suficiente para a elaboração de vídeos como o nosso caso. A câmara usada para esta captura é de alta velocidade, do tipo CCD modelo CV-M30 da marca Coastar.

Com o programa em execução ajusta-se a intensidade da luz do “Schlieren” para se obter um bom contraste na hora de se capturar a imagem. O passo seguinte é ajustar a projeção do bocal na tela do computador de maneira mais conveniente, dependendo de que tipo imagem se deseja obter.

Com estes passos executados, abre-se a válvula de alimentação do gás nitrogênio e ajusta-se a pressão de entrada, a qual é medida por um manômetro e controlada por uma válvula reguladora de pressão, até se obter a razão de pressões desejada. Para se gravar a seqüência de imagens basta acionar a aquisição de imagens através do programa. Concluída a captura, interrompe-se o escoamento de gás e inicia-se a fase de análise e manipulação das imagens obtidas.

Esta manipulação, mais conhecida como tratamento de imagem, nada mais é que submeter a imagem a filtros matemáticos que atenuam os ruídos indesejados e acentuam a nitidez dos fenômenos que interessam. Os filtro matemáticos e os procedimentos adotados encontram-se em Vieira e outros (2000).

4. Resultados

Não esquecendo o objetivo didático deste experimento procurou-se a forma mais conveniente de se apresentar os resultados para que a compreensão do assunto fosse a melhor possível, tanto aqui quanto no filme. As imagens são apresentadas duas a duas; a primeira é a imagem coletada com o sistema “schlieren”, a segunda é análoga, mas tratada de modo que o escoamento e as ondas de choque fiquem mais bem definidas. Por fim, com os dados numéricos são apresentados no gráfico de variação de pressão mostrando em que regime o escoamento se encontra.

4.1 Dados de Operação do Bocal:

Pelo projetor de perfil mediu-se as áreas da garganta e do plano de saída do bocal que são respectivamente 4 mm² e 6,42 mm², resultando em uma razão entre áreas de $A/A^* = 1,6$.

Pela hipótese de escoamento isoentrópico, unidimensional e gás ideal, calculou-se os valores do número de Mach e as razões entre pressões para $\gamma = 1,4$ que são apresentados na Tab (1):

Tabela 1. *Dados da tabela de escoamento compressível para $A/A^* = 1,6$, $\gamma = 1,4$ (nitrogênio).*

Número de Mach (M)	Razão entre pressões (P/P_0)
0,397	0,8971
1,935	0,1413

Estes dois valores são respectivamente os limites dos regimes I-II e III-IV, faltando encontrar apenas mais uma razão entre pressões para completarmos a tabela.

Para encontrar a pressão limite entre os regimes II e III, empregam-se as equações de choque normal para gás perfeito e o valor encontrado é $P_{II-III}/P_0 = 0,5937$. Com estes valores podemos delimitar os quatro regimes de operação do bocal como se vê na Tab (2).

Tabela 2. Razão da pressão de saída com a de estagnação para os quatro regimes de operação do bocal.

Regime	Razão entre pressões (P_v/P_0)
I	$P_v/P_0 > 0,8971$
II	$0,5937 < P_{II}/P_0 < 0,8971$
III	$0,1413 < P_{III}/P_0 < 0,5937$
IV	$P_{IV}/P_0 < 0,1413$

4.2. Imagens

Para os ensaios aqui demonstrados a pressão ambiente medida foi de 695 mmHg (São Paulo). O primeiro conjunto de imagens (Fig. 6) vê-se o bocal trabalhando na condição de projeto; não vemos ondas de choque se formando apesar de o escoamento estar acima da velocidade do som na saída do bocal. A razão entre pressão de saída e de estagnação é de 0,1160.

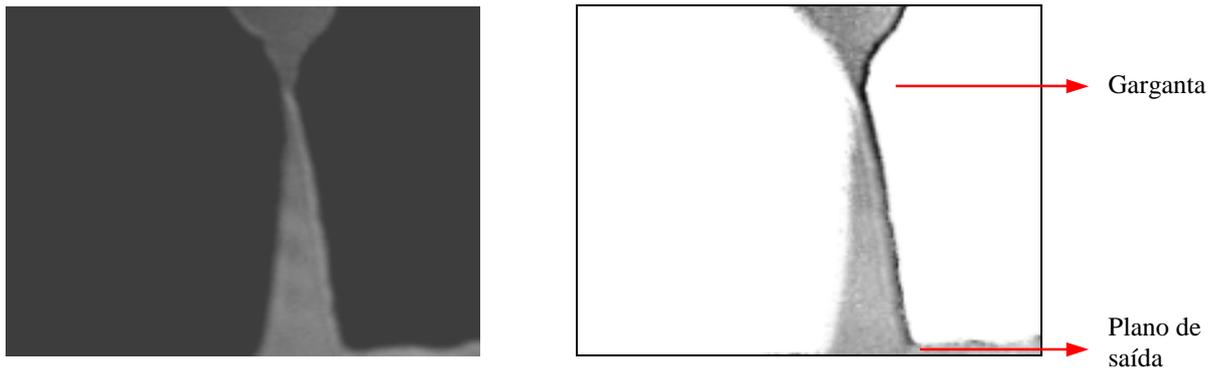


Figura 6. Escoamento na condição de projeto. À esquerda se encontra a imagem original e a da direita condiz a anterior filtrada matematicamente.

Na Fig. (7) vemos o bocal trabalhando no regime II, ou seja, ocorrem choques normais no plano de saída do bocal para ele se ajustar a pressão ambiente. O choque é o nó mais escuro que se observa na fotografia original desta figura à esquerda. Na imagem tratada, à direita, observa-se a seção do choque com a coloração avermelhada. Neste caso a razão entre pressões é 0,6243.

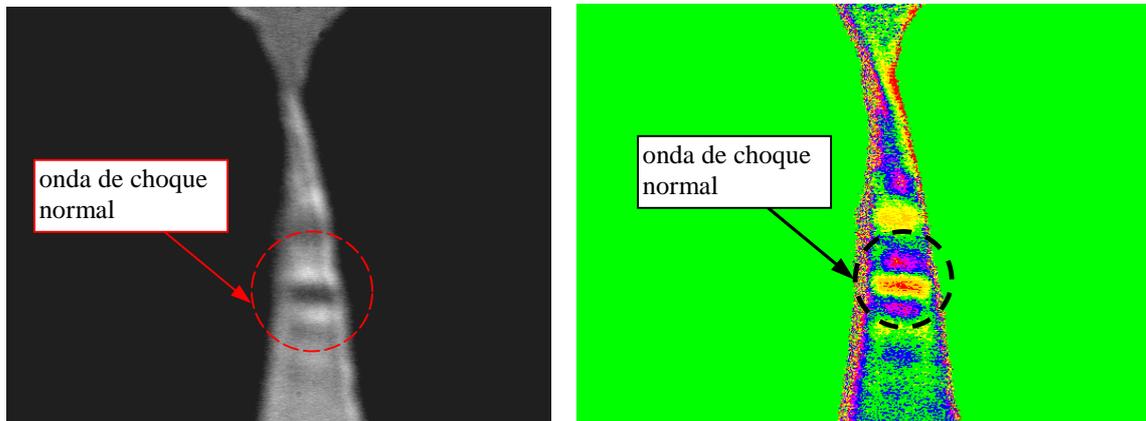


Figura 7. Ondas de choque normal.

A Fig. (8) retrata o bocal trabalhando no regime III. Vemos a formação de ondas de choque oblíquas bem destacada. Na literatura inglesa, este fenômeno também é conhecido como “diamond shape cells”. O formato das ondas de choque já se diferencia bem das acima já apresentadas. A razão de pressões para este ensaio foi 0,4320.

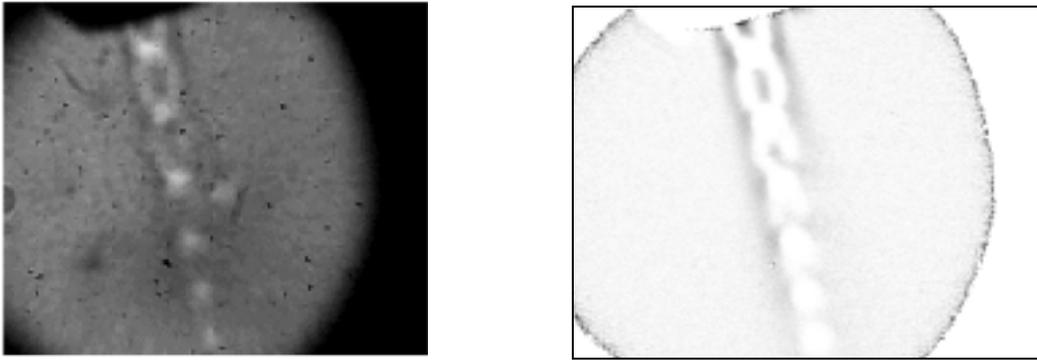


Figura 8. Ondas de choque oblíquas.

Por fim o último regime de operação, IV, representado pela Fig. (9). O que vemos na figura são as ondas de expansão, neste caso o bocal está operando de forma subexpandida.

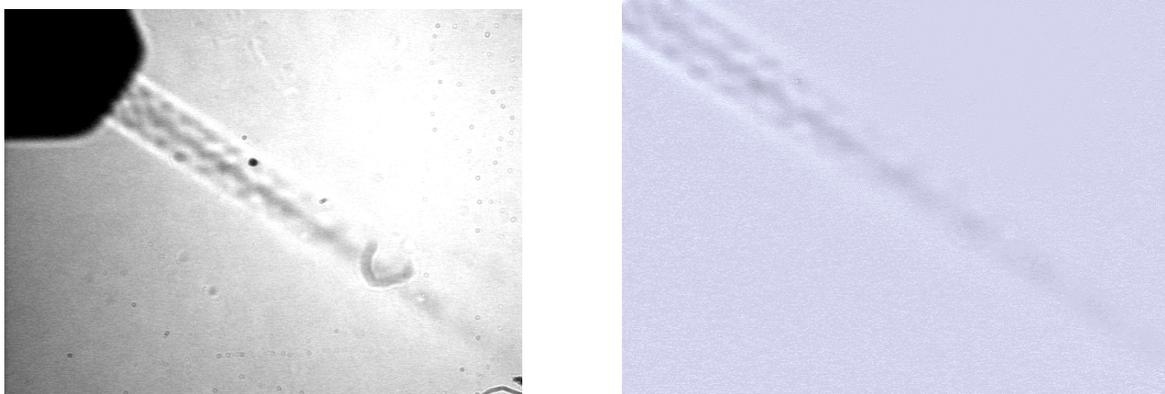


Figura 9. Escoamento subexpandido, ondas de expansão podem ser vistas.

4.3. Comparações Ilustrativas

A parte interessante do projeto é poder comparar os dados experimentais com os teóricos; este é o propósito da Fig. (10) que ilustra os quatro regimes de operação do bocal estudado.

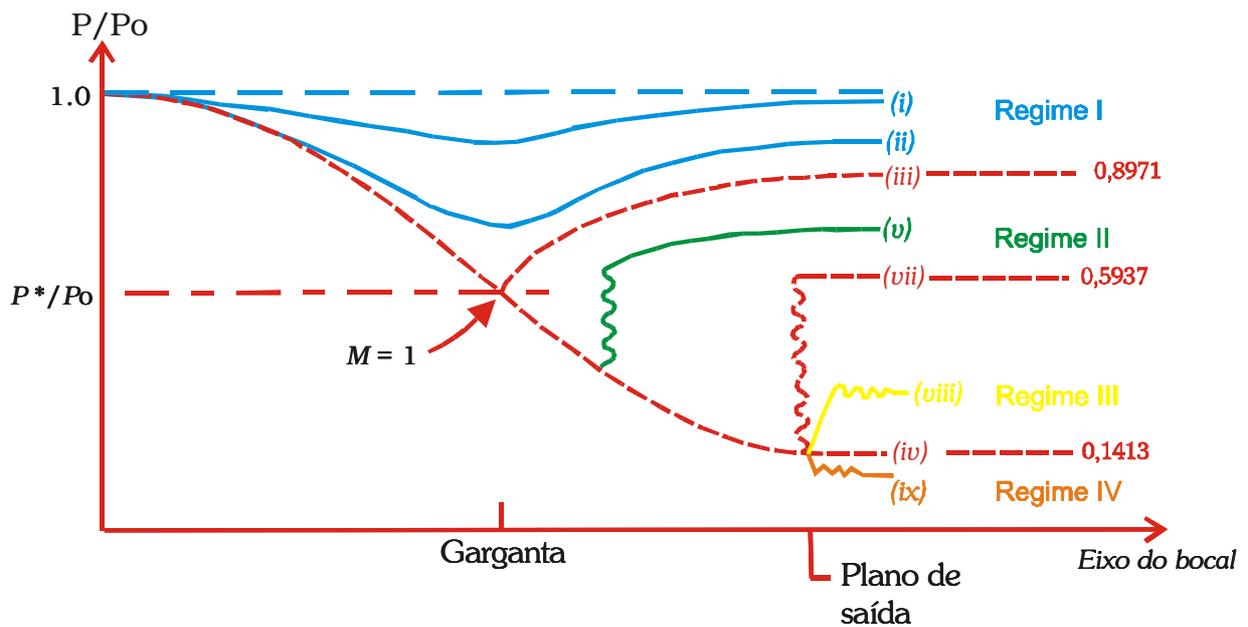


Figura 10. Gráfico de operação do bocal estudado.

Percebe-se que as imagens se ajustam adequadamente aos regimes em que elas se encontram validando a metodologia utilizada. As condições de projeto calculadas e as medidas coincidem se levarmos em conta o erro do manômetro o que valida as medidas e a geometria do bocal. Portanto, se verifica que a Fig. (6) corresponde à condição de projeto, ou seja, alcançando um escoamento supersônico, sem a formação de ondas de choque, dando oportunidade para que o bocal opere em uma condição de minimização de ruídos devido a ausência das ondas de choque. Se o bocal tiver de operar em uma condição supersônica, este ponto pode ser o regime desejado. Na Fig. (10), este regime é representado pelo limite dos regimes III e IV. A Fig. (7) que corresponde a um ensaio com razão de pressões de 0,6243, se observa a formação de uma onda de choque, interna ao bocal e normal ao escoamento, conferindo quantitativa e qualitativamente ao regime II da Fig. (10). As Figs. (8) e (9) se enquadram, respectivamente, aos regimes III e IV, onde existem ondas de expansão e de choque oblíquas. Além da confirmação quantitativa que as imagens se encontram dentro de tais regimes, compara-se a configuração do jato ao encontrado na literatura que aborda este assunto, por exemplo, Liepmann e Roshko, (1957).

5. Conclusões e Continuidade

Adotou-se o método “Schlieren” devido a sua simplicidade na construção, além disso, pelo fato do método destacar muito bem a variação do gradiente de densidade, fenômeno que ocorre de forma bastante acentuada em escoamento de gases compressíveis, quando existe a formação de ondas de choque e de expansão. O método também é capaz de observar ao longo do escoamento esta variação de densidade devido a expansão ou compressão sem grande acentuação na mudança de tonalidade na imagem. Também se verificou que foi possível reproduzir os quatro tipos de regimes acima citados, como o primeiro caso, ilustrado na Fig. (6), onde existe um escoamento supersônico sem formação de onda de choque. A seguir, na Fig. (7), já se observa a formação de onda de choque interna ao bocal, diferentemente da Fig. (8) onde tal fenômeno ocorre externamente ao bocal, de forma oblíqua e repetida ao longo do jato. Já na Fig. (9), um caso de jato subexpandido, que apesar da semelhança da configuração do jato com a condição anterior, trata-se de um fenômeno diferente devido à formação de ondas de expansão que proporcionam ainda uma diminuição da pressão local do escoamento, conforme é visto em detalhe na condição ν da Fig. (2), ou simplesmente, regime IV da Fig. (10).

Sendo assim, a Fig. (10) ilustra completamente os modos de operação do bocal estudado em função da razão de pressões, pois mais do que uma pesquisa, este trabalho tem um fim didático o que o torna bem interessante. Estes regimes acima apresentados são amplamente conhecidos no meio acadêmico, a inovação aqui implementada foi a comparação dos fenômenos teóricos estudados com imagens reais, tornado o aprendizado mais claro e principalmente mais interessante para o aluno.

Como recursos técnicos para a reprodução do filme são necessários um computador e um projetor de imagens; futuramente estará disponível uma fita de vídeo VHS. Também estará disponível uma versão para internet na página do laboratório (www.pme.poli.usp.br/sisea) que poderá ser usada em aulas virtuais.

Para a continuidade deste trabalho, pretende-se primeiramente melhorar a qualidade das imagens obtidas e, posteriormente, utilizar o mesmo aparato para analisar outros escoamentos, por exemplo, como ao redor de cilindros e esferas entre outros.

6. Referências

- Anderson, J.D., 1990, “Modern Compressible flow”, second edition, McGraw-Hill.
 Fox, R.W. and McDonald, 1998, “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, Quarta edição, editora LTC.
 Liepmann H. W. and Roshko, A., 1957, “Elements of Gasdynamics”, New York, John Wiley & Sons, Inc.
 Van Wylene, G. J., Borgnakke, C. e Sonntag, R. E., 1998, “Fundamentos da Termodinâmica”, quinta edição, editora Edgard Blucher.
 Vieira, M. M., Simões-Moreira, J. R., e Guimarães, M. S., 2000, “Estudo Experimental de Jatos Evaporativos”, ENCIT 2000 – Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Porto Alegre – RS, Brasil, 03 a 06 de outubro de 2000.

EDUCACIONAL FILM FOR COMPRESSIBLE FLOW STUDIES IN LAVAL NOZZLES

Márcio Staschower

marcio.staschower@poli.usp.br

José Roberto Simões Moreira

jrsimoes@usp.br

Marcelo Mendes Vieira

mmendes@usp.br

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica

SISEA – Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
Caixa Postal 61548, CEP 05424 – 270, São Paulo - SP, Brazil

Abstract. *The goal of this work is to present an educational digital moving film for studying compressible flow of gases inside nozzles. The flow visualization has been obtained from a “Schlieren” system setup. A two-dimensional, convergent-divergent nozzle was used in the tests working with nitrogen gas discharging into local atmosphere. All of the tests were carried out by varying the reservoir pressure up to 1000 kPa, which allowed us to observe normal shock waves (inside the nozzle) and oblique shock waves (outside the nozzle). The images were registered by a CCD camera and then digitalized and stored in a computer. Techniques of image processing were applied to improve the quality of the shock waves, expansion waves and pressure gradients. The experimental results were compared with the classical one-dimensional, isentropic flow theory in nozzles.*

Keywords. *Compressible flow, Schlieren, Shock waves, Nozzle.*