

DIAGNÓSTICO DE SPRAYS DE QUEROSENE OBTIDOS COM UM INJETOR DO TIPO JATOS COLIDENTES**Amilcar P. Pimenta**

Instituto Tecnológico Aeronáutica - Centro Técnico Aeroespacial
12228-900 - São José dos Campos - SP - Brasil
e-mail: amilcar@acr.ita.cta.br

Alfredo Arnaldo Boschi

Instituto Tecnológico Aeronáutica - Centro Técnico Aeroespacial
12228-900 - São José dos Campos - SP - Brasil

Heraldo da Silva Couto

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
R. Clair Reis Motta, 95
12630-000-Cachoeira Paulista-SP-Brasil
e-mail: hscouto@easygold.com.br

Resumo. Este trabalho apresenta a comprovação experimental do modelo de previsão de tamanho de gota de Couto et al. a partir do diagnóstico de um spray polidisperso de querosene utilizando um injetor do tipo de jatos colidentes. Medidas experimentais como distribuição de tamanhos de gotas foram obtidas por difração de raio laser que atravessa a névoa do combustível e coletado na direção oposta por fotodiodos. Os dados resultantes obtidos são tratados em tempo real e analisados estatisticamente. Foram aplicadas várias pressões de atomização variando entre 3 a 20 bar e em diversas regiões do spray. Os resultados mostram uma relação esperada da diminuição do diâmetro médio de Sauter inversamente ao aumento do diferencial de pressão através do injetor até o limite de 10 bar. Além deste valor de pressão uma inesperada inversão desta relação foi observada o que se atribui a uma possível transição para a turbulência na origem do jato.

Palavras-chave: atomização, sprays, injetores, SMD

1. Introdução

A transformação de uma dada quantidade de líquido numa nuvem de finas gotas é de grande importância para diferentes aplicações na indústria, agricultura, medicina, meteorologia etc... Para cada uma destas aplicações há diferenças significativas dentre as quais os diâmetros médios de gota. Nas aplicações de combustão ou especificadamente na propulsão a jato, a atomização deve otimizar a liberação de energia quer seja visando um bom rendimento térmico quer seja possibilitando menor peso e volume de câmaras de combustão, ou ainda limitando a emissão de poluentes.

No projeto de foguetes a propulsão líquida o controle sobre a atomização permite um melhor acesso processo de combustão abrindo perspectivas de resolução de problemas de instabilidade de combustão, de razão e mistura de propelentes, refrigeração da câmara etc. O tamanho ideal de gota para uma câmara de combustão é aquele que permite maior área de contato possível com os gases quentes de maneira a maximizar a liberação da energia térmica. Contudo se as gotas se tornarem excessivamente pequenas a frente de chama ficará muito próxima dos injetores danificando-os.

Além dos diâmetros médios de gota, há também outras características relevantes da atomização que convém serem conhecidas tais como a forma e a penetração do spray, o número de densidade de gotas e as distribuições temporais e espaciais do tamanho e da velocidade das gotas.

Neste estudo procedeu-se à medição do diâmetro de Sauter e as distribuições espaciais do tamanho de gota de sprays polidispersos de querosene a partir de um injetor de jatos colidentes. Através dos dados experimentais levantados foi possível identificar pela teoria de jatos líquidos, diversos regimes do escoamento à saída dos orifícios bem como estabelecer limites de pressão adequados para um bom desempenho do injetor testado.

2. O Processo de Atomização

Um dos procedimentos para se identificar os regimes de escoamento de jatos líquidos é o da curva de estabilidade. Neste diagrama os eixos de coordenadas são representados pelo comprimento de quebra do jato líquido e nas abcissas pela velocidade do jato.

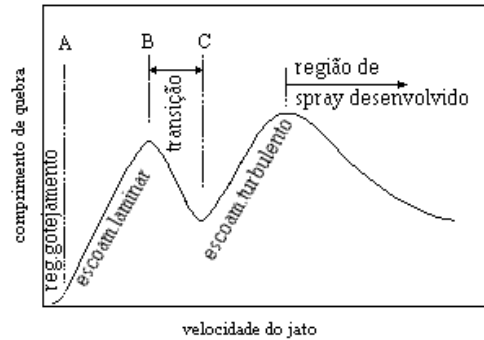


Fig 1- Curva de Estabilidade do Jato

Aqui se apresentam os quatro regimes possíveis de desintegração do jato líquido. A primeira parte da curva, que é linear, corresponde ao processo de desintegração pelas forças de superfície, mecanismo estudado inicialmente por Rayleigh e Weber seguido de outros mais recentes como Mahoney e Sterling(1978), Phinney e Humphries(1970). O limite desta região é chamada de ponto crítico, onde há alguns estudos como o de Grant e Middleman(1966), Van de Sande e Smith(1976). As outras regiões do diagrama apesar de serem abordados extensamente na literatura não interessa ao presente estudo pelo tipo de atomizador empregado, o qual deve operar dentro da primeira região. A razão para isto é que no processo de colisão, a parte da energia que é utilizada para a atomização por jatos colidentes é a energia cinética e esta energia é fortemente dependente do perfil de velocidades na saída dos injetores. McCarthy e Molloy(1974) introduziram uma quantidade ϵ baseada na energia cinética normalizada pela velocidade media ao cubo a partir qual se podem definir três regimes distintos de escoamento:

$$\epsilon = \frac{\int U_i^3 dA}{U^3 A} \quad (1)$$

Através deste parâmetro buscou-se ter-se um valor de ϵ maior possível, ou seja próximo do valor 2, correspondente ao regime laminar.

A pulverização via colisão de jatos oferece melhores condições de estudo do processo de atomização tendo em vista o caráter bidimensional do spray gerado. Pode-se ver pela figura 2 que a maior parte das gotas não surgem no ponto de colisão, antes ocorre a formação de uma superfície normal ao plano dos jatos líquidos. Assim orientando o injetor de maneira que esta superfície fique normal ao feixe de laser pode-se estudar com mais facilidade esse processo.



Fig 2- Representação do Processo de Formação de Gotas

O atomização gerada por outros processos tal como a dos injetores “pressure swirl” tem o inconveniente de se ter todo o feixe de luz encontrando o spray em angulo, gerando um padrão de espalhamento não uniforme em relação ao eixo de feixe de luz o que pode prejudicar a colocação do objeto no foco das lentes.

A espessura do filme gerado por injetores do tipo jatos colidentes, desenvolvida por Couto et al.,(1991), pode ser dada pela seguinte expressão geral:

$$d_L = 0,9614 \left(\frac{K^2 \sigma^2}{\rho \rho_L U^4} \right)^{\frac{1}{6}} \left(1 + 2,6 \mu^3 \sqrt{\frac{K \rho^4 U^7}{72 \rho_L^2 \sigma^5}} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

Onde o diâmetro do ligamento d_d é dado por: $d_d = 1,89 d_L$
e U é uma velocidade média na folha líquida e pode ser dada por:

$$U = \left(\frac{1}{2} [U_1^2 + U_2^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

onde U_1 e U_2 são as velocidades relativas de um lado e do outro das camadas da folha líquida. K é o fator de forma do filme líquido na saída do injetor, ρ é a densidade dos fluidos envolvidos, σ a tensão superficial, μ a viscosidade e θ o ângulo de abertura do cone de líquido. A comprovação experimental desta formulação pode ser encontrada em Couto, Carvalho, Bastos-Netto (1997)

No presente trabalho o semi-ângulo de colisão do injetor (teta) era de 57 graus fixado pelo fato de que o presente injetor ser uma adaptação de dois injetores Bosh DLLA150S187. No entanto sabe-se que o ângulo ótimo para maximizar a mistura está em torno 70°. como mostrado por Bastos-Netto e Couto (1991). Foi mostrado em Botelho (1992), teoricamente, que o ângulo ótimo para colisão de jatos líquidos, ou seja, aquele no qual sua energia cinética é melhor aproveitada de maneira a beneficiar o processo de mistura, estaria situado entre 50° e 70°.

Como se pretendia simplesmente uma averiguação do efeito da colisão sem necessidade de uma aplicação específica, o ângulo em questão não é relevante.

3. Bancada de testes

A bancada desenvolvida (Fig. 3) consiste basicamente da montagem utilizada em Barbosa et al(1998). Nesta bancada foi instalado um laser que opera por difração de luz fabricado pela *Malvern* (modelo *Mastersizer X*). Esta bancada conta ainda com um reservatório de querosene tipo garrafa de mergulho autônomo, pressurizado por um cilindro de N2 gasoso. Uma eletroválvula instalada no suporte do injetor controla a abertura e o fechamento do spray. Um suporte foi confeccionado para acomodar o atomizador o qual foi posicionado à entrada da seção de ensaio. Esta seção é composta de um tubo cilíndrico com paredes revestidas de espuma com o fim de evitar o ricochete e a recirculação de gotas do spray. Duas janelas laterais situadas diametralmente opostas permitem a passagem do feixe laser pela seção de teste. Abaixo desta seção há um recipiente para coleta de todo líquido do spray.

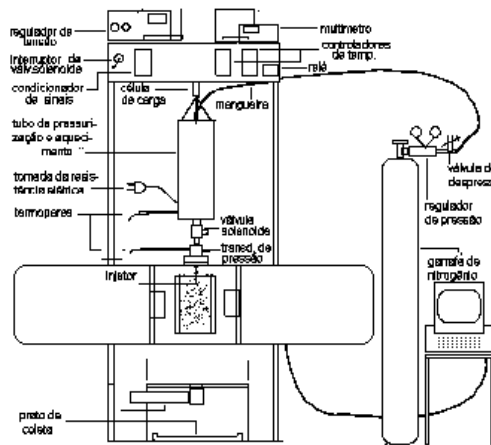


Fig 3 - Bancada de ensaios com laser por difração

Conectado à fonte de laser, há um micro computador para realizar o registro e o pós-processamento de dados por um programa através do qual se realizam os cálculos de médias, medianas e outras propriedades estatísticas.

4. Distribuição de Tamanho de Gotas

4.1 Metodologia do Laser por Difração

O método mais comum de técnica não intrusiva para distribuição de gotas é baseado na teoria de difração de Fraunhofer. Por este modelo quando um feixe de luz paralela e monocromático atravessa uma nuvem de gotas, o padrão obtido é o de um série de discos concêntricos claros e escuros cujo espaçamento entre eles dependerá da distribuição dos diâmetros das gotas. Este padrão de difração é obtido graças a uma lente transformadora de Fourier que converge o feixe sobre um detetor composto de um setor circular de fotodiodos. Esta transformação consiste na conversão do ângulo de espalhamento angular θ numa distância radial r sobre o detetor plano. A teoria de Fraunhofer é válida somente quando os tamanhos das gotas são maiores que o comprimento de onda da luz incidente.

4.2 Procedimentos

Antes de se efetuarem os testes buscou-se conhecer a posição a partir da qual o feixe laser consegue atravessar o spray sem perder muito de sua potência. Isso equivale, em termos precisos, encontrar a região onde o nível de obscurecência ao feixe não ultrapasse os 50% para se ter uma boa leitura. A obscurecência é função da densidade de líquido presente no spray ou seja da vazão de líquido. Como esta é controlada pela pressão, as condições mais adversas de obscurecência são aquelas correspondente às maiores pressões de injeção.

As pressões de ensaio e as posições escolhidas de medida estão restritas ao critério de obscurecência. Assim as pressões escolhidas para se efetuarem os testes foram 3,6,8,10,14 e 20 bar. Foram realizados ao todo quatorze ensaios de distribuição de tamanho de gotas em vários pontos do spray, destes porém somente seis se referem às posições de leitura no spray na linha de centro do spray e a 14cm do ponto de encontro dos jatos.(Fig.4) Verificações realizadas nos outros pontos não se mostraram no entanto conclusivos quanto à uniformidade do spray. Constatou-se a posteriori que as duas últimas medidas apresentaram no relatório um índice de reduzida uniformidade o que resultou em duas distribuições não aproveitáveis para fins de comparação com modelos teóricos.

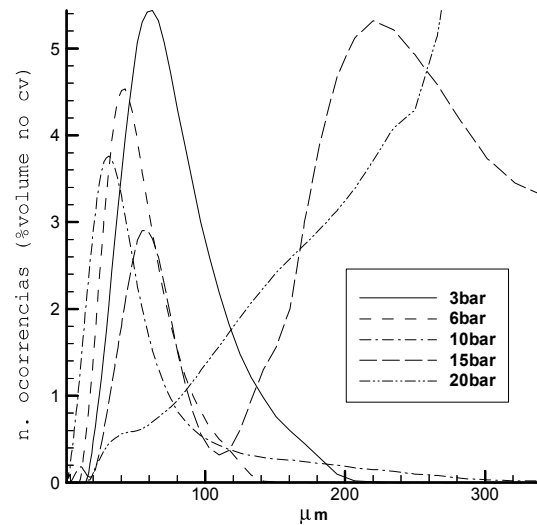


Fig. 4 - Distribuições de tamanhos de gota para diversas pressões de operação

A tabela I (abaixo) mostra os valores dos coeficientes de descarga do injetor utilizado para as diversas pressões de operação. Vê-se que tais valores estão bem abaixo daqueles previstos pelo modelo de Lichtarovicz et al.(1965).

Tabela 1- Coeficientes de descarga do injetor de jatos colidentes.

Queda de pressão no injetor [bar]	Cd experimental	Cd Pelo modelo. de Lichtarovicz
3.	0.445	0.765
6.	0.472	0.778
8.	0.512	0.783
10.	0.549	0.787
15.	0.548	0.790
20.	0.582	0.793

Em seguida, na Fig. 5, apresentam-se as médias de Sauter (SMD ou d_{32}) para as distribuições apresentadas na Fig.4: Para pressões até 10 bar há uma concordância razoável com o modelo de Couto et al.(1992) Observa-se o efeito das medidas de pouca uniformidade sobre os valores de média de Sauter nas duas últimas medidas (em 15 bar e 20 bar).

O diagrama da Fig.6 é um bom recurso para explicar graficamente boa parte do processo de atomização por jatos colidentes ocorrida nestes ensaios. [Onde “Oh” é o no. de Ohnesorge.]

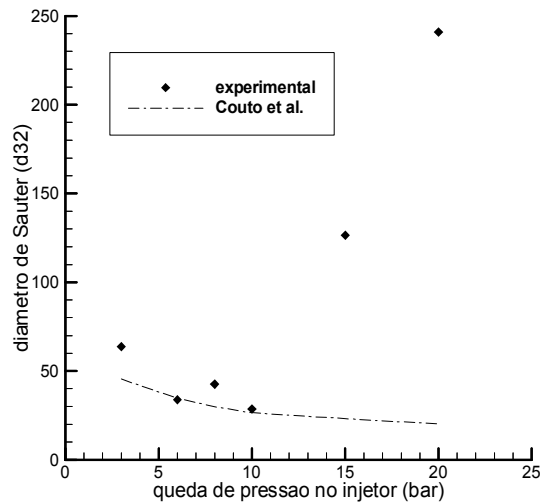


Fig. 5 – Comparação teórico-experimental do diâmetro médio de Sauter.

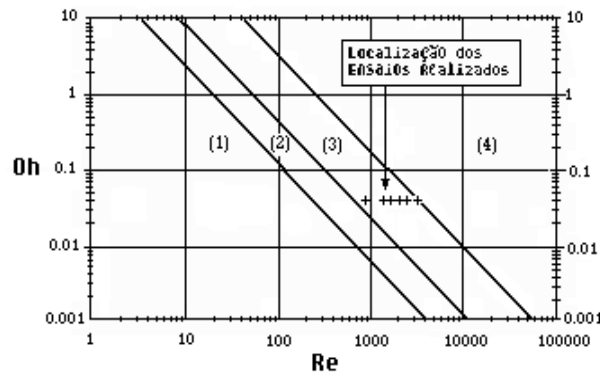


Fig. 6- Diagrama de regimes Oh x Re indicando-se as localizações das regiões de operação do injetor

5. Discussão dos Resultados

O que se propõe nesta discussão é a consideração dos regimes de spray como uma possível explicação para a tendência degenerativa na atomização verificada nos presentes resultados quando se aumenta a pressão de injeção além de certo limite. Através do diagrama Oh x Re e complementado por medida de distribuição de gotas, a transição para turbulência no interior dos canais do injetor foi apenas constatada mas não pôde ser plenamente estudada devido a alguns problemas de qualidade da leitura com o laser. Os presentes resultados são ainda preliminares devendo portanto serem complementados com mais ensaios e estendidos para outros regimes de operação deste injetor.

6. Agradecimentos

Àgradecemos à Fapesp pelo suporte dado ao presente trabalho através do projeto 95/05569-1, na categoria de apoio à infraestrutura de laboratório, nos permitindo adquirir o sistema laser adequado aos estudos de spray. E através do projeto 00/02064-6, o qual nos permitiu receber o Dr. Heraldo S. Couto, como cooperador no programa de pesquisador-visitante em nosso laboratório.

7. Referências Bibliográficas

- Barbosa, F.I., Niwa, M. e Pimenta, A. P.; 1998, set, *Metodologia Experimental para Caracterização de Spray*, Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, PUCRS, Porto Alegre.
- Botelho G.B., 1992, Distribuição de Massa e Razão de Mistura em Par de Jatos Colidentes, Tese de Mestrado em Ciência Espacial, INPE-5425-TDI/483
- Couto, H.S.; Bastos-Netto, D.; 1991, Modeling of Droplet Size Distribution from Impinging Jets, *J. Propulsion and Power*, vol.7, No.4, pp.654-656.
- Couto, H.S.; Bastos-Netto, D.; Migueis, C.E.; 1992, Modeling of Initial Droplet Size Distribution Function in the Spray Formed by Impinging Jets, *J. Propulsion and Power*, vol.8, No.3, pp.726-728.
- Couto, H.S.; Carvalho, J.A., Jr. Bastos-Netto, D.; 1997, Theoretical Formulation for Sauter Mean Diameter of Pressure-Swirl Atomizers, *J. Propulsion and Power*, vol.13, No.5, pp.691-696.
- Grant, R.P. and Middleman, S., 1966, Newtonian Jet Stability, *AIChE J.*, vol.12, n.4, pp.9-12
- Lichtarovicz, A., Duggins, R.K., and Markland, E., 1965, Discharge Coefficients for Incompressible Non-cavitating Flow Through Long Orifices, *J. Mech. Eng. Sci.*, vol.7, No.2, pp.210-219.
- McCarthy M.J., and Molloy, N.A. 1974, Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design, *Chem. Eng.*, vol.7, 1974, pp.1-20.
- Mahoney, T.J., and Sterling, M.A., 1978, The Breakup Length of Laminar Newtonian Liquid Jets in Air, Proceedings of the 1st International Conference on Liquid Atomization and Sprays Systems, Tokyo, pp.9-12.
- Phynney, R.E. and Humphries, W., Stability of a Viscous Jet-Newtonian Liquids, 1970, January NOLTR 70-5, U.S. Naval Ordnance Laboratory, Silver Spring, MD,
- Rayleigh, Lord, 1878, On the Stability of Jets, *Proc. London Math Soc.*, 10:4-13.
- Sande, E. Van de, and Smith, J.M., 1976, Jet Breakup and Air Entrainment by Low-Velocity Turbulent Jets, *Chem Eng Sci*, Vol.31, N.3, pp.219-224.

EXPERIMENTAL VALUATION DIAGNOSTICS OF KEROSENE SPRAYS FORMED BY IMPINGING JETS INJECTORS

Amilcar P. Pimenta

Instituto Tecnológico Aeronáutica - Centro Técnico Aeroespacial
12228-900 - São José dos Campos - SP - Brasil
e-mail: amilcar@cer.ita.cta.br

Alfredo Arnaldo Boschi

Instituto Tecnológico Aeronáutica - Centro Técnico Aeroespacial
12228-900 - São José dos Campos - SP - Brasil

Heraldo da Silva Couto

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
R. Clair Reis Motta, 95
12630-000-Cachoeira Paulista-SP-Brasil
e-mail: hscouto@easygold.com.br

ABSTRACT This work presents an experimental valuation diagnostics to a spray created by the atomization of kerosene after passing through a impinging jet injector. Drop size was evaluated using a diffracted laser beam method with employment of statistics analysis. Several drop pressures through the injector (3-20 bar) were tested. Empirical distributions were applied to match the set of data. Results indicate an expected decrease in SMD diameter with a increased pressure up to 10 bar. Beyond this value and until 20 bar an inverse relationship was observed and it is argued to be related to a transition to turbulence at the injector exit.

Key-words: atomization, impinging jet, SMD