

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM INJETOR DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO DO TIPO CÔNICO ASSISTIDO POR AR

Giuliano Gardolinski Venson, venson@ita.br
Amilcar Porto Pimenta, amilcar@ita.br
Julian Aristizabal

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica.
Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Praça Marechal Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias.
São José dos Campos, SP, Brasil. 12228-900

Resumo: Este trabalho apresenta o estudo experimental de um injetor de combustível líquido do tipo cônico assistido por ar. O objetivo do trabalho é caracterizar o injetor de combustível obtendo o coeficiente de descarga, ou coeficiente de vazão, do orifício do injetor, tamanho médio das gotas geradas e ângulo de abertura do spray. A função do ar assistido é auxiliar na quebra do jato líquido na saída do canal cônico do injetor. Para caracterizar experimentalmente o injetor é utilizado um banco de ensaios de injetores líquidos baseado em um equipamento do tipo laser de difração. O líquido de teste utilizado nos ensaios é a água destilada. Os parâmetros de interesse são obtidos considerando a presença ou não de ar assistido, com pressões de injeção de líquido variando de 100 a 600 kPa e pressões de ar variando de 80 a 200 kPa. O coeficiente de vazão do injetor é calculado através da vazão mássica de líquido e da diferença de pressão do líquido através do injetor. Os tamanhos médios das gotas, caracterizado através do diâmetro médio de Sauter, são obtidos através do laser de difração. Os ângulos de abertura do spray são obtidos através de técnicas fotográficas aplicadas ao jato de spray. Os resultados apresentam os diâmetros médios de Sauter e os ângulos do spray em função das pressões de injeção de líquido e ar. O coeficiente de vazão é aproximadamente constante para todas as vazões mássicas ensaiadas. Os diâmetros médios de Sauter produzidos pelo injetor variam de 15 a 200 μm e o ângulo de abertura do spray varia de 129° a 76° , sem ar e com ar assistido, respectivamente.

Palavras-chave: injetor cônico de combustível, diâmetro de Sauter, ângulo de spray, laser de difração.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Processo de Atomização

Os injetores de combustível líquido são dispositivos utilizados para transformar um filme de combustível líquido, com baixo poder reativo, em um spray de combustível altamente reativo, através do processo de atomização. A atomização do filme líquido envolve essencialmente um processo de conversão de energia de pressão em energia cinética. Os injetores baseados nesse princípio são chamados de injetores de pressão, ou *pressure atomizers*. Quando uma dada quantidade de líquido é forçada a atravessar uma pequena seção de área, o fluido é acelerado com conseqüente redução de pressão. Essa redução de pressão quebra o filme líquido em gotas de tamanhos de milésimos de milímetros. Os injetores de pressão podem ser basicamente dos tipos: orifício plano, cavidade de pressão centrífuga (também chamados de *pressure swirl*), cavidade cônica ou uma combinação desses diferentes tipos (Bayvel, 1993). No caso dos injetores cônicos, o líquido é forçado a atravessar um ou mais canais cônicos em formato de espiral. O formato de cônico espiralado do canal imprime movimento rotacional no líquido juntamente com a aceleração e redução de pressão, provocando a atomização. O processo de atomização que ocorre no canal cônico do injetor é chamado de atomização primária. Para complementar a quebra do filme líquido pode ser empregada um processo de atomização secundária utilizando ar assistido. Esse processo utilizando ar complementa a atomização primária do injetor, reduzindo consideravelmente o tamanho das gotas geradas.

1.2. Métodos de Ruptura do Filme Líquido

Os métodos de ruptura do filme líquido em gotas são descritos através de diferentes mecanismos físicos, os quais levam em consideração a interação entre as forças inerciais e dinâmicas, das fases líquidas e gasosas, com a força de tensão superficial atuante no líquido (Sommerfeld, 2000).

Os regimes de ruptura podem ser divididos basicamente em três categorias: mecanismo de ruptura de Rayleigh, mecanismo de ruptura de onda e atomização (Lefebvre, 1989). De uma forma geral, o processo de atomização começa a ocorrer a partir de números de Weber acima de 40 e números de Ohnesorge acima de 10^{-2} .

Os grupos adimensionais empregados a escoamentos multi-fásicos para caracterizar os regimes de ruptura são os números de Weber e Ohnesorge. O número de Weber (We) é definido pela Eq. (1) e corresponde à razão entre as forças inerciais e de tensão superficial atuante nos fluidos. O número de Ohnesorge (Oh) é definido pela Eq. (2) e corresponde à razão entre as forças viscosas e a forças inerciais e de tensão superficial. O número de Ohnesorge pode ser correlacionado ainda com os números de Weber e Reynolds.

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot l}{\sigma} \quad (1)$$

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot l}} = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (2)$$

Na qual Re é o número de Reynolds, ρ é a massa específica do líquido em kg/m^3 , v é a velocidade relativa entre os fluidos em m/s , l é o comprimento característico em metros, μ é a viscosidade dinâmica do líquido em $\text{Pa}\cdot\text{s}$ e σ é a tensão superficial em N/m . Em estudos envolvendo gotas, assume-se o comprimento característico com sendo o tamanho médio das gotas.

2. CARACTERIZAÇÃO DE INJETORES DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO ASSISTIDOS POR AR

O processo de caracterização um injetor de combustível líquido, seja ele assistido ou não por ar, envolve a obtenção dos parâmetros de desempenho: coeficiente de descarga do injetor, tamanho médio das gotas geradas e ângulo de abertura do spray. Na prática, esses parâmetros são estudados em função de um parâmetro de operação que pode ser controlado, a pressão de injeção de líquido. No caso dos injetores assistidos, esses parâmetros são estudados em função da pressão de injeção de ar ou através da razão entre a pressão de líquido e a pressão de ar.

2.1. Coeficiente de Descarga de Injetores

O coeficiente de descarga, também chamado de coeficiente de vazão, é utilizado para correlacionar a vazão mássica que atravessa uma dada seção de área com a queda de pressão ao longo dessa seção. O valor do coeficiente de descarga do injetor deve ser constante ao longo de toda faixa operacional de vazão. Assim, pode-se conhecer a vazão mássica ao longo do injetor conhecendo a diferença de pressão a montante e jusante do injetor.

Para um escoamento incompressível, adiabático e ausente de variação da energia potencial gravitacional, pode-se calcular o coeficiente de vazão através da equação da continuidade de Bernoulli (Delmeé, 1983):

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot (P_2 - P_1) \cdot \rho} \quad (3)$$

Na qual \dot{m} é a vazão mássica do escoamento em kg/s , A é a área do orifício em m^2 , P_2 e P_1 são respectivamente a pressão a montante e jusante do orifício em Pa e ρ a massa específica do fluido em kg/m^3 . Na prática, a pressão a montante corresponde à pressão de injeção de líquido e a pressão a jusante a pressão da câmara de combustão.

Isolando o coeficiente de descarga na Eq. (3), tem-se a seguinte equação:

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot (P_2 - P_1) \cdot \rho}} \quad (4)$$

2.2. Tamanho Médio das Gotas

No estudo de sistemas dispersos envolvendo populações de gotas geralmente são obtidos distribuições de tamanho de gotas. Essas distribuições correlacionam o percentual volumétrico de uma faixa de tamanho de gota no volume total da população de gotas. Para caracterizar uma dada distribuição de tamanho de gotas são utilizados diâmetros médios representativos (Lefebvre, 1989). Nos casos envolvendo sistemas reativos, como em sprays de injetores de combustível líquido, o diâmetro representativo comumente utilizado é o diâmetro médio de Sauter, SMD. O diâmetro de Sauter de um spray, denotado por $D_{(3,2)}$, é definido como o diâmetro de uma gota que possui a mesma relação volume-área que todo o spray. Esse diâmetro é calculado através da Eq. (5), com base em todos os diâmetros identificados no spray.

$$D_{(3,2)} = \frac{d_1^3 + d_2^3 + \dots + d_n^3}{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2} = \sum_n \frac{d_i^3}{d_i^2} \quad (5)$$

Na qual d_1, d_2, \dots, d_n são os diâmetros detectados na população de gotas. Outros diâmetros representativos que podem ser utilizados para caracterizar uma distribuição de tamanho de gotas, juntamente com o diâmetro médio de Sauter, são os diâmetros $D_{(0.1)}$, $D_{(0.5)}$ e $D_{(0.9)}$. Esses diâmetros correspondem respectivamente aos diâmetros das gotas que englobam 10%, 50% e 90% do volume total da população de gotas.

Para identificação dos diâmetros das gotas presentes em um spray de líquido comumente utilizam-se técnicas óticas baseadas na difração da luz, visto que os ângulos de difração gerados pelas gotas estão diretamente correlacionados com os diâmetros das gotas que geram a difração.

2.3. Ângulo de Abertura do Spray

O spray formado na atomização em injetores de combustível possui geralmente a forma de um cone. O ângulo de abertura do spray corresponde ao ângulo interno total de abertura desse cone. Esse ângulo está relacionado com a capacidade de penetração do spray no ambiente da câmara de combustão (Lefebvre, 1989). De uma forma geral, ângulos grandes (maiores que 100°) favorecem a atomização secundária do filme líquido por imprimirem ao spray uma grande componente de velocidade tangencial e ângulos pequenos (menores que 60°) favorecem a penetração do spray no ambiente devido à maior componente de velocidade axial.

3. APARATO EXPERIMENTAL

Para as medições da distribuição do tamanho de gota e dos diâmetros médios foi utilizado o banco de ensaios de injetores do laboratório de Engenharia Aeronáutica do ITA, mostrado na Fig. (1). O banco de ensaios contém um equipamento do tipo laser de difração Malvern Mastersizer X. O ângulo de abertura do spray é obtido através de uma fotografia digital do spray. Para o cálculo do coeficiente de descarga, através da vazão mássica, é utilizada uma balança de precisão conectada ao computador de controle e um reservatório graduado. A vazão mássica é calculada através da variação da massa do reservatório em um intervalo de tempo de 200s.

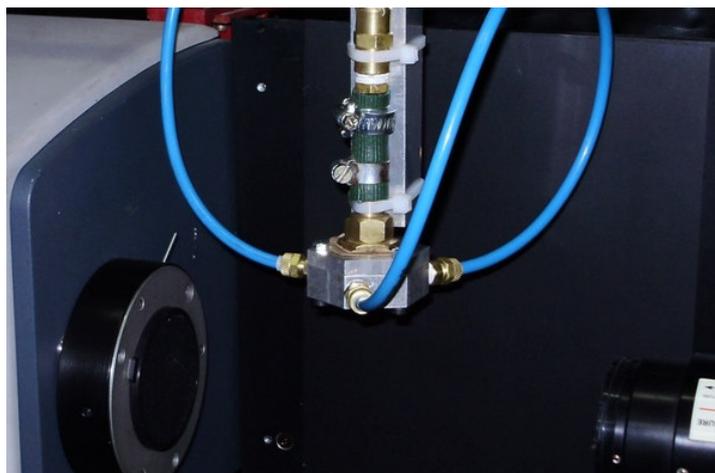


Figura 1. Injetor montado no banco de ensaios de injetores

Para a injeção de líquido é utilizada um reservatório pressurizado. A pressurização do reservatório de líquido é realizada com nitrogênio líquido e a pressão é controlada através de um regulador de pressão. Para a injeção de ar assistido é utilizada uma linha de ar comprimido proveniente de um compressor externo ao banco de ensaios. A pressão de ar assistido é controlada também através de um regulador de pressão.

Para a medição da pressão de líquido é utilizado um manômetro analógico conectado no reservatório. Para a medição da pressão de ar assistido é utilizado o sensor de pressão MPX-5500DP, da Freescale, conectado a linha de ar. O sensor possui faixa de medição de 0 a 500kPa, com incerteza de 5kPa. O líquido utilizado para simular o combustível é água destilada. As faixas de pressão utilizadas nos ensaios são de 100 a 600 kPa para a injeção de líquido e 80 a 200 kPa para o ar assistido. As propriedades da água destilada utilizada para cálculo dos números adimensionais são mostradas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades de Referência do Líquido Utilizado a 100kPa e 300K (Lefebvre, 1989)

massa específica (kg/m³)	992
tensão superficial (N/m)	0.075
viscosidade dinâmica (Pa.s)	0.00102

O conjunto completo do injetor mostrado na Fig. (2) consiste de três partes: o injetor cônico de líquido, o corpo de injeção, e a camisa de ar. O injetor cônico mostrado na Fig. (3) é montado internamente ao corpo de injeção, Fig. (4). A camisa de ar mostrada na Fig. (5), dentro da qual é montada o corpo de injeção com o injetor, possui três entradas tangenciais dispostas em formato de estrela defasadas em um ângulo de 120°. O injetor cônico de líquido possui quatro canais tangenciais defasados em ângulo de 90°, com espessura de 0.4mm. O orifício de saída do líquido na extremidade do corpo de injeção possui diâmetro de 2mm, como mostrado no detalhe da Fig. (4). O orifício de saída do ar assistido na extremidade da camisa de ar possui 10mm de diâmetro.



Figura 2. Conjunto injetor montado



Figura 3. Injetor cônico de líquido



Figura 4. Corpo de injeção



Figura 5. Camisa de ar

O sistema de aquisição de dados do equipamento laser é conectado ao computador de controle via porta serial. O software de aquisição e tratamento dos dados experimentais foi desenvolvido pelo próprio fabricante do equipamento laser. O esquema do banco de ensaios é mostrado na Fig. (6).

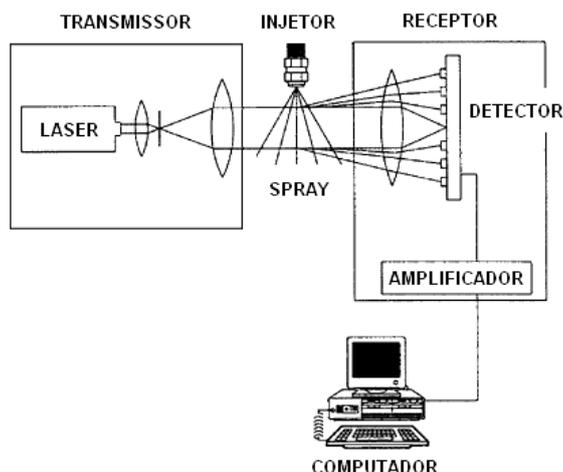


Figura 6. Esquema do banco de ensaios de injetores

4. METODOLOGIA

4.2. Determinação do Coeficiente de Descarga

Para a determinação do coeficiente de descarga foi utilizado um recipiente graduado montado sobre uma balança de precisão. Em cada pressão de injeção escolhida para ensaio o spray de líquido é coletado no recipiente, permitindo determinar a variação de massa do recipiente em um intervalo de tempo de 200s. O coeficiente de descarga é calculado através da vazão mássica e da pressão de injeção de líquido através da Eq. (4).

4.3. Determinação dos Ângulos de Abertura do Spray

Os ângulos de abertura do spray são obtidos através de fotografias digitais do spray em condições pré-definidas. As fotografias são inseridas em um programa de tratamento de imagens, onde são traçadas duas linhas limítrofes do spray para servirem de referência para a medição do ângulo do spray.

4.4. Determinação dos Diâmetros Médios das Gotas

O diâmetro médio das gotas geradas pelo injetor, em uma dada condição de ensaio, é definido pelo diâmetro médio de Sauter calculado com base na população de gotas detectadas pelo equipamento laser. O procedimento de medição via laser exige uma preparação prévia do equipamento, de acordo com o manual do fabricante. Nessa preparação são realizados testes de fotometria, para avaliar a transparência do spray a feixe laser, e checagem do alinhamento do transmissor do laser com os detectores de luz. Os resultados são apresentados de forma automática ao final do ensaio.

5. RESULTADOS

5.1. Coeficiente de Descarga do Injetor de Combustível

Os valores do coeficiente de descarga obtidos para o injetor cônico de quatro canais, com pressão de injeção de líquido variando de 100 a 550kPa, são mostrados na Fig. (7). Para a faixa de pressão analisada, o coeficiente de descarga manteve-se constante, com valor médio de 0.102. O valor da incerteza associada ao cálculo do coeficiente de descarga é discutido no item 5.4.

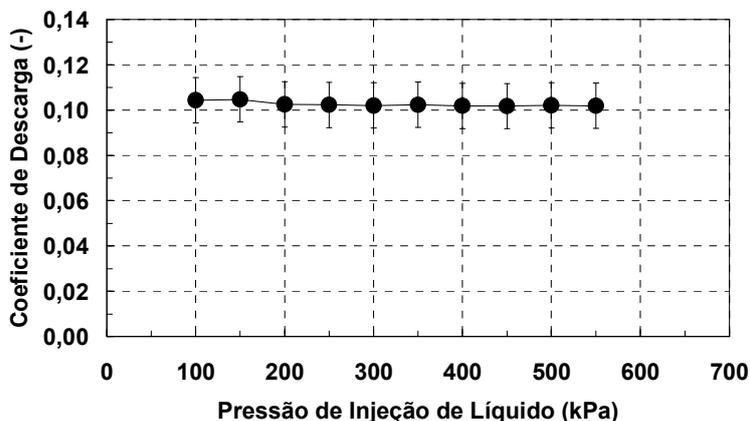


Figura 7. Coeficiente de descarga do injetor

5.2. Ângulo de Abertura do Spray

Os ângulos de abertura do spray para a condição de injeção sem ar assistido é mostrado para duas pressões de injeção de líquido nas Fig. (8). Através da figura percebe-se que não ocorre grande variação do ângulo de abertura do spray com o aumento da pressão de líquido.

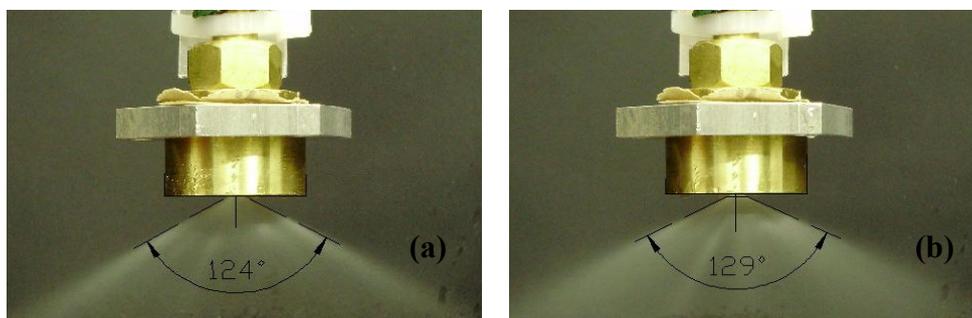


Figura 8. Ângulo de abertura do spray sem ar assistido
(a) pressão de líquido de 200kPa, (b) pressão de líquido de 600kPa

A Figura (9) apresenta o comportamento do fechamento do ângulo de abertura do spray para as condições sem e com assistência, para uma dada pressão de injeção de líquido. O fechamento do ângulo de spray, na condição de assistência, ocorre devido ao aumento da velocidade axial das gotas geradas pelo ar assistido.

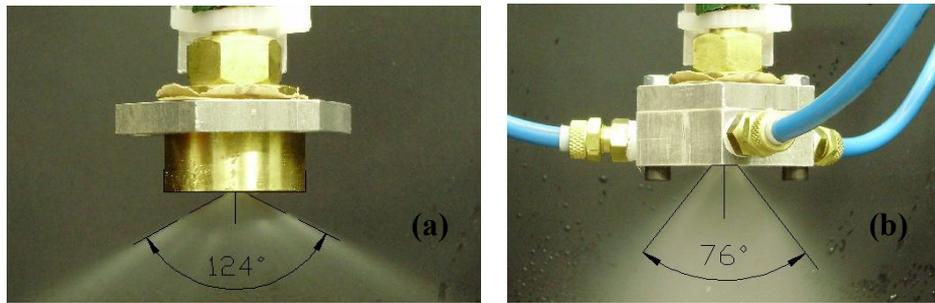


Figura 9. Ângulo de abertura do spray sem e com ar assistido
 (a) pressão de líquido de 200kPa sem assistência, (b) pressão de líquido de 200kPa e pressão de ar de 150kPa

As Figuras (10) e (11) apresentam o comportamento dos ângulos de abertura de spray para as condições sem e com ar assistido. Pode-se verificar que para uma dada condição de operação relativa ao processo de assistência, não ocorre variação do ângulo de abertura do spray em função da pressão de injeção de líquido. As incertezas associadas a determinação dos ângulos de abertura do spray são discutidas no item 5.4

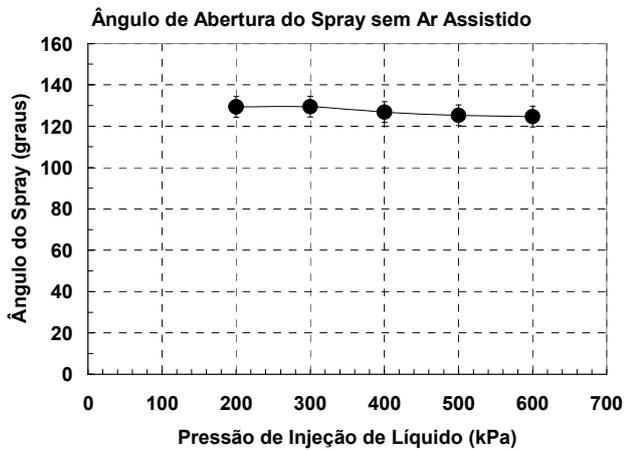


Figura 10. Ângulo de abertura do spray sem ar assistido

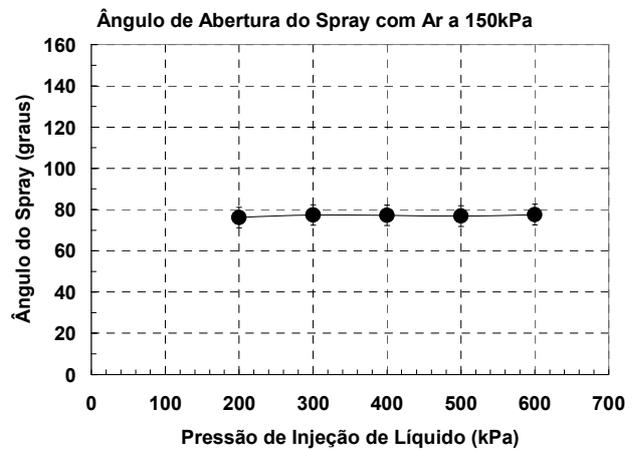


Figura 11. Ângulo de abertura do spray para pressão de ar de 150kPa

5.3. Diâmetros Médios das Gotas

O comportamento dos diâmetros médios de Sauter, SMD, das gotas geradas pelo injetor na condição sem ar assistido é mostrado na Fig. (12). O diâmetro médio das gotas tende a diminuir com o aumento da pressão de injeção de líquido. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento no gradiente de pressão, e conseqüentemente de velocidades, na saída do injetor, o que gera tensões de cisalhamento maiores sobre o filme líquido, reduzindo o tamanho das gotas.

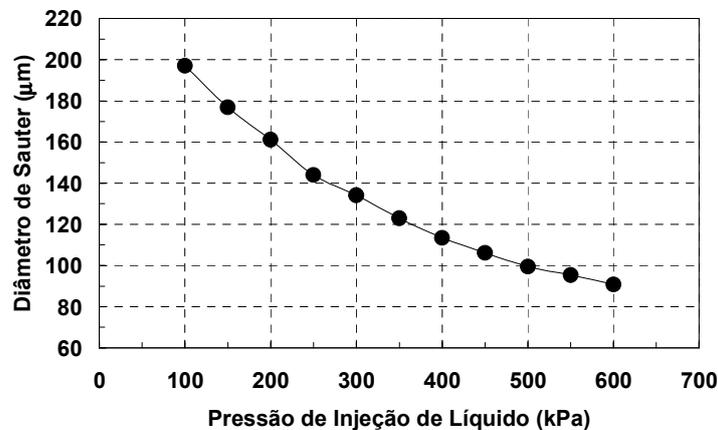


Figura 12. Diâmetros médios de Sauter em função da pressão de líquido sem ar assistido

Para avaliar a influência da pressão de injeção de líquido no tamanho das gotas em uma dada condição de assistência por ar, fixou-se uma pressão de injeção de ar de 150kPa, obtendo o diâmetro médio em função da pressão de líquido como mostrado na Fig. (13).

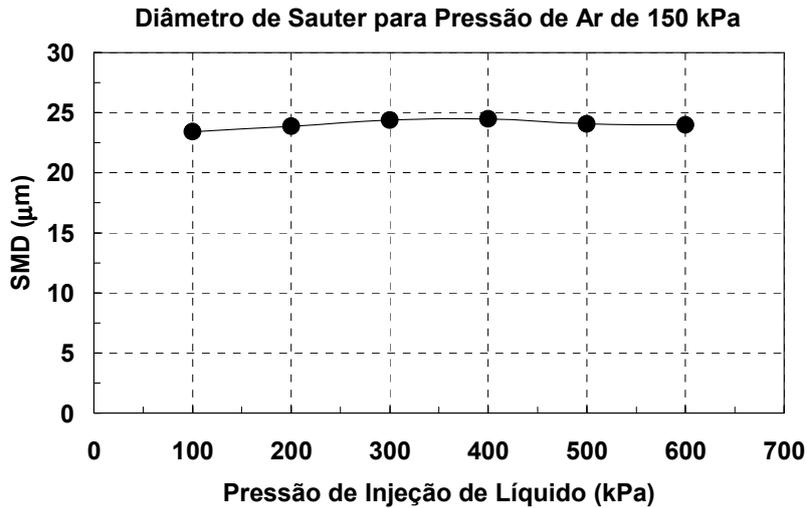


Figura 13. Diâmetros médios de Sauter em função da pressão de líquido para ar assistido a 150kPa

Pode-se verificar através da Fig. (13) que para uma dada pressão de ar assistido, a variação na pressão de injeção de líquido não altera significativamente o tamanho das gotas geradas. Comparando os tamanhos de gotas obtidos no processo não-assistido, mostrado na Fig. (12), com os tamanhos no processo assistido, Fig. (13), verifica-se que o processo de atomização do filme líquido com ar assistido é regido pelo processo de atomização secundária.

A Figura (14) mostra os diâmetros de Sauter em função da pressão de ar assistido em uma dada pressão de líquido.

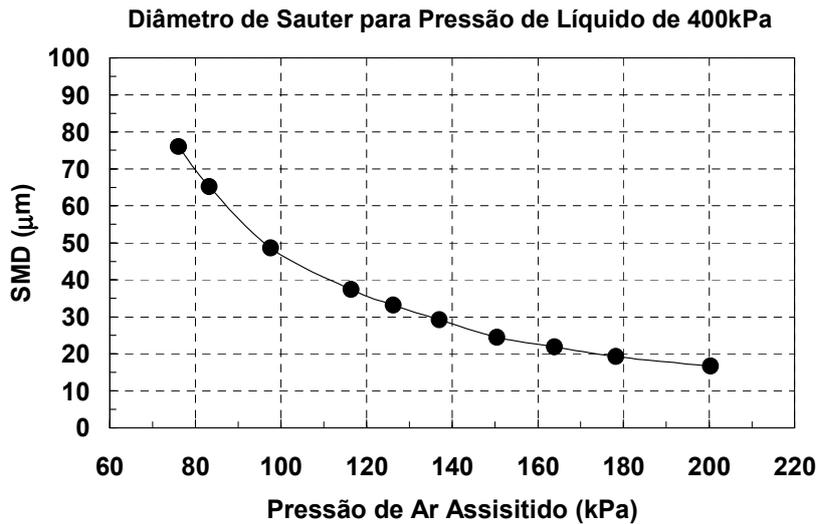


Figura 14. Diâmetros médios de Sauter em função da pressão de ar para pressão de líquido de 400kPa

Analisando o comportamento dos tamanhos de gotas da Fig. (14) em conjunto com os resultados da Fig. (13) pode-se verificar que nos processos de injeção com ar assistido, os tamanhos das gotas serão função somente da pressão de injeção de ar. Ainda na Fig. (14) nota-se uma tendência de estabilização do diâmetro médio das gotas com o aumento da pressão de ar. Esse comportamento deve ocorrer provavelmente devido ao efeito de coalescência entre as pequenas gotas geradas em altas pressões, causadas pelas grandes velocidades relativas no jato do spray.

5.4. Incertezas dos Parâmetros de Desempenho do Injetor

A incerteza do valor do coeficiente de descarga é calculada com base na combinação das incertezas relativas, das variáveis utilizadas cálculo do coeficiente, conforme apresentado na Eq. (1). A equação para combinação das incertezas é dada por:

$$\left(\frac{u(C_D)}{C_D}\right)^2 = \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(P)}{P}\right)^2 + \left(\frac{u(\dot{m})}{\dot{m}}\right)^2 \quad (6)$$

Na qual o valor de $\frac{u(C_D)}{C_D}$ é a incerteza relativa do coeficiente de descarga, calculado com base nas incertezas relativas das variáveis. A incerteza relativa para a área do orifício do injetor $\frac{u(A)}{A}$ é de 5%, para a pressão de injeção de líquido $\frac{u(P)}{P}$ de 2.5% e para a vazão mássica $\frac{u(\dot{m})}{\dot{m}}$ de 1%. Combinando-se as incertezas relativas obtêm-se uma incerteza relativa para o coeficiente de descarga da ordem dos 5.5%. Como o valor médio do coeficiente de descarga obtido experimentalmente é de 0.102, o valor absoluto da incerteza é de 0.057.

Como os ângulos de abertura do spray foram determinados através de um método gráfico aplicado a uma fotografia digital do spray, a incerteza foi determinada através do desvio-padrão de um conjunto de três ângulos, traçados em diferentes posições da fronteira do spray. Para os ângulos de abertura considerou-se uma incerteza de 5°.

Com relação à incerteza dos diâmetros médios obtidos através do equipamento laser, a precisão das medidas depende diretamente da qualidade das lentes óticas do equipamento laser. Uma estimativa da incerteza das medições do diâmetro médio foi realizada estatisticamente, através do desvio-padrão do valor médio para um conjunto de cinco medições, em uma dada pressão de injeção de líquido e ar. O valor da incerteza estatística obtida é da ordem de 1 μm .

6. CONCLUSÕES

O procedimento experimental apresentado e utilizado para caracterização do injetor se mostrou adequado para obtenção dos parâmetros característicos do injetor cônico. O método empregado para determinar os ângulos de abertura do spray, apesar de apresentar imprecisão, permite avaliar quantitativamente e qualitativamente variações entre os diferentes regimes de operação, sem e com ar assistido. A utilização do processo de assistência por ar nesse injetor reduziu o ângulo de abertura do spray em aproximadamente 39%.

Os tamanhos médios de gotas também tiveram redução significativa com o processo de assistência. O tamanho médio mínimo das geradas sem assistência por ar é da ordem dos 90 μm . Com a utilização do processo de assistência por ar esse tamanho mínimo foi reduzido para ordem dos 15 μm , uma redução equivalente a 83%.

7. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia da Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica pela utilização do equipamento laser de difração.

8. REFERÊNCIAS

- Bayvel L. P. 1993. "Liquid Atomization". CRC Books, Taylor & Francis. 475p
Delmeé G. J. 1983. "Manual de Medição de Vazão". São Paulo: Editora Edgard Blucher. 474p.
Lefebvre. A. H. 1989. "Atomization and Sprays". Taylor & Francis. 417p.
Sommerfeld M. 2000. "Theoretical and Experimental Modelling of Particulate Flows". Lectures Notes on Theoretical and Experimental Modelling of Particulate Flows, von Karman Institute.

9. DIREITOS AUTORAIS

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

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF AN AIR-ASSISTED CONICAL LIQUID FUEL INJECTOR

Abstract: *This paper presents the experimental study of an air-assisted conical liquid fuel injector. The objective is to obtain the performance parameters of the injector, as the injector orifice discharge flow coefficient, drop mean sizes and spray angle. The function of the air is to assist in liquid drop breakup at injector outlet. To characterize the spray is used a liquid fuel test stand based in a laser diffraction equipment. The liquid used in the tests is distilled water. The performance parameters are obtained considering the presence or not of air-assisted, with liquid injection pressures ranging from 100 to 600 kPa and air pressures ranging from 80 to 200 kPa. The injector discharge flow coefficient is calculated through the liquid mass flow and liquid pressure drop across the injector orifice. The average drop sizes, characterized by the Sauter mean diameter, are obtained by the laser equipment. The spray angles are obtained by photographic techniques applied to the jet spray. The results show the Sauter mean diameters and spray angles in function of liquid air injection pressures. The discharger flow coefficient is constant for all mass flow rates recorded. The Sauter mean diameters produced by injector range from 20 to 150 μm and the spray angles ranges from 120 to 50 degrees, without and with assisted air respectively.*

Keywords: *conical fuel injector, Sauter mean diameter, spray angle, laser diffraction.*