

## **DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES E DO TAMANHO MÉDIO DE GOTAS DE UM INJETOR DE COMBUSTÍVEL PLANO ASSISTIDO POR AR**

Giuliano Gardolinski Venson, [venson@ita.br](mailto:venson@ita.br)  
Hebert Adrián Ruiz Escalante, [hare984@gmail.com](mailto:hare984@gmail.com)  
Amilcar Porto Pimenta, [amilcar@ita.br](mailto:amilcar@ita.br)

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 método experimental utilizado para obtenção do perfil de velocidades e do tamanho médio das gotas de um injetor de combustível plano assistido por ar. O objetivo do trabalho é obter o perfil de velocidades do ar assistido na saída do injetor, em diferentes condições de operação, e caracterizar o tamanho médio das gotas sem e com a presença do ar assistido. Outros parâmetros importantes para caracterização do spray são obtidos, como o coeficiente de descarga do injetor e o ângulo de abertura do spray. Nos ensaios do injetor plano é utilizado um banco de ensaios de injetores contendo um equipamento do tipo laser de difração, utilizando água destilada como líquido de teste. As velocidades locais na saída do injetor são obtidas através de um tubo pitot. O tamanho médio das gotas, caracterizadas através do diâmetro médio de Sauter, são obtidas através do equipamento laser Malvern Mastersizer X. Esse diâmetro representativo é calculado através de um modelo matemático, aplicado a distribuição cumulativa percentual dos diâmetros encontrados na população de gotas geradas. Nas medições dos tamanhos de gotas são empregadas pressões de injeção de líquido de 100 a 600 kPa e pressões de ar de 100 a 400 kPa. Os resultados mostram o perfil de velocidades do ar assistido na saída do injetor, em dois planos perpendiculares, e os tamanhos médios das gotas nas condições de presença ou não de ar assistido. Os tamanhos médios das gotas variam de 260 a 130 $\mu$ m para a condição sem ar assistido e 230 a 70 $\mu$ m com ar assistido.

**Palavras-chave:** injetor de combustível, diâmetro de Sauter, ângulo de spray, perfil de velocidade, laser de difração.

### **1. INTRODUÇÃO**

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. O processo de atomização ocorre quando uma dada quantidade de líquido é forçada a atravessar uma pequena seção de área transversal. Nessa seção o fluido é acelerado com conseqüente redução de pressão. Essa redução de pressão quebra o filme líquido em gotas de tamanhos da ordem milésimos de milímetros.

O processo de atomização gerado pelo orifício 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 tem por objetivo complementar a atomização primária do injetor, visando reduzir consideravelmente o tamanho das gotas geradas.

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 grupos adimensionais empregados em estudos de escoamentos multi-fásicos são os números de Weber e Ohnesorge. De uma forma geral, o processo de atomização começa a ocorrer a partir de números Weber acima de 40 e números de Ohnesorge acima de  $10^{-2}$ . 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,  $\rho$  é a massa específica do líquido em  $\text{kg/m}^3$ ,  $v$  é a velocidade relativa entre os fluidos em  $\text{m/s}$ ,  $l$  é o comprimento característico em metros,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do líquido em  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  e  $\sigma$  é a tensão superficial em  $\text{N/m}$ . Em estudos envolvendo gotas, assume-se o comprimento característico com sendo o tamanho médio das gotas.

O tamanho final das gotas geradas tem influência direta na qualidade da combustão e na estabilidade da chama. Quanto maior for o tamanho das gotas formadas, maiores são os tempos de reação na superfície da gota, prejudicando a penetração do spray e a estabilidade da combustão. No caso de injetores assistidos, a atomização secundária é influenciada pela velocidade relativa entre as gotas do jato de spray e o ar assistido. A atomização secundária com pequenos gradientes de velocidade tende a não gerar efeitos significativos na redução do tamanho de gotas, visto que ocorrem simultaneamente efeitos de quebra e coalescência do filme líquido (Liu, Mather e Reitz, 1993). Na medida em que se aumenta a velocidade do ar assistido em relação ao spray, a assistência passa a desempenhar maior efeito de quebra do filme, devido às maiores forças de cisalhamento atuantes nas gotas.

O esquema de fluxo através do injetor de combustível assistido por ar estudado é mostrado na Fig. (1).

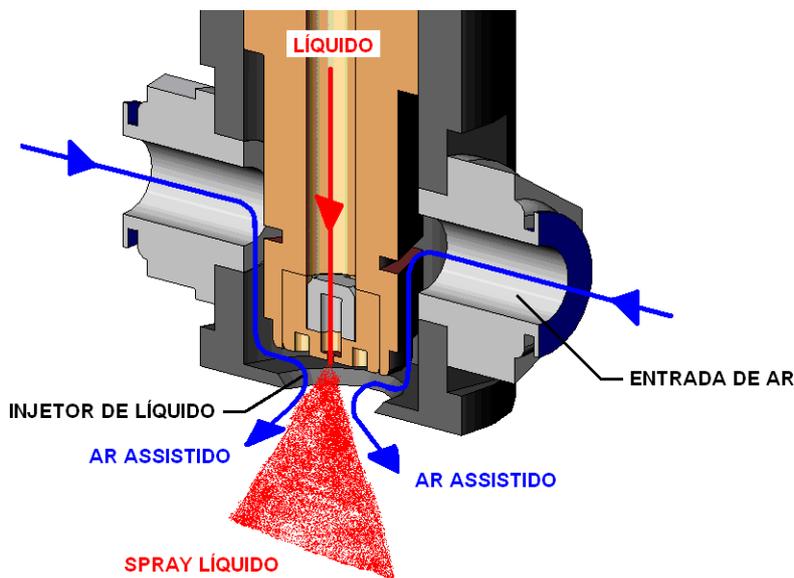


Figura 1. Esquema de Fluxo do Injetor Tipo Assistido por Ar

## 2. CARACTERIZAÇÃO DE INJETORES DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO ASSISTIDOS POR AR

A caracterização um injetor de combustível líquido, seja ele assistido ou não por ar, envolve a obtenção dos seguintes 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. A obtenção dos perfis de velocidade do ar assistido, em função da pressão de ar, é importante visto que permite estimar as diferenças entre a velocidade de saída do spray com a velocidade do ar assistido, correlacionando com os parâmetros de desempenho.

### 2.1. Coeficiente de Descarga de Injetores de Orifício Plano

O coeficiente de descarga é utilizado para correlacionar a vazão mássica que atravessa o orifício com a queda de pressão ao longo desse orifício. Espera-se que o valor do coeficiente de descarga não se altere com a vazão mássica, e conseqüentemente com o Número de Reynolds. Sendo assim é possível 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 descarga de um orifício plano através da equação de vazão baseada na 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<sup>2</sup>,  $P_2$  e  $P_1$  são respectivamente a pressão a montante e jusante do orifício em Pa e  $\rho$  a massa específica do fluido em kg/m<sup>3</sup>. 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 como mostrado na Fig. (2). As 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). Esses diâmetros médios correspondem ao diâmetro de uma gota com mesma relação comprimento-área ou volume-área de toda população. 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 de gotas identificados no spray:

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

Outros diâmetros representativos 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 ao diâmetro que engloba 10%, 50% e 90% do volume total das gotas abaixo do volume da gota considerada.

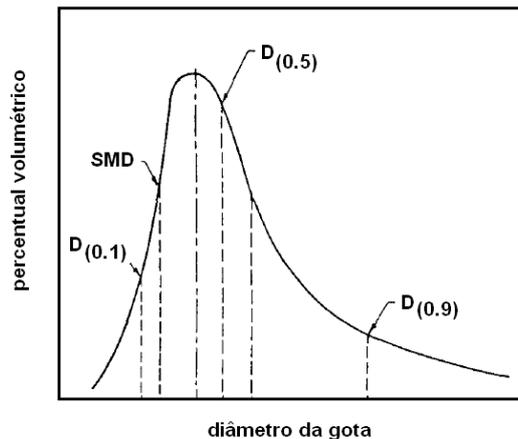


Figura 2. Distribuição de Tamanho de Gotas e Diâmetros Representativos

Para identificação dos diâmetros das gotas presentes em um spray de líquido comumente utilizam-se técnicas óticas baseadas na difração da luz. Os ângulos de difração gerados pelas gotas estão diretamente correlacionados com os diâmetros das gotas que geraram a difração. Essas técnicas conhecidas como LALLS (do inglês *Low Angle Light Scattering*) utilizam como fonte de luz um feixe de laser monocromático de baixa intensidade. São largamente empregadas visto que são técnicas não-intrusivas e não-destrutivas (Hirleman e Bohren, 1991).

## 2.3. Ângulo de Abertura do Spray

Como em injetores de combustível líquido o spray formado durante a atomização possui geralmente a forma de um cone, o ângulo de abertura do spray corresponde ao ângulo 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 de abertura grandes, comumente maior que 100°, favorecem a atomização secundária do filme líquido por imprimirem ao spray uma grande componente de velocidade tangencial em relação ao escoamento assistido. A desvantagem é a possibilidade do spray em atingir as paredes internas da câmara de combustão. Ângulos de abertura pequenos, menores que 60°, favorecem a penetração do spray no ambiente devido à maior componente de velocidade axial. Entretanto, tendem a deslocar a zona de combustão para longe do injetor, em direção ao final da câmara de combustão, podendo acarretar em problemas de estabilidade de combustão.

## 2.4. Velocidades Locais na Saída do Injetor para Obtenção dos Perfis de Velocidades

A técnica experimental comumente utilizada para obtenção das velocidades locais do escoamento utiliza o tubo pitot. O pitot é um dispositivo que permite medir simultaneamente a pressão total e a pressão estática do escoamento. Através da diferença entre a pressão total e a pressão estática obtêm-se a pressão dinâmica. A partir da pressão dinâmica e das propriedades do escoamento calcula-se a velocidade local no pitot por (Delmeé, 1983):

$$P_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_T}{R \cdot T} \cdot V^2 \quad (6)$$

Na qual  $P_D$  e  $P_T$  são respectivamente as pressões dinâmicas e total do escoamento em Pa,  $\rho$  é a massa específica do escoamento em  $\text{kg/m}^3$ ,  $R$  é constante do gás em  $\text{J/kg.K}$ ,  $T$  é a temperatura absoluta do escoamento em K e  $V$  a velocidade local do escoamento em m/s.

## 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. O banco de ensaios contém um equipamento do tipo laser de difração Malvern Mastersizer X, mostrado na Fig. (3). 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 e um reservatório graduado. A vazão mássica é calculada através da variação da massa do reservatório em um intervalo de tempo de 100s.

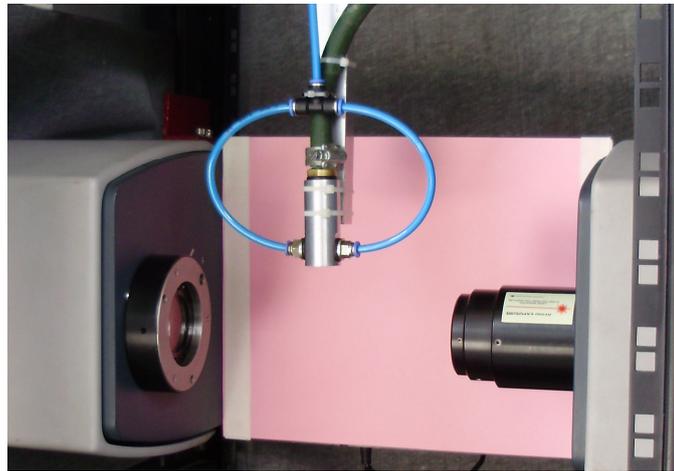


Figura 3. Banco de Ensaio de Injetores

No banco de ensaios de injetores, o injetor é montado em um cabeçote o qual é conectado a duas linhas de fluxo, uma para o líquido e outra para o ar assistido. O líquido utilizado para simular o combustível é água destilada. A pressão de injeção de líquido é controlada através de uma panela de pressão pressurizada com nitrogênio. A pressão de injeção de ar é controlada através de um regulador de pressão. As faixas de pressão utilizadas nos ensaios são de 100 a 6000 kPa para a injeção de líquido e 100 a 400 kPa para o ar assistido. A incerteza dos valores de pressão, obtida pela metade da menor escala do manômetro, é 10 kPa. As propriedades da água utilizadas como referência para os cálculos de vazão mássica, velocidades locais e números de Weber e Ohnesorge são mostradas na Tab. (1).

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

<b>massa específica (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	992
<b>tensão superficial (N/m)</b>	0.075
<b>viscosidade dinâmica (Pa.s)</b>	0.00102

O injetor de combustível líquido, mostrado na Fig. (4), consiste de três partes: o injetor de líquido, o corpo de injeção, e a camisa de ar. O corpo central de injeção, o qual contém o injetor de líquido, é montado internamente na camisa de ar. Na extremidade inferior do corpo de injeção esta o orifício do injetor e na extremidade superior esta a conexão de entrada de líquido. A camisa de ar possui duas entradas de ar opostas diametralmente com diâmetro de  $\frac{1}{4}$ ". O orifício de injeção, mostrado no detalhe (c) da Fig. (2) possui diâmetro de 0.6mm. Internamente ao corpo de injeção existem três orifícios radiais de 0.3mm, cuja função é rotacionar o líquido em direção a saída do injetor.

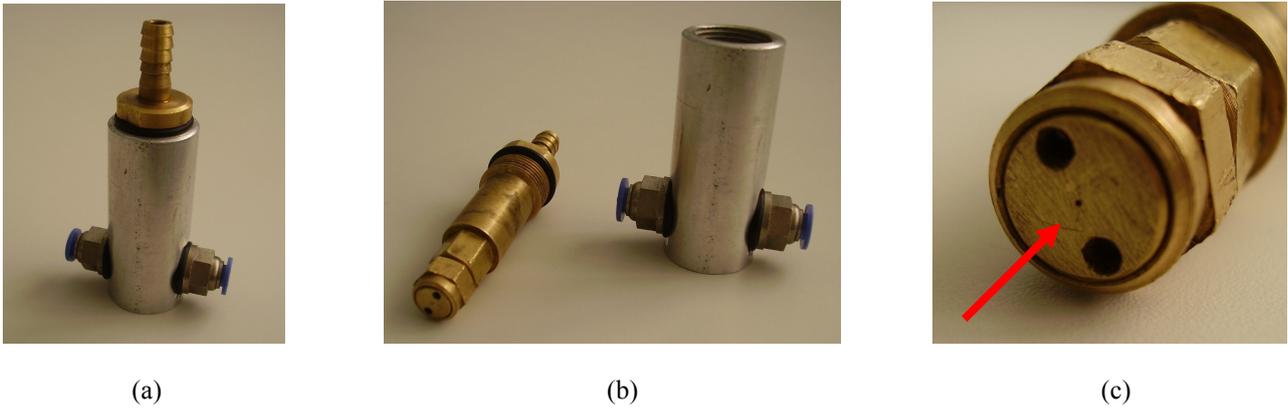


Figura 4. Injetor de Combustível Líquido  
 (a) Conjunto Montado, (b) Corpo de Injeção à esquerda e Camisa de Ar à direita,  
 (c) detalhe do Orifício de Injeção de Líquido na Extremidade do Corpo de Injeção

Os perfis de velocidade do ar assistido, na saída do injetor, são obtidos utilizando o pitot em um sistema de translação de três eixos, permitindo medições axiais e radiais nos planos de saída do injetor. Os eixos de referência tomados para o injetor são mostrados na Fig. (5). A pressão dinâmica do escoamento, que corresponde a diferença entre a pressão total e a pressão estática, foi obtida utilizando um sensor de pressão diferencial Freescale MPX-5010DP, conectado nas tomadas de pressão do pitot. O sensor possui faixa de medição de 0 a 10kPa com incerteza de 0,01kPa.

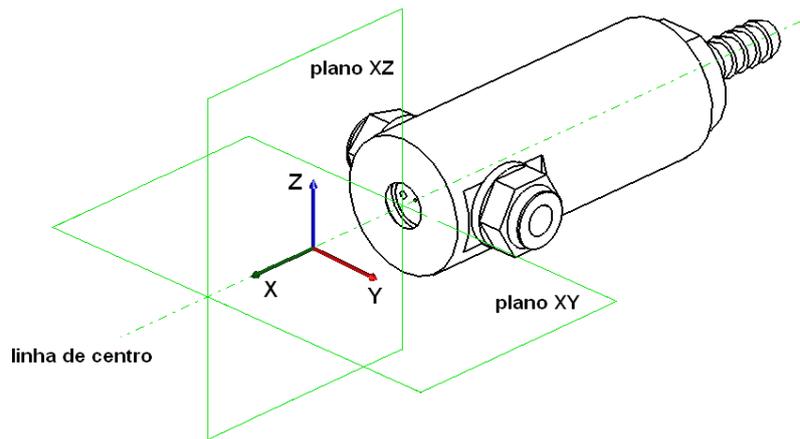


Figura 5. Eixos e Planos de Referência para o Injetor

O sistema de aquisição de dados esta embarcado ao equipamento laser, o qual está conectado ao computador de controle via porta serial. O software de aquisição e tratamento dos dados experimentais provenientes do laser foi desenvolvido pelo próprio fabricante do equipamento. O esquema do sistema de aquisição é mostrado na Fig. (6).

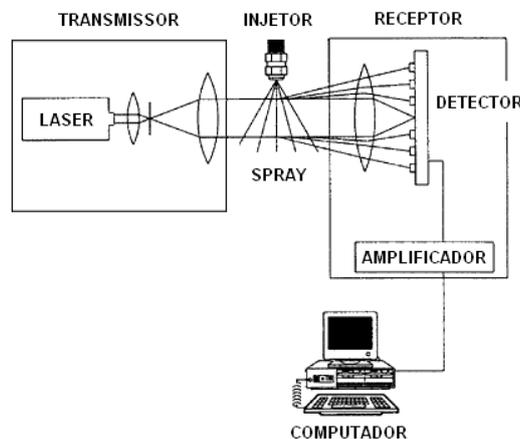


Figura 6. Esquema do Sistema de Aquisição

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Determinação dos Perfis de Velocidade

Para os ensaios de determinação do perfil de velocidades na saída do injetor foram realizadas medições com o tubo pitot montado no sistema de três eixos. Para as medições ao longo da linha de centro do injetor, o tubo pitot foi deslocado em intervalos de 3mm na direção axial a partir da saída do injetor. Em cada ponto de medição é obtido o valor da diferença de pressão no pitot, que corresponde à pressão dinâmica, para cálculo da velocidade local nesse ponto através da Eq. (6). Para as medições nos planos XY e XZ, o tubo pitot foi deslocado em intervalos de 1.5mm na direção radial, em ambos os sentidos, e deslocado em intervalos de 3mm na direção axial.

### 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. Os resultados são apresentados de forma automática pelo equipamento ao final do ensaio.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Velocidades Médias do Ar Assistido na Saída do Injetor

As velocidades médias do ar assistido na seção de saída do ar foram obtidas utilizando o tubo pitot em diferentes posições ao longo do sentido radial. A Figura (7) correlaciona as velocidades médias obtidas em função da pressão de injeção de ar, sem injeção de líquido.

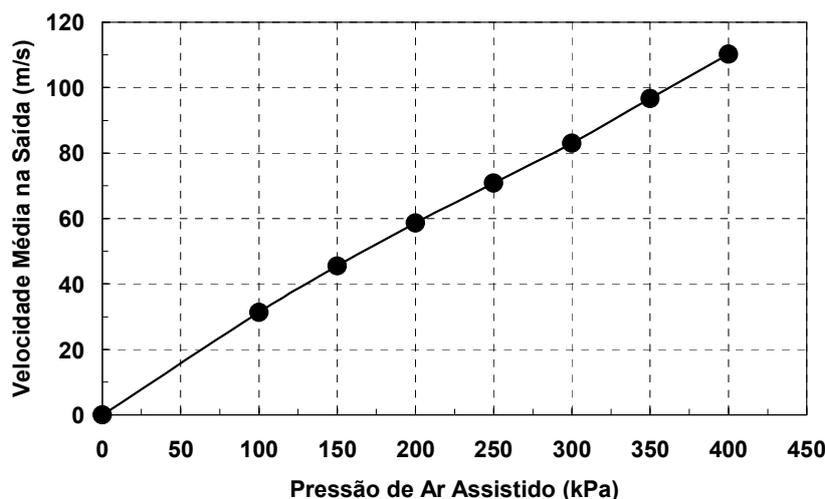


Figura 7. Velocidade Média do Ar Assistido na Saída do Injetor em função da Pressão de Ar

### 5.1. Perfis de Velocidade do Ar Assistido na Saída do Injetor

Os perfis de velocidade mostrados a seguir foram obtidos para a linha de centro do injetor, na direção X, e nos planos perpendiculares XY e XZ, referentes à Fig. (5). Para os perfis mostrados a seguir foi utilizada uma pressão de injeção de ar de 300 kPa. Nos planos XY e XZ são mostrados as velocidades em distâncias axiais de 0, 6 e 12mm.

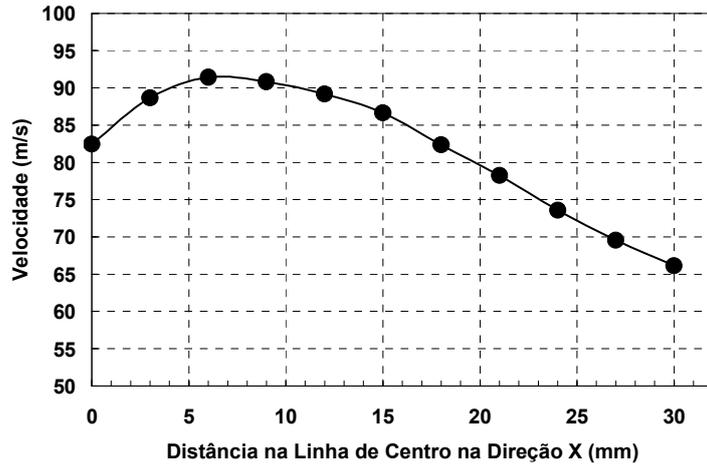


Figura 8. Perfil de Velocidade do Ar sobre a Linha de Centro para Pressão de Ar de 300kPa

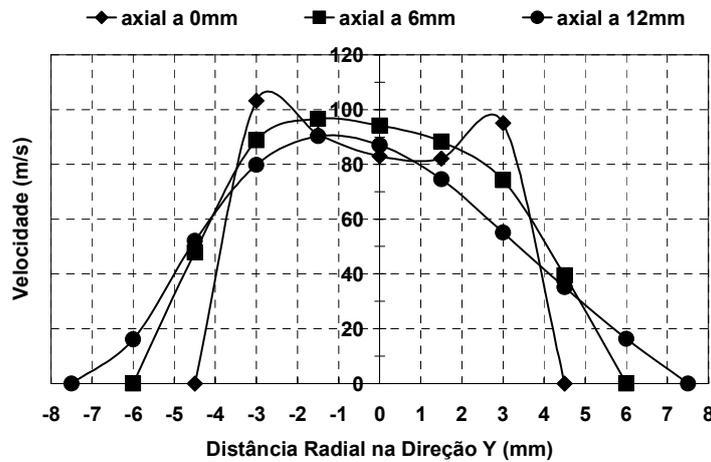


Figura 9. Perfil de Velocidade no Plano XY em Diferentes Distâncias Axiais para Pressão de Ar de 300kPa

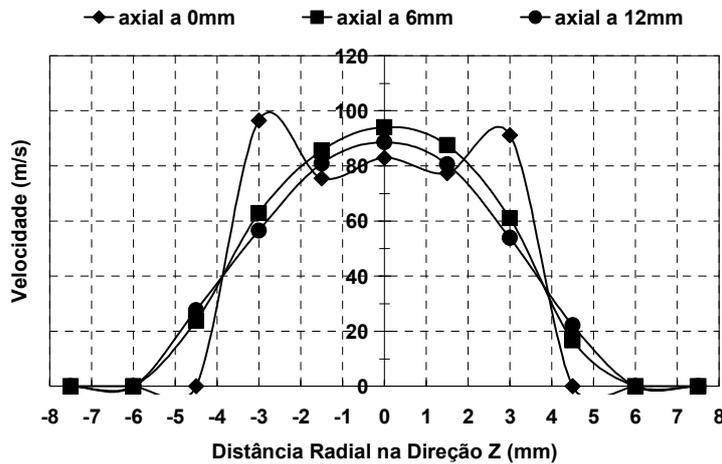


Figura 10. Perfil de Velocidade no Plano XZ em Diferentes Distâncias Axiais para Pressão de Ar de 300kPa

Através das Figs. (8), (9) e (10) verifica-se que o máximo de velocidade do ar assistido, sob a linha de centro do injetor, ocorre a aproximadamente 5mm de distância do orifício injetor. Esse comportamento ocorre porque na seção de saída do ar assistido o escoamento ainda possui componente de velocidade radial. As Figuras (9) e (10) mostram que a configuração adotada para as entradas de ar, opostas diametralmente, conseguem gerar fluxos simétricos em relação à linha de centro do injetor.

Com relação à incerteza dos valores de velocidade obtidos através do tubo-pitot, realizou-se uma análise numérica combinando-se as incertezas relativas das variáveis envolvidas no cálculo da velocidade. Para os valores de pressão dinâmica e pressão total do escoamento têm-se um incerteza relativa de 0,1%. Para o valor da temperatura, a incerteza é de 1,5%. A incerteza combinada para a velocidade é de aproximadamente 1,5% do valor de medição.

### 5.2. Coeficiente de Descarga do Injetor de Combustível

Os valores do coeficiente de descarga obtidos para o injetor com 0.6mm de diâmetro, nos ensaios com pressão de injeção de líquido variando de 100 a 400 kPa, são mostrados na Fig. (11). Para a faixa de pressão analisada, o coeficiente de descarga manteve-se constante, com valor médio de 0.477.

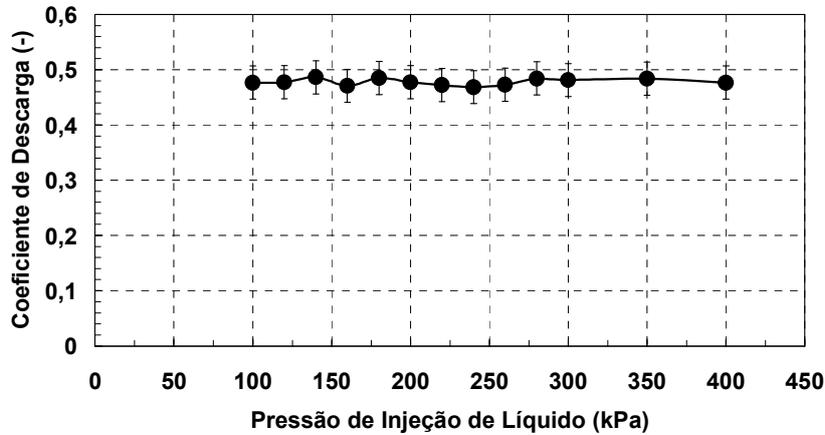


Figura 11. Coeficiente de Descarga do Injetor

### 5.3. Ângulo de Abertura do Spray

Os ângulos de abertura do spray do injetor são para algumas condições de operação são apresentados a seguir. Para toda a faixa de operação do injetor reproduzida no banco de ensaios, que abrange desde pressão de líquido de 100 kPa sem assistência de ar até pressão de líquido de 600 kPa e assistência de ar a 400 kPa, nota-se que não ocorre grande variação em relação ao ângulo de abertura do spray. O comportamento de fechamento do ângulo de spray com o aumento da pressão de ar é esperado visto que o ar assistido desempenha papel de aprisionar o envelope do spray.

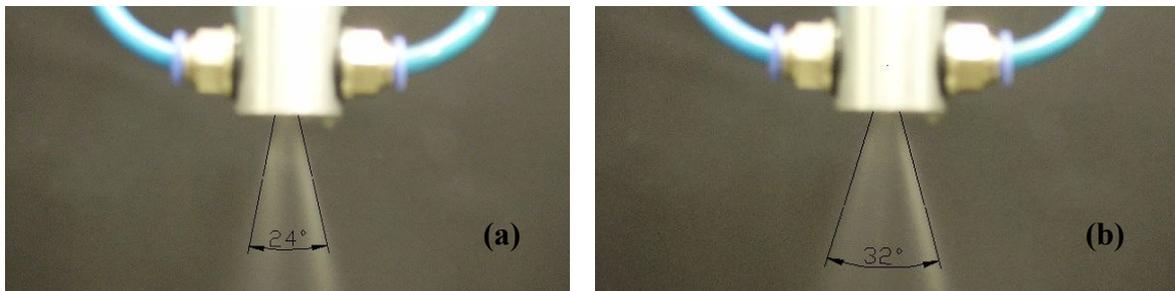


Figura 12. Ângulo de Abertura do Spray sem Ar Assistido  
(a) Pressão de Líquido de 100 kPa, (b) Pressão de Líquido de 600 kPa

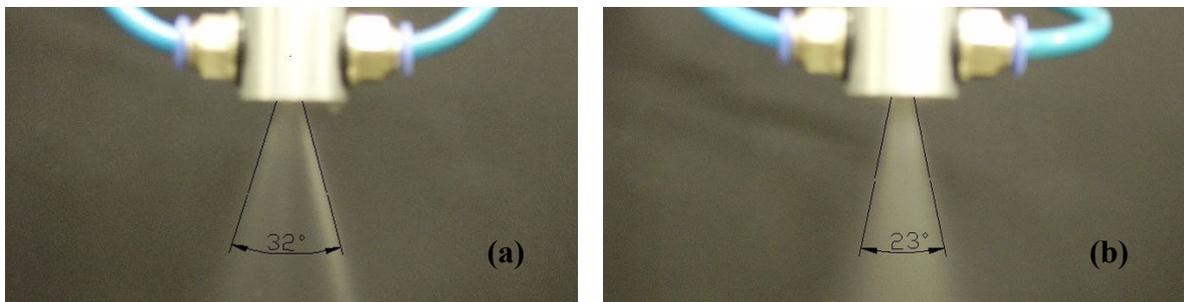


Figura 13. Ângulo de Abertura do Spray sem e com Ar Assistido  
(a) Pressão de Líquido de 600 kPa sem ar assistido, (b) Pressão de Líquido de 600 kPa e Pressão de Ar de 400 kPa

### 5.4. Caracterização do Processo de Atomização

Os números de Weber e Ohnesorge referentes aos regimes de injeção de combustível líquido, com e sem assistência de ar, são mostrados na Tab. (2). Os números de Weber na ordem de 1000 e 10000 obtidos nos ensaios indicam que o regime de ruptura do líquido realizado no injetor é satisfatório para a atomização.

Tabela 2. Números de Weber e Ohnesorge Característicos da Injeção

pressão de líquido (kPa)	número de Weber / número de Ohnesorge				
	pressão de ar assistido (kPa)				
	sem ar	100	200	300	400
100 ± 10	163 / 0.0032	-	-	-	-
200 ± 10	268 / 0.0029	-	-	-	-
300 ± 10	343 / 0.0026	1754 / 0.0061	5979 / 0.0111	9531 / 0.0142	11516 / 0.0155
400 ± 10	412 / 0.0025	1323 / 0.0045	4969 / 0.0083	8943 / 0.0118	10919 / 0.0130
500 ± 10	451 / 0.0024	1018 / 0.0035	4269 / 0.0073	8122 / 0.0101	10387 / 0.0141
600 ± 10	483 / 0.0022	755 / 0.0028	3653 / 0.0061	7336 / 0.0087	9922 / 0.0102

### 5.5. Diâmetros Médios das Gotas

O comportamento dos diâmetros médios de Sauter das gotas geradas pelo injetor na condição sem ar assistido é mostrado na Fig. (14). A Figura (15) mostra o comportamento do diâmetro de Sauter para a condição de atomização com assistência de ar, para diferentes condições de injeção de líquido e ar assistido.

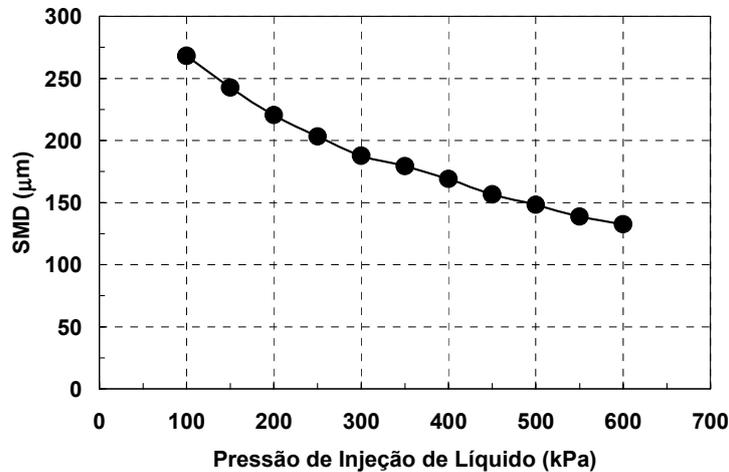


Figura 14. Diâmetros Médios de Sauter em função da Pressão de Líquido sem Ar Assistido

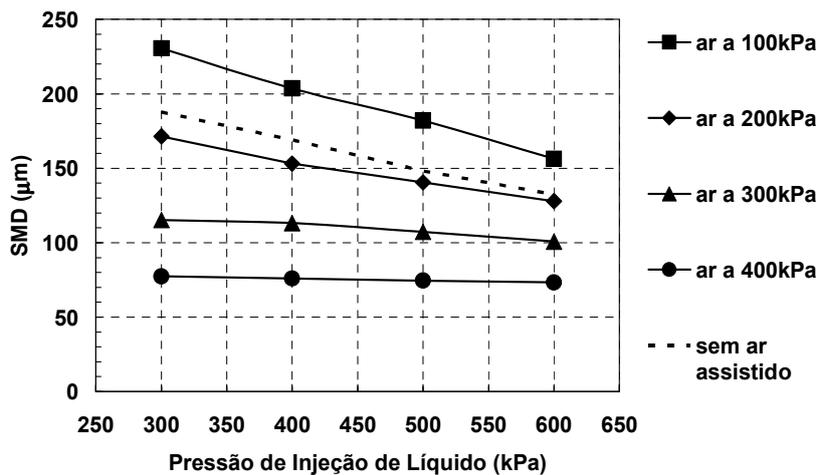


Figura 15. Diâmetros Médios de Sauter em função da Pressão de Líquido e da Pressão de Ar Assistido

Pelas Figuras (14) e (15) pode-se verificar que com o aumento da pressão de injeção de líquido, ocorre redução no tamanho médio das gotas do injetor. Para a condição de injeção assistida com pressão de ar de 100kPa nota-se que ocorre aumento do tamanho das gotas em relação a condição não-assistida. Esse comportamento ocorre provavelmente devido ao efeito de coalescência entre as gotas, provocadas por uma baixa razão entre a velocidade do ar assistido e a velocidade do spray de líquido.

Na medida em a pressão de ar assistido aumenta, e conseqüentemente as razões de velocidade também aumentam, ocorre redução no tamanho médio das gotas. Para a condição de pressão de ar de 400kPa verifica-se que o tamanho das gotas já não sofre influência da pressão de líquido. Isso ocorre porque o efeito de cisalhamento do filme líquido, antes predominante no orifício do injetor, agora passa a ser desempenhado pelo ar assistido.

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  $\mu\text{m}$ .

## 6. CONCLUSÕES

A metodologia apresentada para caracterização do injetor se mostrou adequada para obtenção dos parâmetros característicos de desempenho do injetor. O método experimental utilizado para determinar os ângulos de abertura do spray, apesar de pouco preciso, permite avaliar qualitativamente variações entre os diferentes regimes de injeção de líquido e ar, principalmente entre as condições mínimas e máximas de pressão.

Os perfis de velocidade obtidos nos planos de medição se mostraram simétricos em relação à linha de centro do injetor, validando a configuração física do injetor com tomadas de ar opostas diametralmente. O método de análise das razões de velocidade na saída do injetor com base nos valores médios de velocidades apresenta imprecisões e não permite avaliar completamente os fenômenos envolvidos na ruptura do filme líquido. Métodos de velocimetria a laser são mais precisos e podem ser empregados para análises mais complexas. Entretanto esses equipamentos possuem custo de aquisição muitas vezes superior ao aparato experimental baseado no laser de difração e tubo pitot.

## 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.

A Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada UNEFA, da Venezuela, pelo apoio no intercâmbio estudantil com o ITA.

## 8. REFERÊNCIAS

- Delmeé G. J. 1983. "Manual de Medição de Vazão". São Paulo: Editora Edgard Blucher. 474p.
- Hirleman D. E., Bohren C. F. 1991. "Optical Particle Sizing: an Introduction". Journal of Applied Optics, Vol. 30, Issue 33, pp. 4685-4687. doi:10.1364/AO.30.004685.
- Lefebvre. A. H. 1989. "Atomization and Sprays". Taylor & Francis. 417p.
- Liu A. B., Mather D., Reitz R. D. 1993. "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays". SAE Technical Paper Series 930072. Proceeding of SAE International Congress and Exposition. Detroit, Michigan.
- 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.

## DETERMINATION OF THE VELOCITY PROFILE AND THE MEAN DROP SIZES OF AN AIR-ASSISTED FUEL INJECTOR

**Abstract:** *This work presents the experimental methodology used to obtain the velocity profile and the drop size in an air-assisted liquid fuel injector. The objective is to obtain the outlet velocity profile at the injector at some operational conditions, characterizing the drop sizes with and without the use of assisted air. Other important performance parameters of the injector are also obtained, as the injector orifice discharge flow coefficient and spray angle. A liquid fuel injector test stand is used in the tests. All local air flow velocity obtained are measured using a pitot tube. The drop sizes, characterized by the Sauter mean diameter, are obtained by using the Malvern Mastersizer X laser equipment. This representative diameter is calculated by a numerical model applied to the volumetric drop size distribution of droplets generated by the injector. The drop sizes are measured using liquid injection pressure of 100 to 600 kPa and air pressure of 100 to 400 kPa. The results show the velocity profiles of the assisted air and the Sauter mean diameter of drop in function of assisted and non-assisted air conditions. The mean diameters at non-assisted conditions ranging from 260 to 130  $\mu\text{m}$  and for assisted conditions the diameters are from 230 to 70  $\mu\text{m}$ .*

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