X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais
7 a 9 de agosto de 2019

Coeficientes de Descarga de Injetores de Jato

DIAS, G.S., ANDRADE, J.C., FISCHER, G.A.A., COSTA, F.S.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão - LABCP

silvadias.gabriel@yahoo.com.br

Resumo. *Injetores de jato são frequentemente utilizados em motores foguete para promover a atomização dos propelentes. O coeficiente de descarga é um importante parâmetro para avaliação da performance de injetores. Esse trabalho compara os coeficientes de descarga de injetores de jato com e sem chanfro na entrada, utilizando-se água, etanol hidratado e etanol gelificado 72º INPM como fluidos de trabalho.*

Palavras-chave: Injetores de Jato; Coeficiente de Descarga; Etanol

1. Introdução

Injetores são utilizados para atomização de fluidos visando aumentar a sua área superficial. Este aumento possibilita alcançar altas taxas de evaporação e queima das gotas em um volume reduzido nas câmaras de combustão de foguetes.

Diversos parâmetros são empregados para verificação do desempenho dos injetores. O coeficiente de descarga é um parâmetro de performance definido como a razão entre a vazão mássica nominal e vazão mássica teórica. Devido às perdas viscosas no escoamento, ao atrito nas paredes do injetor e aos efeitos de cavitação, a vazão mássica nominal é menor que a vazão teórica (FISCHER, 2014).

O coeficiente de descarga de um injetor depende do número de Reynolds do escoamento interno, da geometria do orifício de saída do injetor, da pressão de injeção diferencial e da pressão ambiente (LEFEBVRE, 1989).

Diversos tipos de fluidos propelentes podem ser empregados em foguetes, incluindo líquidos e géis. Os géis são fluidos não newtonianos, ou seja, são materiais semilíquidos que possuem uma microestrutura complexa e podem ser descritos por modelos constitutivos em que o tensor de tensões é uma função não linear do tensor da taxa de deformação (FISCHER, 2019).

O objetivo desse trabalho é realizar a comparação dos coeficientes de descarga de injetores de jato com e sem entrada chanfrada, empregando-se como fluidos de trabalho água, etanol hidratado e etanol gelificado 72° INPM.

2. Metodologia

2.1 Bancada de trabalho e injetores

A bancada de testes empregada contém tanques de líquidos e géis, linhas de alimentação pressurizadas, válvulas de controle, medidores de vazão, transdutores de pressão e temperatura e um sistema de aquisição de dados, conforme mostra a Figura 1.

Dois injetores a jato com entrada chanfrada de 55º (Fig. 1c) foram fabricados em Alumínio 6351, para realização dos testes e comparação dos resultados com dados da literatura de injetores com entrada sem chanfro (LICHTAROWICZ et al., 1965).

Figura 1 - Bancada de testes e injetores

Para o cálculo da vazão mássica de géis foram medidas as massas de fluido escoando ao longo de um intervalo de tempo, utilizando-se uma balança semi-analítica Shimadzu BL3200HL e um cronômetro digital.

2.2 Fluidos de trabalho

Os fluidos de trabalho utilizados foram água, etanol hidratado e etanol gelificado 72° INPM.

O etanol hidratado combustível apresenta massa específica 809,3 kg/m³ e viscosidade 1,2 cP, a 20º C. As propriedades físicas do etanol gelificado 72° INPM são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas do etanol 72° INPM gelificado.

Propriedade	***Mínimo***	***Máximo***
Teor alcoólico (p/p) °INPM	69.55	75.27
Teor alcoólico (v/v) °GL	76.9	81.4
pH	6	8
Massa específica (kg/m³), a 20°C	850	860
Viscosidade (cP) em repouso, a 20°C	>12,000	

Fonte: FISCHER 2019

A viscosidade do etanol gelificado foi obtida em função da taxa de cisalhamento por meio de um reômetro Anton Paar, modelo MCR 72. A temperatura foi mantida constante a 25º C durante a varredura da taxa de cisalhamento.

A Figura 2 mostra a curva de viscosidade do etanol gelificado versus a tensão de cisalhamento, ajustada por uma lei das potências.

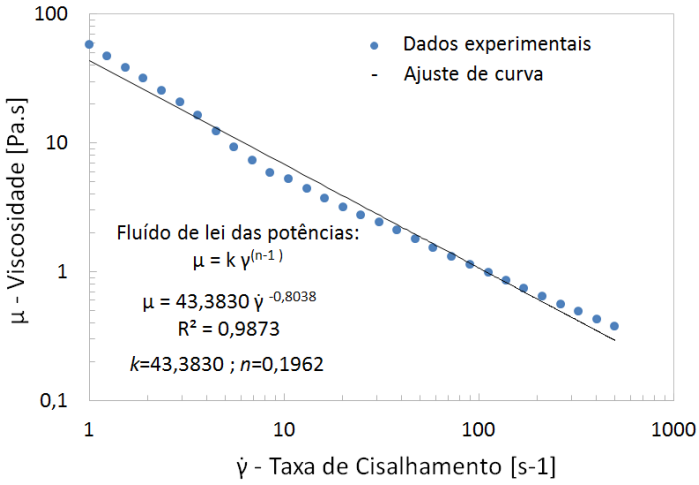

Figura 2 – Caracterização da viscosidade do etanol 72 ° INPM gelificado.

2.3 Número de Reynolds

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas em um escoamento:

$$Re = \frac{\rho \bar{u} d}{\mu} \tag{1}$$

onde ρ é a massa específica do fluido, d o comprimento característico do escoamento, $\bar{u}$ a velocidade média do escoamento e μ é a viscosidade do fluido.

O comportamento reológico de géis pode ser representado de acordo com fórmula de *Ostwald-de-Waele* ou por um modelo de lei das potências (*Power Law* - PL):

$$\eta_{PL} = K\dot{\gamma}^{n-1} \tag{2}$$

onde η é a viscosidade dinâmica, $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação, n o índice de comportamento e k o índice de consistência. Valores de k e n para o gel utilizado nesse trabalho foram determinados pelo ajuste de curva e estão indicados na Fig. 2.

Metzner e Reed (1955) introduziram um número de Reynolds generalizado válido para fluidos da lei das potências, dado por:

$$Re_{GEN-PL} = \frac{\rho d^n \bar{u}^{2-n}}{k\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n 8^{n-1}} \tag{3}$$

2.4 Coeficiente de Descarga

O coeficiente de descarga de um injetor é dado por:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{exp}}{\dot{m}_{teo}} \tag{4}$$

onde $\dot{m}_{exp}$ é a vazão mássica experimental e $\dot{m}_{teo}$ é a vazão mássica teórica máxima, para uma mesma pressão de injeção.

Para determinação da vazão mássica teórica máxima através do injetor considera-se a equação de Bernoulli em regime permanente, incompressível, não viscoso e irrotacional, resultando em:

$$\dot{m}_{teo} = A\sqrt{2\rho\Delta P} \tag{5}$$

onde A é área do orifício de saída, ΔP a queda de pressão no injetor e ρ é a massa específica do fluido.

Lichtarowicz et al. (1965) analisaram experimentalmente escoamentos de água e de solução viscosa de glicerina e água através de injetores sem chanfro de entrada (Fig. 3) e obtiveram uma correlação entre o coeficiente de descarga, o número de Reynolds e a relação L/d:

$$\frac{1}{C_d} = \frac{1}{C_{d,\max}} + \frac{20}{\mathrm{Re}}\left(1 + 2,25\frac{L}{d}\right) - \left(\frac{0,005(L/d)}{1 + 7,5\log(0,00015\,\mathrm{Re})^2}\right) \tag{6}$$

$$C_{d,\max} = 0,827 - 0,0085\left(L/d\right) \tag{7}$$

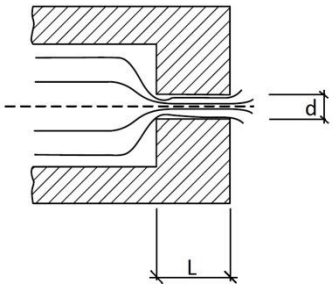

Figura 3 – Injetor a jato sem chanfro de entrada.

Fonte: Adaptado de Lefebvre (1989)

A Equação 6 é válida para números de Reynolds entre 10 e 20000, para relações L/d entre 2 e 10 e se aplicam somente a condições onde não há cavitação. Nesse trabalho, os valores de L e d são 8,0 e 0,8 mm (Fig.1c), respectivamente.

3. Resultados e Discussão

A Figura 4 mostra os coeficientes de descarga medidos em função do número de *Re* para injetores de jato com chanfro na entrada, usando diferentes fluidos de trabalho, e os valores calculados pela Eq. (6) para injetores de jato sem chanfro na entrada (Fig. 3).

Valores de C_d obtidos para água e etanol hidratado líquido utilizando o injetor com chanfro na entrada (Fig. 1c) apresentam boa concordância para $Re > 5500$ e $Re < 12000$ com relação aos valores calculados para injetores sem chanfro de entrada.

Para o etanol gelificado, valores de *Re* foram obtidos utilizando a Eq. (3). Valores de C_d estão entre 1,5 e 2 vezes abaixo dos valores obtidos com um injetor de entrada sem chanfro.

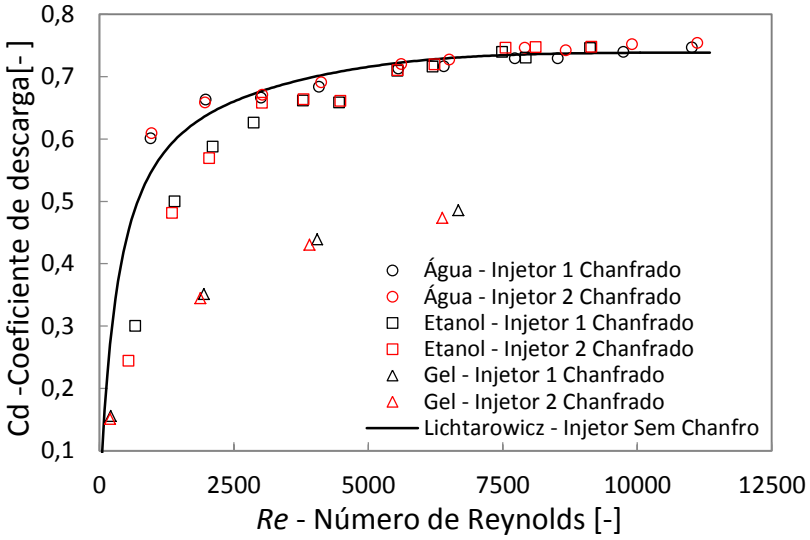

Figura 4 – Coeficientes de Descarga em função de *Re* para diferentes fluidos de trabalho

4. Conclusão

Valores dos coeficientes de descarga de injetores de jato plano com entrada chanfrada foram obtidos para água, etanol hidratado e etanol gelificado 72º INPM, em função do número de Reynolds. Os resultados foram comparados com dados da literatura para injetores com entrada sem chanfro. Os coeficientes de descarga de injetores com entrada chanfrada para $5500 < Re < 12000$, nos casos de água e etanol hidratado líquido, apresentaram boa concordância com os coeficientes de descarga dos injetores com entrada sem chanfro, provavelmente devido à turbulência do escoamento. No caso do etanol gelificado, os coeficientes de descarga foram obtidos em termos de um número de Reynolds generalizado com base na lei de potência. Os resultados obtidos foram

significativamente inferiores aos calculados para injetores com entrada sem chanfro, provavelmente devido à viscosidade elevada e ao comportamento não newtoniano do etanol gel.

Agradecimentos: Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio através do processo 2016 / 21957-0 e à CAPES pela bolsa de Mestrado concedida ao primeiro autor.

Referências

BERGWERK, W. Flow Pattern in Diesel Nozzle Spray Holes, Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 173, No. 25, pp. 655-660, 1959.

FISCHER, G. Atomização de Géis por Injetores Centrífugos e Jato-Centrífugos para Aplicações em Propulsão de Foguetes. São José dos Campos: INPE, Tese de Doutorado, 2019.

FISCHER, G. Injetores Centrífugos duais e Jato-Centrífugos para Aplicação em Propulsão de Foguetes. São José dos Campos: INPE, Dissertação de Mestrado, 2014.

LEFEBVRE, A.H. Atomization and Sprays. New York: Taylor Francis, 1989.

LICHTAROWICZ, A.; DUGGINS, R.K.; MARKLAND, E. Discarge Coefficients for Incompressible Non-cavitating Flow Trought Long Orifices, J. Mech. Eng. Sci. Vol. 7, No.2, pp 210-219, 1965.

METZNER, A.B.; REED, J.C. “Flow of non-Newtonian fluids – correlation of the laminar, transition and turbulent-flow regions”. AIChE J., Vol. 1, No. 4, pp. 434-440, 1955.