

CAPACIDADE DE SUCÇÃO DE UM JATO DE PLASMA LIVRE

Aruy Marotta e Alfredo Gonçalves Cunha

Instituto de Física "Gleb Wataghin"
 Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
 13081 -Campinas, SP - Brasil

Neste trabalho estudamos o arraste de gás ambiente produzido por um jato de plasma de uma tocha de plasma estabilizada por vórtice de gás. Foram realizadas medidas de temperatura e velocidade no interior do jato de plasma, utilizando uma sonda de entalpia, que permitiram calcular os fluxos de massa e de energia no jato. Do fluxo de massa, concluiu-se que um forte arrastamento, ou sucção de ar ambiente, ocorre ao longo do jato de plasma. A semelhança de um jato isotérmico de gás, observa-se claramente a existência de duas regiões, a primeira, mais próxima ao bocal, com rápido crescimento do arraste, e a segunda, mais afastada, com um crescimento mais lento do arraste. Observou-se uma rápida diminuição da temperatura média com a distância ao bocal. Conclui-se também que o fluxo de energia pode ser usado para calibração da sonda de entalpia.

INTRODUÇÃO

Uma das características mais importantes de um jato de gás é a sua capacidade de arraste, isto é, a capacidade de sucção de gás ambiente e o resultante aumento aparente da massa de gás que flui do jato. São duas as causas que podem contribuir para a ocorrência desse fenômeno: o nível de turbulência nas componentes transversais da velocidade e a vorticidade do jato [1-3]. O problema do arraste tem consequências importantes para diversas aplicações das tochas de plasma, como na deposição à plasma e na construção de fornos à plasma.

Neste trabalho mostramos, utilizando uma sonda de entalpia ou sonda calorimétrica [4], que o arraste, num jato de plasma com vorticidade, apresenta um comportamento semelhante ao do jato isotérmico de gás. A sonda de entalpia possibilitou a realização de medidas de perfis de entalpia e pressão dinâmica, e destes, o cálculo da temperatura e velocidade em três seções ao longo de um jato de um maçarico de plasma à arco elétrico estabilizado por vórtice. Através das integrais de fluxo de massa, calculadas para os três planos, obteve-se a massa de ar ambiente que é arrastada pela turbulência e vorticidade do jato. Esse cálculo explica, qualitativamente, a forte queda na temperatura média do plasma, bem como a observada estabilidade espacial do jato de plasma no eixo do maçarico.

A sonda de entalpia [5-7], construída de pequenas dimensões, tem grandes vantagens quando comparada com outras técnicas de diagnóstico. Além de permitir medi-

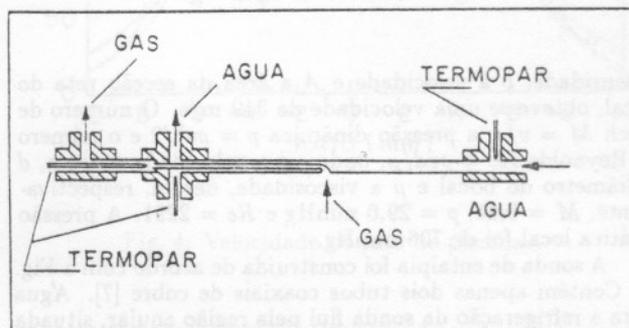


Fig. 1: Sonda de entalpia.

das locais de vários parâmetros importantes (temperatura, pressão, velocidade, composição), é de simples construção e de fácil interpretação dos resultados. A capacidade da sonda de entalpia de efetuar a medida da temperatura cinética das partículas pesadas é da maior importância para os plasmas térmicos.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi utilizado um maçarico de plasma à arco elétrico, com catodo de zircônio, estabilização do arco por vórtice e funcionando à ar comprimido. O diâmetro interno do anodo é de 9,52 mm e o comprimento de 120 mm. As medidas com a sonda de entalpia, que descrevemos abaixo, foram feitas à uma potência elétrica de 21,6 kW, tensão de 230 V, corrente de 94 A e vazão de gás de $1,613 \times 10^{-8}$ kg/s.

Para se obter a eficiência térmica do maçarico e as características médias do jato de plasma na saída do bocal (entalpia do plasma e temperatura) medimos as perdas térmicas para os eletrodos através da água de refrigeração. A entalpia média do jato de plasma na saída do bocal foi calculada pela fórmula $\eta = \Delta h G / P$, onde η é a eficiência, $\Delta h = h_2 - h_1$ é a elevação da entalpia do gás, G é a vazão de gás e $P = UI$ é a potência elétrica. Utilizando-se tabelas [8] pode-se obter a temperatura média do plasma em função da entalpia. Nas condições acima obteve-se uma eficiência de 61%, potência térmica de 13,18 kW, entalpia de 8600 kJ/kg e temperatura média do plasma no bocal de 4340 K.

Para a determinação das características hidrodinâmicas do fluxo de plasma, é necessária uma estimativa para a velocidade do jato. Utilizando a fórmula $G = \rho v A$, onde ρ é

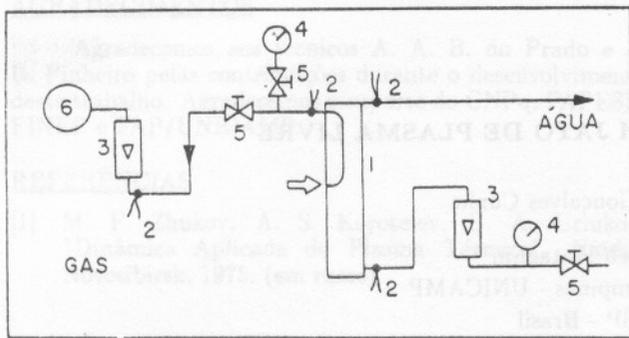


Fig. 2: Sistema de água e gás.

a densidade, v a velocidade e A a área da secção reta do bocal, obteve-se uma velocidade de 349 m/s. O número de Mach $M = v/c$, a pressão dinâmica $p = \rho v^2/2$ e o número de Reynolds $Re = \rho v d/\mu$, onde c é a velocidade do som, d o diâmetro do bocal e μ a viscosidade, deram, respectivamente, $M = 0,26$, $p = 29,6$ mmHg e $Re = 2291$. A pressão estática local foi de 706 mmHg.

A sonda de entalpia foi construída de acordo com a Fig. 1. Contém apenas dois tubos coaxiais de cobre [7]. Água para a refrigeração da sonda flui pela região anular, situada entre os tubos. Uma amostra de gás quente é aspirada do fluxo de plasma pelo tubo interno da sonda. A água é, então, aquecida, tanto pelo gás que flui no tubo interno, quanto diretamente pelo plasma, através da parede externa da sonda. O balanço térmico permite determinar a entalpia do plasma, h_{1g} , através da equação

$$\dot{m}_g(h_{1g} - h_{2g}) = (\dot{m}_a c_{pa} \Delta T_a)_{flux} - (\dot{m}_a c_{pa} \Delta T_a)_{no-flux}, \quad (1)$$

onde \dot{m}_g e \dot{m}_a são, respectivamente, as vazões de gás e água, h_g é a entalpia do gás, c_{pa} é o calor específico da água, ΔT_a é a elevação da temperatura da água e os índices 1 e 2 representam as condições na entrada e na saída da sonda.

A sonda foi construída com um diâmetro externo de 3,94 mm e um diâmetro interno do tubo de gás de 1,67 mm. O tubo externo tem 0,18 mm de espessura de parede e o tubo interno, 0,22 mm. Essas dimensões dos tubos foram obtidas por corrosão química com hipoclorito de ferro. O tubo de gás foi soldado ao tubo de água com solda prata. O comprimento total da sonda é de 20 cm. A sonda é refrigerada à água na pressão de 4 atm, vazão em torno de 0,5 l/min. O sistema de refrigeração da sonda e de amostragem do gás são apresentados na Fig. 2. A vazão de gás na sonda foi aproximadamente de 50 l/h. Uma válvula, ao ser fechada, permite medir a pressão dinâmica do plasma num manômetro. Para a medida da temperatura foram usados termopares do tipo J (ferro-constantan).

Ao ser realizada a medida na condição de "não-fluxo", determinou-se também a pressão dinâmica do plasma na entrada da sonda. A pressão estática no interior do jato foi considerada igual à pressão ambiente. O conhecimento da pressão dinâmica permitiu obter-se a velocidade do plasma na direção z (eixo do jato) através da fórmula $p - p_0 = \rho v^2/2$, onde p é a pressão total.

A partir das medidas de temperatura e velocidade foi possível calcular os fluxos de massa e energia, que atravessam

um plano perpendicular ao eixo do jato, pelas fórmulas:

$$G_z = \int_0^R \rho v 2\pi r dr, \quad (2)$$

para o fluxo de massa e

$$P_z = \int_0^R \rho v h 2\pi r dr, \quad (3)$$

para o fluxo de energia, onde R é o raio do jato.

Uma das características mais importantes dos jatos é a sua capacidade de arraste, isto é, do aumento de sua massa às expensas do gás circundante. A característica do arraste é dada pelo parâmetro:

$$\Delta G = (G_z - G)/G, \quad (4)$$

onde G_z é calculado por (2) e G é a massa de gás que sai pelo bocal. O estudo do arraste, em função da distância, e grau de vorticidade, é apresentado em [3], para o fluxo de gás isotérmico. No nosso caso, além do gás estar ionizado (plasma), o fluxo apresenta grande inhomogeneidade. Entretanto, como veremos, certas características dos fluxos isotérmicos parecem prevalecer para o jato de plasma.

Ao contrário do jato sem vórtice, o jato com vórtice apresenta duas regiões distintas de variação de ΔG com z/d . A primeira região, imediatamente após o bocal, apresenta rápido aumento de ΔG com z/d e não depende da densidade do gás ambiente. Na segunda região, mais afastada do bocal, o arraste de gás com vórtice cresce mais lentamente que na primeira região, e, para o jato de gás isotérmico, é dado pela fórmula [3]:

$$\Delta G = \left(a \frac{z}{d} + k \frac{\theta}{2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}, \quad (5)$$

onde k e a são constantes determinadas experimentalmente e ρ_1 e ρ_2 , respectivamente, são as densidades do jato e do gás ambiente e θ representa o grau de vorticidade.

RESULTADOS

As medidas de temperatura e velocidade foram feitas em três planos normais ao eixo do jato de plasma, distantes da saída do canal em $z = 13, 25, 50$ mm. Em cada plano, foram levantados de 10 a 14 pontos, distantes um do outro de 1,27 mm. Em cada ponto, foram feitas três medidas, na situação de fluxo, e três, na situação de não-fluxo.

Os três perfis de temperatura e velocidade são mostrados, respectivamente, nas Figs. 3 e 4 e o ajuste aos dados experimentais foi realizado usando as funções $T(r) = T_0 \exp(-ar^2) + T_a$ e $v(r) = v_0 \exp(-br^2)$, sendo $T_a = 300$ K a temperatura ambiente.

O arraste de massa, ΔG , apresentado na Fig. 5, foi calculado pela fórmula (2), onde $G = 1,6 \times 10^{-3}$ kg/s. A Fig. 5 mostra que o comportamento do jato de plasma tem semelhança com o jato isotérmico de gás com vorticidade, apresentando duas regiões distintas, uma próxima ao bocal, com forte crescimento do arraste, e outra, mais afastada, com crescimento mais lento. A transição de uma região para a outra é observada em $z/d = 5$, no jato isotérmico [3], enquanto no nosso caso a transição se deu em $z/d \leq 1$. Devido à insuficiência de dados, não é possível especificar exatamente os limites da primeira região. O ajuste aos pontos experimentais da Fig. 5 dá para segunda região $z/d > 1$,

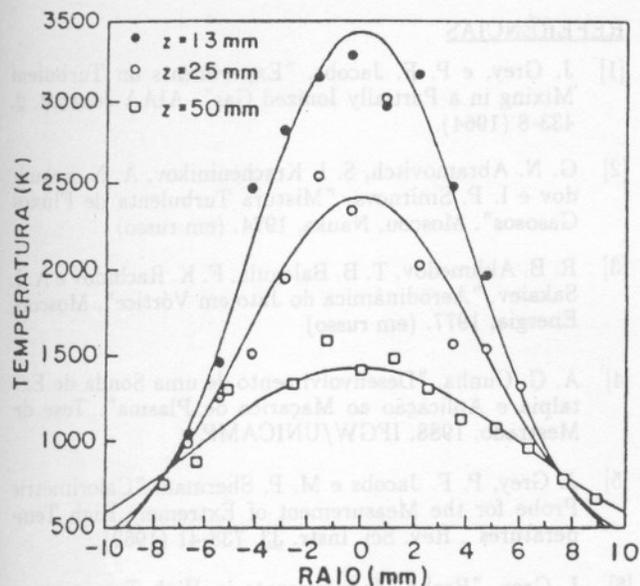


Fig. 3: Temperatura do jato de plasma.

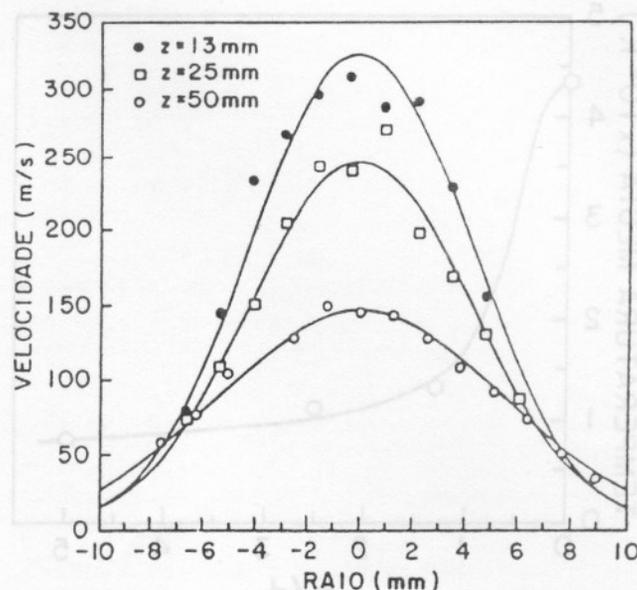


Fig. 4: Velocidade do jato de plasma.

a reta: $\Delta G = 3.833 + 0.463z/d$.

Na Fig. 6 vemos o comportamento da temperatura média do jato, calculada para $z=13, 25, 50$ mm pela fórmula $H_z = P_z/G_z$, onde H_z é a entalpia média. Para $z = 0$, a temperatura foi calculada pelo balanço térmico na tocha. A temperatura média do jato cai de 4340 K, no bocal da tocha, para 1700 K em $z/d = 1$. O arraste medido em $z/d = 1$ é $\Delta G \cong 4,5$. Como vemos, há uma grande queda da temperatura média na região $0 < z/d < 1$, caindo menos rapidamente para $z/d > 1$. Esse comportamento da temperatura está em acordo com o comportamento do arraste (Fig. 5), mostrando que o arraste tem por efeito um forte resfriamento do jato de plasma.

O balanço de energia P_z/P é apresentado na Fig. 7, onde P é o fluxo de energia no bocal. Em $z/d \geq 3$ obtivemos $(P_z - P)/P \cong -0,2$. Este déficit de 20% de energia pode ser explicado como devido às medidas terem terminado em $r < r_0$, onde r_0 é a máxima extensão radial do jato. Esse gráfico serve para se ter uma idéia geral da precisão da experiência, podendo servir para calibração do sistema. Tendo em vista o alto nível de arraste, um desvio de 20% é suficientemente pequeno para não invalidar os resultados obtidos.

CONCLUSÕES

Foram feitas medidas dos perfis de temperatura e velocidade, utilizando uma sonda de entalpia, ao longo de um jato de ar de uma tocha de plasma com vórtice. O cálculo do arraste de gás mostrou que o comportamento do jato de plasma com vórtice tem semelhança com o jato isotérmico de gás, apresentando duas regiões distintas no arraste, uma próxima ao bocal, com forte crescimento do arraste, e outra mais afastada, com um crescimento mais lento do arraste. Mostramos que a rápida queda da temperatura média do jato está correlacionada com o forte arrastamento de gás ambiente produzido pelo jato. Conclui-se também que o

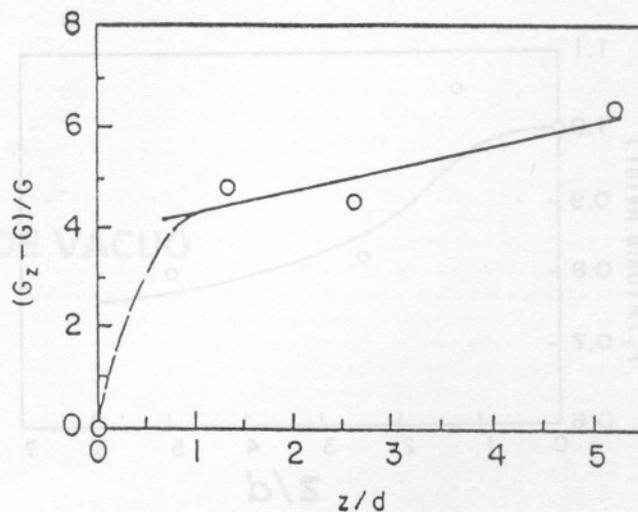


Fig. 5: Arraste de massa.

fluxo de energia pode ser usado para calibração da sonda de entalpia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos J. B. Pinheiro e A. A. B. do Prado pelas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos o suporte financeiro do CNPq, FAPESP e FINEP.

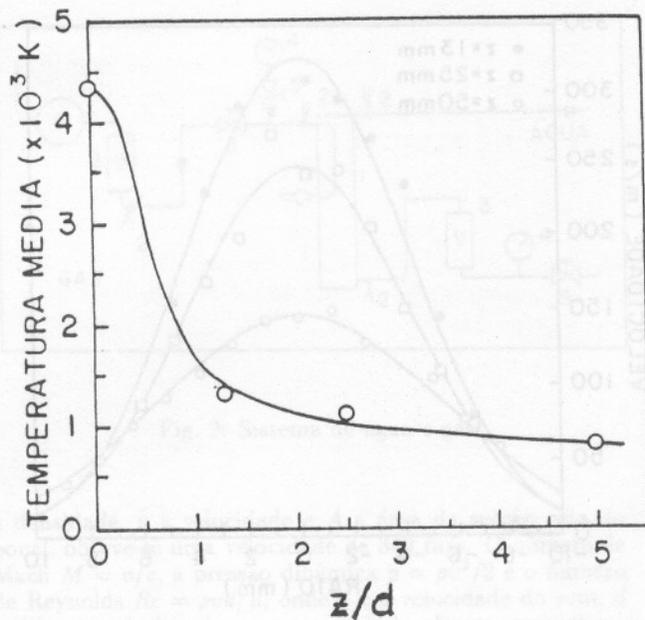


Fig. 6: Temperatura média do jato de plasma.

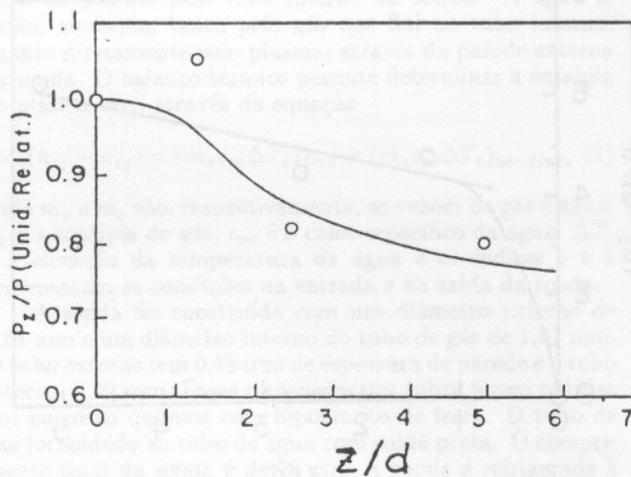


Fig. 7: Balanço de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Grey, e P. F. Jacobs, "Experiments on Turbulent Mixing in a Partially Ionized Gas". AIAA Journal. 2. 433-8 (1964).
- [2] G. N. Abramovitch, S. I. Kracheninikov, A. N. Sekundov e I. P. Smirnova, "Mistura Turbulenta de Fluxos Gasosos". Moscou, Nauka, 1974. (em russo)
- [3] R. B. Akhmedov, T. B. Balagula, F. K. Rachidov e A. I. Sakaiev, "Aerodinâmica do Jato em Vórtice". Moscou, Energia, 1977. (em russo)
- [4] A. G. Cunha, "Desenvolvimento de uma Sonda de Entalpia e Aplicação ao Maçarico de Plasma". Tese de Mestrado, 1988, IFGW/UNICAMP.
- [5] J. Grey, P. F. Jacobs e M. P. Sherman, "Calorimetric Probe for the Measurement of Extremely High Temperatures". Rev. Sci. Instr. 33, 738-41 (1962).
- [6] J. Grey, "Probe Measurements in High Temperature Gases and Dense Plasmas", in "Temperature Measurements", Addison Wesley, 337-48, 1978.
- [7] S. V. Dresvin, editor. "Physics and Technology of Low Temperature Plasmas" The Iowa State University Press/AMES, 1977.
- [8] N. B. Vargaftik, "Tabela de Propriedades Termofísicas de Gases e de Líquidos", Nauka, Moscou, 1972. (em russo)