ESTUDO DE UM FORNO TÚNEL AQUECIDO POR UMA TOCHA DE PLASMA

Aruy Marotta, Luíz Otávio B. da Silva e Luíz Otávio M. da Silva

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

RESUMO

Neste trabalho são apresentados alguns resultados preliminares do estudo de um forno túnel aquecido por uma tocha de plasma de ar comprimido estabilizada por vórtice. O objetivo é verificar a possibilidade de obtenção de grandes volumes, aquecidos à altas temperaturas, com alta eficiência, por tochas de plasma de média potência. Temperaturas de mais de 1.600 °C, com pequenos gradientes, foram obtidas. Um modelo matemático simples, similar à carga e descarga de um capacitor, permitiu determinar a temperatura no estado estacionário, a constante de tempo, a capacidade térmica e a resistência térmica do forno, para cada posição espacial. Estes resultados permitiram prever o comportamento do forno para diferentes potências da tocha de plasma, como também possibilitaram a visualisação do comportamento da dinâmica do gás no interior do forno.

INTRODUÇÃO

Fornos à óleo, gás combustível ou à resistência elétrica são largamente utilizados na indústria em inúmeras aplicações que, em sua maioria, requerem temperaturas de até 1.400 °C. Dificuldades de caráter técnico-econômico começam a aparecer acima dessa temperatura, onde os problemas de eficiência, custo dos fornos, segurança operacional, fragilidade dos elementos térmicos e poluição ambiental são significativos.

Na literatura são encontrados fornos à plasma, ou reatores químicos [1-5], para o tratamento de finos ou gases. Atingem temperaturas muito altas, sendo comuns temperaturas bem acima de 2.000 °C. São usados para a decomposição e redução térmica de minerais, na destruição de rejeitos industriais tóxicos, na síntese de pós cerâmicos, e em muitas outras aplicações industriais.

A vantagem do emprego do plasma em processos industriais se fundamenta no fato de que, nas condições de altas temperaturas, as transferências térmicas e as velocidades das reações químicas são bem mais rápidas, o que possibilita a realização de processos que, nas condições habituais, ou ocorrem lentamente, ou são simplesmente impossíveis de realizar. A Fig. 1 [3] mostra os níveis de eficiência de uma combustão química em relação à eficiência de uma tocha de plasma de ar, num processo de transferência de calor para uma temperatura de trabalho de 1.340 °C. Nesse caso, se um processo de combustão aquece um sólido à essa temperatura, sómente 36 % da energia é transferida para o sólido, enquanto que se a fonte de calor for uma tocha de plasma à ar, existe a possibilidade de transferência de 88 % da energia.

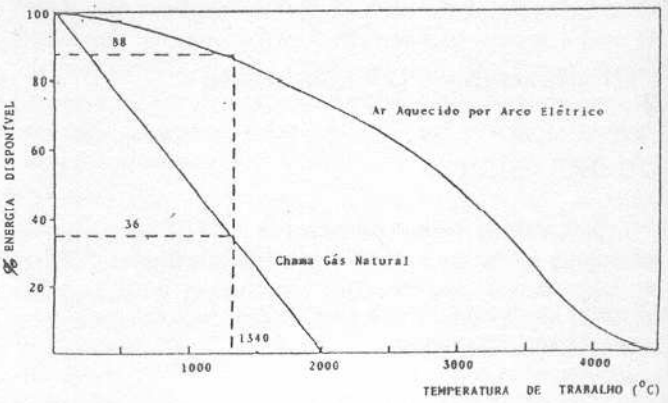

Fig. 1: Energia disponível em uma chama de gás natural e no plasma de uma tocha de ar [3].

As tochas de plasma podem realizar o aquecimento de quaisquer gases, sejam eles oxidantes, neutros ou redutores. A escolha do gás é feita levando-se em conta apenas as exigências do processo. Isso permite aos sistemas à plasma um grau à mais de liberdade quando comparados aos sistemas que empregam a combustão. Em outras palavras, a vazão de gás e a potência térmica podem ser variadas independentemente uma da outra. O uso de qualquer tipo de gás implica, também, que os processos são muito mais limpos, com baixíssimos níveis de poluição ambiental.

Os altos níveis de entalpia obtidos com as tochas à plasma resultam em muito menor volume de gás produzido para o mesmo nível de potência térmica, quando comparado com a combustão. Em consequência, as perdas térmicas carregadas para fora dos fornos pelos gases são também muito menores. Frequentemente são utilizados circuitos fechados nos projetos dos sistemas térmicos à plasma com a quase total eliminação de gases para a atmosfera.

Uma característica importante dos plasmas dos gases de moléculas mais simples (ar, argônio, nitrogênio) é o baixo nível de radiação térmica em comparação com a combustão. Nas condições do plasma as perdas por radiação térmica para as paredes dos fornos são muito menos importantes do que na combustão.

A alta densidade de energia das tochas de plasma resulta em sistemas térmicos compactos e de baixo custo. Existem em funcionamento industrial geradores de plasma com potências que vão desde algumas centenas de watts até vários megawatts, com eficências de 80 a 95 % de conversão

de energia elétrica em térmica.

As vantagens de um forno aquecido por tochas de plasma, quando comparado aos de resistências ou aos de combustão é a possibilidade de:

- utilização do forno em qualquer atmosfera gasosa;
- eliminação da fragilidade do elemento térmico;
- trabalho em temperaturas mais altas;
- maior densidade de energia;
- baixa inércia térmica;
- instalações mais compactas;
- atmosfera limpa, sem a presença de produtos da combustão;
- alta eficiência de utilização da energia;
- baixo volume de gases eliminados para a atmosfera.

Tomando por base uma tocha de plasma de ar comprimido desenvolvida em nosso laboratório e capaz de operar por mais de 50 horas sem reposição dos eletrodos é que decidimos realizar um estudo afim de verificar a possibilidade de obtenção de grandes volumes, aquecidos à altas temperaturas, com alta eficiência, por uma tocha de plasma de média potência. Neste trabalho são apresentados alguns resultados experimentais preliminares do estudo de um forno túnel aquecido por essa tocha de plasma.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O forno construído neste projeto é do tipo túnel cilíndrico, com 3 metros de comprimento, 15 cm de diâmetro interno, com paredes de cerâmica refratária (9 manilhas de alumina que podem ser encaixadas umas às outras, de 33 cm de comprimento cada, espessura de parede 20 mm), revestidas com 4 camadas de manta de cerâmica isolante Kawool de baixa densidade, espessura de 25 mm. Cada manilha possui 2 furos opostos, ao longo do diâmetro, que permitem a observação e medidas no interior do forno e a passagem de transdutores, como termopares e sondas de entalpia. Termopar do tipo R (Platina-Platina/Ródio 13 %, temperatura máxima 1700 °C) foi utilizado para as medidas no interior do forno.

A tocha de plasma foi montada numa das extremidades do forno. Uma flange de latão, com o mesmo diâmetro do forno, refrigerada à água, foi montada no anodo da tocha, de forma a impedir a entrada de ar ambiente no interior do forno. A idéia do fechamento do forno, do lado em que é instalada a tocha de plasma, é sugerida pela observação, obtida com a utilização de uma sonda de entalpia [6], de que o jato de plasma livre induz forte arrastamento de ar ambiente, que, como consequência, produz acentuada queda de temperatura da chama. O aumento da impedância do ar ambiente para penetrar no jato de plasma deve resultar num menor volume de gás e, portanto, numa temperatura mais elevada do forno.

O confinamento do jato de plasma em ambiente fechado do forno, entretanto, resulta também em profunda alteração da hidrodinâmica do jato de plasma. Utilizando uma flange transparente, no lugar da flange metálica, para vedar a entrada de gás ambiente, foi possível observar o movimento da chama. Ao contrário do jato de plasma livre, que adquire uma forma lanciforme, o eixo da chama, no interior do forno fechado, tende a girar ao redor do eixo da tocha, ao longo de uma superfície cônica, e o ângulo de abertura da chama é bem maior que na chama livre. A consequência desse comportamento é uma forte transferência de calor para a superfície interna do forno, principalmente na região inicial deste, próxima à tocha.

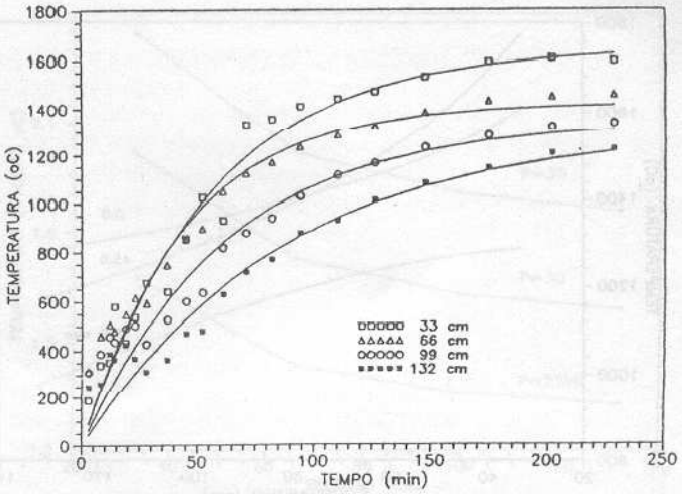

Fig. 2: Variaccão da temperatura do forno em $r = 0.0$ em função do tempo. Dados experimentais e curvas de ajuste.

A tocha de plasma à arco elétrico utilizada neste trabalho, é do tipo não-transferido, com canal reto e polaridade direta (anodo à jusante, catodo à montante), estabilizada pelo fluxo em vórtice do gás, com catodo de zircônio prensado e anodo tubular de cobre. A câmara de vórtice, situada entre o catodo e o anodo, provê o gás de rotação e estabiliza o arco no eixo do canal. A tocha funciona com ar comprimido, fornecido por um compressor de ar e é alimentada por uma fonte de potência DC de 50 kW. Os eletrodos da tocha são refrigerados à água em circuito fechado e as vazões são de aproximadamente 1 l/min para o catodo e 5 l/min para o anodo. A iniciação do arco é obtida com uma fonte de ignição de RF de 10 kV. A tocha opera de forma estável por mais de 50 horas em correntes de 100 A.

As condições experimentais de operação da tocha de plasma no forno foram: potência elétrica - 24,6 kW, tensão - 246 V, corrente - 100 A, vazão de ar - 1,4 g/s, eficiência - 77,7 %, potência térmica - 19,1 kW, entalpia média - 13,7 x 10 kJ/kg, temperatura média - 5.820 K.

RESULTADOS

O forno foi aquecido durante 4 horas pela tocha de plasma de ar comprimido, a uma taxa de aquecimento máxima de 20 °C/min. As medidas de temperatura foram tomadas ao longo do tempo, a cada 33 cm de distância ($z = 33$ cm, $z = 66$ cm, $z = 99$ cm e $z = 132$ cm) e em três posições radiais $r = 0,0$ mm (centro do forno), $r = 45,0$ mm e $r = 75,0$ mm (parede). São apresentados apenas os resultados das medidas para os primeiros 1,32 metros de comprimento do forno.

Na Fig. 2 vemos o comportamento da temperatura

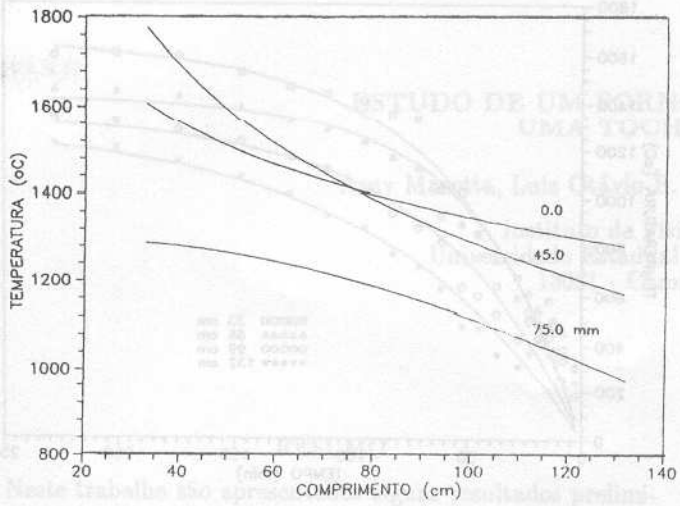

Fig. 3: Temperatura do forno em $r = 0,0$ em função do comprimento.

em função do tempo para diferentes posições longitudinais e para $r = 0,0$ mm. São apresentados os dados experimentais e os ajustes à equação não-linear do tipo

$$T = T_f \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \qquad (1)$$

Consideramos que o aquecimento do forno pode ser representado por um modelo matemático de carga e descarga de um capacitor em um circuito RC, onde C é a capacitância e R a resistência de descarga. A fonte de tensão corresponde à energia fornecida pela tocha, que fornece uma potência térmica P, a capacitância C corresponde à capacidade térmica do forno, a resistência R corresponde à resistência térmica do forno e T_f é a temperatura final do forno, no estado estacionário. A constante de tempo de aquecimento do forno é $\tau = RC$ e entre P, T_f e R é válida a relação $PR = T_f$. O ajuste não-linear da equação acima aos pontos experimentais, permitiu determinar a temperatura final, a constante de tempo, a capacidade térmica e a resistência térmica em todas as posições.

Na Fig. 3 temos a temperatura final de estabilização em função do comprimento do forno, nas três posições radiais. Ressalta nessa figura a assimetria do jato de plasma, causando uma temperatura mais alta em $r = 45,0$ mm do que em $r = 0,0$ mm, nas regiões próximas à tocha. Vemos também que o gradiente longitudinal é maior para regiões próximas à tocha do que para as regiões mais afastadas, principalmente em $r = 0,0$ mm. Da Fig. 3 podemos deduzir a existência de uma camada isolante de gás

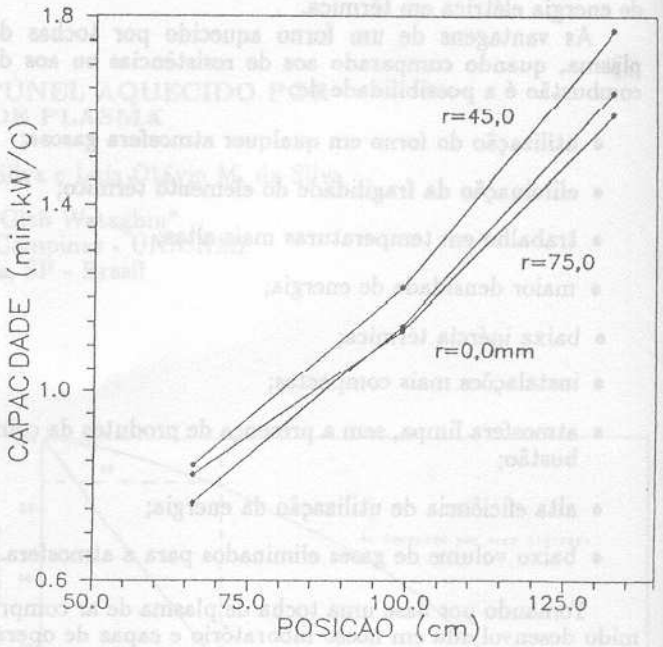

Fig. 4: Variação da capacidade térmica do forno ao longo do comprimento.

junto à parede, o que pode ser devido ao aumento da espessura da camada limite e à diminuição da turbulência. Esse efeito isolante do gás fica melhor ressaltado nas Fig. 4 e 5, onde estão representadas a capacidade térmica e a resistência térmica do forno em função de z nas três posições radiais.

Nota-se que a capacidade térmica não apresenta muita diferença nas três posições radiais, pois esta, obviamente, depende fortemente da parede cerâmica e não do gás. Vemos que a capacidade térmica cresce com z, enquanto a resistência decresce. Interessante, observar na Fig. 5, onde vemos o isolamento térmico, praticamente constante em z, produzido pela camisa de gás, da órdem de 7,5 °C/kW, enquanto a parede apresenta um valor que varia de 50 à 40 °C/kW no intervalo de 66 cm. Notamos também uma tendência para um aumento maior do isolamento na região central do forno, em $r = 0,0$ mm.

A Tabela 1 lista os valores obtidos para as temperaturas finais T_f (°C), as constantes de tempo τ (min), a capacidade C (min.kW/ °C) e a resistência térmica R (°C/kW) nas três posições radiais e nas quatro posições longitudinais.

Com os resultados obtidos acima, é possível estimar a potência da tocha de plasma necessária para se alcançar

Tabela 1: Temperatura final, constante de tempo, resistência e capacidade térmica do forno

z (cm)	33			66			99			132		
r (mm)	75,0	45,0	0,00	75,0	45,0	0,00	75,0	45,0	0,00	75,0	45,0	0,00
T_f (x10^3 °C)	1,29	1,80	1,65	1,23	1,41	1,42	1,12	1,32	1,34	0,98	1,21	1,31
τ (min)	9,00	9,20	5,50	4,10	4,80	4,40	5,10	6,50	6,20	6,30	8,70	8,70
R (°C/kW)	5,22	7,33	6,70	4,99	5,75	5,76	4,53	5,35	5,44	3,96	4,93	5,31
C (minkW/°C)	1,72	1,26	0,82	0,82	0,84	0,76	1,13	1,22	1,14	1,59	1,77	1,64

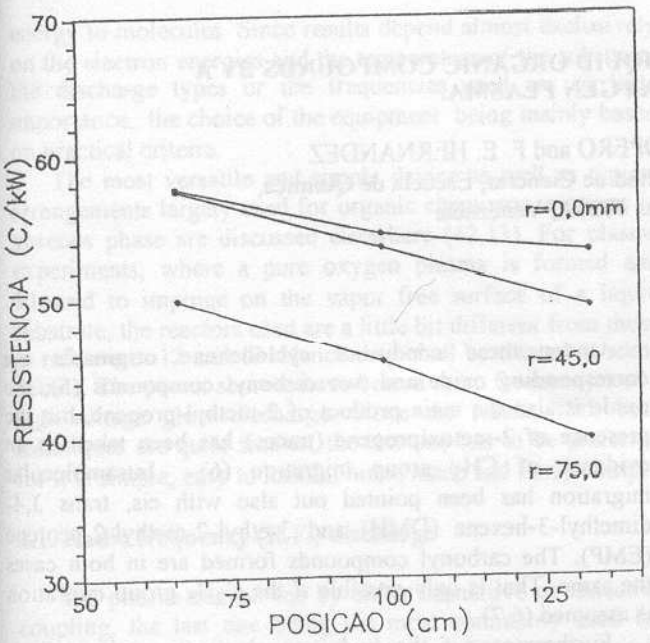

Fig. 5: Variação da resistência térmica do forno ao longo do comprimento.

determinada temperatura no interior do forno, em determinada posição em z e em r. Na Fig. 6 apresentamos os resultados dessa estimativa. Estão representadas as temperaturas no centro do forno para as potências elétricas de 25, 30 e 35 kW da tocha de plasma.

Considerando-se que a tocha funcionou 4 horas, após o que o forno se aproximou das condições estacionárias de temperatura, conclui-se que a energia elétrica consumida foi de 98,4 kWh, o que representou um custo total de aproximadamente US$ 10,00, de energia elétrica, a um custo unitário de US$ 0,10/kWh.

CONCLUSÕES

Temperaturas acima de 1500 °C, com pequenos gradientes, foram obtidas num forno de dimensões médias industriais. Observou-se que as paredes se encontram à pelo menos 200 °C abaixo da temperatura do centro do forno. Um modelo matemático simples, similar à carga e descarga de um capacitor, permitiu determinar a temperatura no estado estacionário, a constante de tempo, a capacidade térmica e a resistência térmica do forno, para cada posição espacial. Estes resultados permitiram prever o comportamento do forno para diferentes potências da tocha de plasma, como também possibilitaram a visualisação do comportamento da dinâmica do gás no interior do forno.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos técnicos A. A. B. do Prado e J. B. Pinheiro pelas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos o suporte do CNPq, FAPESP, FINEP e FAP/UNICAMP.

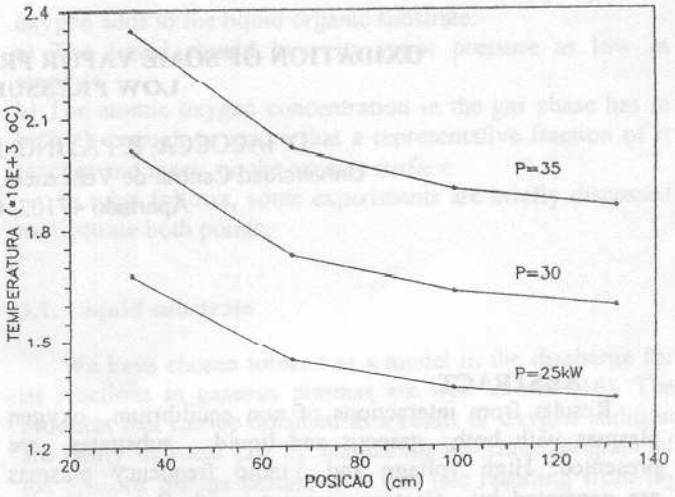

Fig. 6: Estimativa da temperatura do forno em $r = 0,0$ em função da potência elétrica da tocha.

REFERÊNCIAS

[1] Drouet, M. G., "Plasma Technology: Review of the State of the Art and its potential in Canada", Report for the Canadian Electrical Association, IREQ, March 1984.

[2] Down, M. G., "Plasma Processing for Materials Production", Final report prepared by Westinghouse Electric Corp. EPRI report EN-2771, Project 1275-9, 1982.

[3] Ettlinger, L. A., Nainan, T. D., Ouellette, R. P., Cheremisinoff, P. N., "High Temperature Plasma Technology Applications" in "Electrotechnology", Vol.6, Ann Arbor Science Publishers Inc., Michigan, 1980.

[4] Tumanov, I. N., "Plasma de Baixa Temperatura e Campos Eletromagnéticos de Alta Frequência nos Processos de Obtenção de Materiais para a Indústria Nuclear", Energoatomisdat, Moscou, 1989. (em russo)

[5] Mossé, A. L., Burov, I. S., "Tratamento de Materiais Dispersos em Reatores à Plasma", Nauka i Technika, Minsk, 1980.(em russo)

[6] Marotta, A., Cunha, A. G., "Entrainment of Gas Into a Plasma Jet Measured With an Enthalpy Probe", Procedings of the 10th International Symposium on Plasma Chemistry, Bochum, Germany, 1991.