



SIMULAÇÃO DE OXIDAÇÃO DE FERRO À ALTA TEMPERATURA VIA JATO DE OXIGÊNIO LÍQUIDO

Rodrigo Ferreira Martins

Humberto Araujo Machado

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP

Av. Shishima Hifume, 2911, 12244-000, São José dos Campos, SP, Brasil

(55) 12-3947-1005, machado@univap.br

Resumo. *Um importante processo químico presente em diversas aplicações tecnológicas é a reação de oxidação do ferro à altas temperaturas, gerando óxido de ferro e liberando energia. Essa reação é essencial nos processos de corte a gás de chapas de aço carbono, e pode ser observada em outras aplicações em que o material ferroso atinge alta temperatura em ambientes de grande concentração de oxigênio molecular. Uma característica fundamental desses processos é aplicar o calor gerado na reação para efetuar o corte ou algum tipo de aquecimento superficial, reduzindo o gasto de energia. Em geral, o oxigênio é depositado na forma gasosa, através de uma chama para pré-aquecimento. Foi demonstrado que o fluxo de uma corrente de fluido na forma de gotas micrométricas possibilita um excelente controle do processo de deposição dessas gotas. Neste trabalho é estudado o impacto de um jato de gotas de oxigênio líquido sobre o aço carbono aquecido. Os processos químico e térmico que ocorrem quando essas gotas impactam uma placa de aço são modelados e simulados, e os resultados são comparados com dados experimentais já disponíveis. O objetivo é verificar se o processo ocorre abaixo do ponto de fusão do ferro, a partir de qual temperatura e em que estado físico ocorre, e se é capaz de manter-se com o próprio calor gerado na reação. Tal conhecimento permitiria estudar o uso desse processo no corte de chapas de aço com possível economia de energia.*

Palavras-chave: *oxi-corte, oxidação do ferro, oxigênio líquido*

1. INTRODUÇÃO

Um importante processo químico presente em diversas aplicações tecnológicas é a reação de oxidação do ferro a altas temperaturas, gerando óxido de ferro (Fe_3O_4) e, sendo uma reação exotérmica, liberando energia no processo (Kuo, 1986). Essa reação é comum e essencial nos processos de corte a gás de chapas de aço carbono (Okomura e Taniguchi, 1982), e pode ser observada em outras aplicações em que o material ferroso atinge alta temperatura em ambientes de grande concentração de oxigênio molecular, como alguns equipamentos de oxidação e propulsão. Uma possibilidade de melhorar o aproveitamento da energia nos processos citados é aplicar o calor gerado nessa reação para efetuar o corte ou mesmo algum tipo de aquecimento superficial, reduzindo o gasto de energia, procedimento que é usualmente adotado no corte de aço e outras ligas ferrosas. Assim, é possível que uma grande concentração de oxigênio favoreça o início da reação, liberando energia em quantidade suficiente para sua manutenção, ou pelo menos facilite esse processo, numa escala maior que com o uso (corrente) de oxigênio aquecido nas chamas de oxi-corte.

Poulikakos & Waldvogel (1997) demonstraram que o fluxo de uma corrente de fluido na forma de gotas micrométricas possibilita um excelente controle do processo de deposição dessas gotas, e

aplicou essa técnica na soldagem de elementos de placas de circuitos, o que possibilitaria o uso de uma corrente de gotas de oxigênio líquido no processo de corte ou soldagem de ligas ferrosas.

Neste trabalho é investigada a reação de oxidação do ferro ao sofrer impacto de um jato de gotas de oxigênio líquido. Os processos químico e térmico que ocorrem quando essas gotas impactam uma placa de aço carbono são modelados, simulados e comparados com dados experimentais obtidos através de um procedimento simplificado. O objetivo é verificar se o processo ocorre abaixo do ponto de fusão do aço, a partir de qual temperatura ocorre, e se mantém com o próprio calor gerado na reação.

2. ANÁLISE DO PROCESSO EXPERIMENTAL

Empregando-se o processo de decomposição de jatos em gotas (*Rayleigh Break up*) foi desenvolvido um gerador de gotas de oxigênio líquido (*liquid oxigem – LOX*), que permite variar o diâmetro das gotas através da variação da frequência de geração de um pulso elétrico. A vazão obtida foi de aproximadamente 0,031 g/s de LOX. O fluxo de gotas foi aplicado na superfície de uma placa de aço hipoeutético, *AISI No. C 1020* - composição química: 0.18-0.23 % C, 0.30-0.60 % Mn, 0.04 % máx. P e 0.05 % máx. S (Marks, 1958), aquecida por resistência elétrica. A menor largura da seção de teste garante que o aquecimento produzido por efeito Joule nessa seção será máximo, Fig. (1.a). Foi afixado um termopar logo abaixo da região de gotejamento, Fig. (1.b).

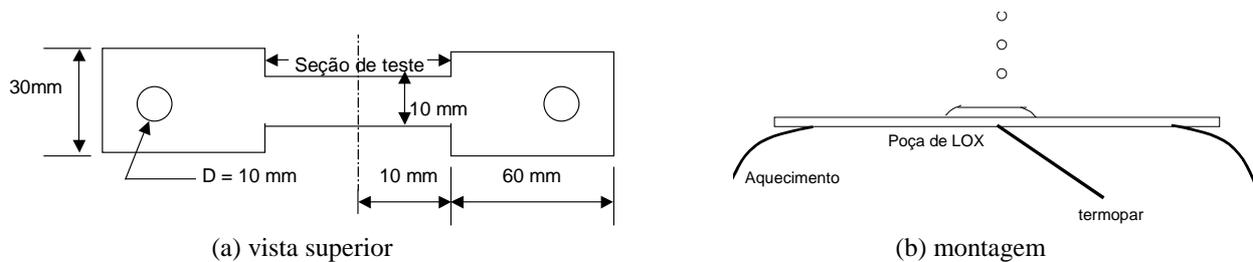


Figura 1. Corpo de prova (chapa com espessura de 1 mm).

Na Fig. (2), é mostrada a vista lateral do experimento, onde o jato de gotas impacta a chapa sobre a posição do termopar (na face inferior) e na Fig. (3) o perfil de temperatura durante o aquecimento.

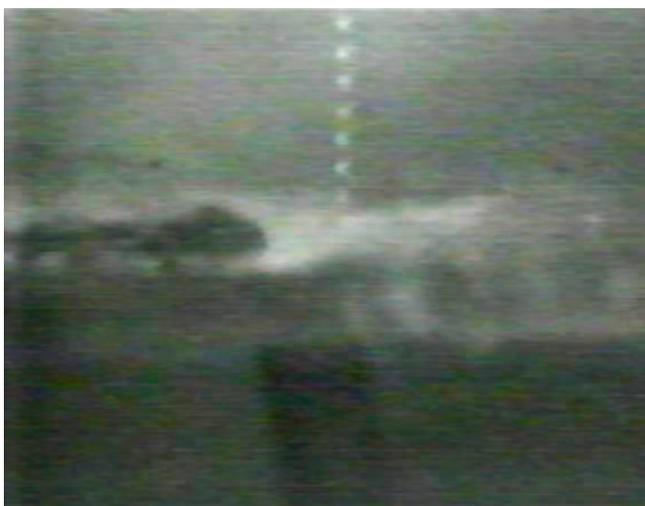


Figura 2. Vista lateral do experimento – gotas, placa e termopar.

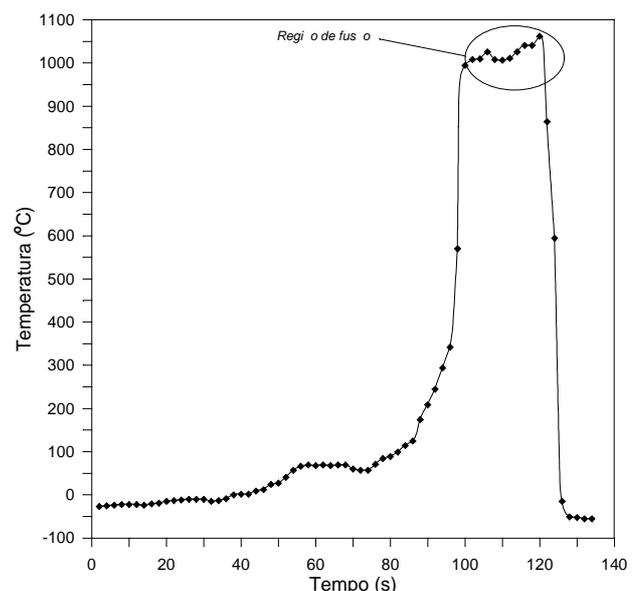


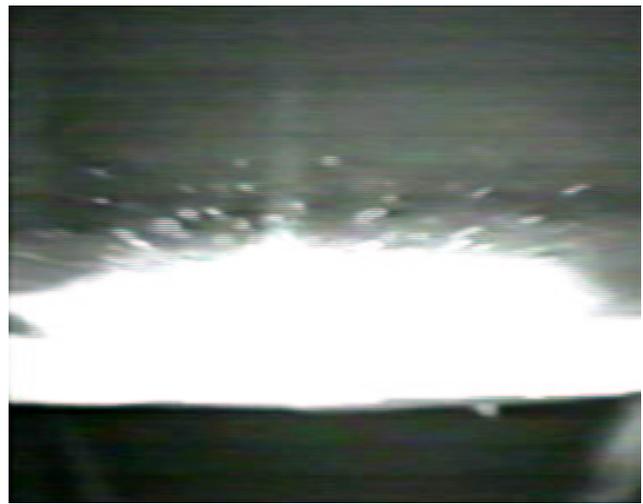
Figura 3. Temperatura medida na face inferior da placa.

A Fig.(4) mostra a evolução do processo. Na Fig.(4.a), após iniciado o pré-aquecimento, a chapa é aquecida ao rubro. Na Fig.(4.b), ocorre a reação e o corte, na Fig.(4.c) a placa foi perfurada e na Fig.(4.d) é possível observar o furo resultante, com a região em que o material fundido se depositou ao seu redor. O processo foi extremamente rápido gerando um furo pequeno, porém com uma zona fundida muito maior que suas dimensões, o que leva a crer que a reação se deteve na região de gotejamento, porém o material fundido foi espalhado pela rapidez explosiva da reação.

Do gráfico da Fig.(3), é possível observar que a temperatura na qual a fusão se inicia está em torno de 1000°C . Como ela foi medida numa região mais quente (a face inferior, onde não há LOX, que está a -90°C), deve-se supor que a fusão se iniciou em uma temperatura mais baixa que a medida. A temperatura de ignição em geral aceita é de 870°C (White Martins, 2000).



(a) Pré-aquecimento da chapa.



(b) Início da reação e formação da poça de fusão.



(c) O jato de gotas trespassa a chapa.



(d) Furo resultante.

Figura 4. Seqüência da oxidação após período de pré-aquecimento.

3. MODELO MATEMÁTICO

Os principais tipos de óxido de ferro formados durante a operação de corte e as reações de oxidação e calor liberado correspondentes são (Alberty e Silbey, 1996):





Existe uma grande incerteza quanto à proporção em que cada reação ocorre. Devido à semelhança entre as reações (2) e (3), e a maior proporção que ocupam no processo, este pode ser simplificado considerando apenas a reação (2) em um único passo (Glizmanenko, 1962; Rossi, 1954). Na taxa de reação supõe-se comportamento de Arrhenius (Russel, 1980; Kuo, 1986), considerando a reação (2) bi-molecular de 1ª ordem e o ferro no estado sólido (Kuo, 1986) como:

$$\frac{dC_{\text{Fe}}}{dt} = -K(T)C_{\text{O}_2} \quad (4)$$

C_{Fe} - concentração do Ferro (moles/m³)

C_{O_2} - concentração do oxigênio molecular (moles/m³)

$K(T)$ - constante de reação, função da temperatura (mol_{Fe}/mol_{O₂.s)}

Observando a Fig. (4), pode-se afirmar aproximadamente que o furo é feito numa zona de reação coberta pelo campo de gotejamento. A reação se inicia sobre o depósito de LOX na face superior e forma uma poça de fusão naquela região. Porém, a onda de pressão causada pela intensidade da reação exotérmica expulsa daquela região o excesso de LOX e os óxidos fundidos, e possivelmente algum ferro fundido não reagido. A reação é mantida pelo LOX suprido pelo gotejamento, ocupando uma área aproximadamente igual ao diâmetro das gotas (100 μm - apesar de o orifício de saída possuir a metade desse diâmetro, a transformação do jato em gotas implica numa expansão no diâmetro das gotas – Poulidakos e Waldvogel, 1997). Num processo de oxi-corte convencional, o oxigênio se difunde através da camada de óxido formado nas paredes do *kerf* (orifício de fusão), desempenhando papel de importância. No caso estudado, devido à velocidade do processo, a difusão do oxigênio através do óxido será desprezada.

O modelo final parte de uma formulação integral em volume de controle que obedece à premissas básicas do processo de oxi-corte sumarizadas por Davies (1993). Para a aplicação da formulação integral, o processo foi dividido em duas partes: pré-aquecimento e oxidação. Os volumes de controle empregados são mostrados na Fig. (5). Admite-se que a zona de reação é abastecida continuamente por LOX, até que esse forme 100% da concentração em seu interior. Como todo óxido formado é expulso, a concentração de ferro no final será 0%.

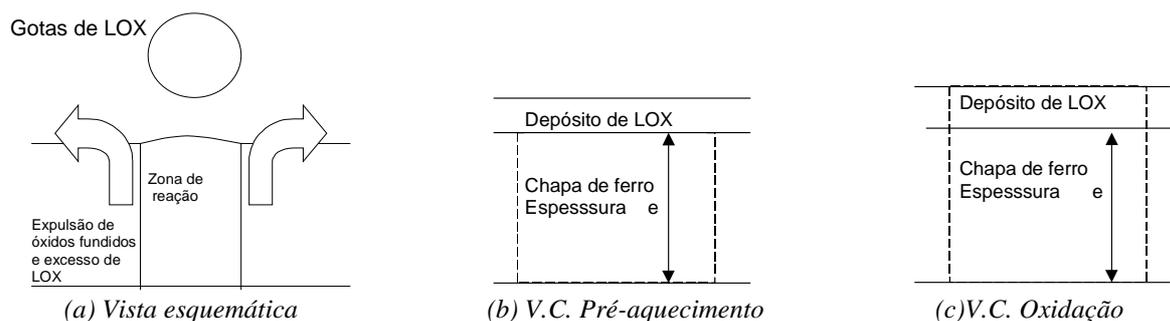


Figura 5. Volumes de controle usados em cada fase do processo.

A conservação da massa é desnecessária na fase de pré-aquecimento, pois não há transporte de matéria. Na fase de reação, supondo propriedades constantes e entradas e saídas homogêneas temos:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - \dot{m}_{\text{LOX}} \quad (5)$$

onde $\dot{m}_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$ e \dot{m}_{LOX} são as vazões mássicas de saída do óxido formado e de entrada do suprimento de LOX, respectivamente, obtidas através da taxa de formação, e m é a massa total dentro do

volume de controle V, mostrado na Fig.(5) em um tempo qualquer. A vazão mássica necessária de LOX será:

$$\dot{m}_{\text{LOX}} = V \cdot M_{\text{O}_2} \left(\frac{dC_{\text{O}_2}}{dt} + 2 \frac{dC_{\text{Fe}_3\text{O}_4}}{dt} \right) \quad (6)$$

onde M_x é a massa molar da substância x. Uma observação importante é que, em qualquer momento, a concentração de óxido no volume de controle é zero, pois todo óxido formado é expulso. Porém, a derivada da concentração é não nula, pois ela indica a taxa de formação.

Na fase de pré-aquecimento, a partir da conservação da energia obtém-se:

$$\rho_{\text{Fe}} \cdot C_{p_{\text{Fe}}} \frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}}{V} \quad (7)$$

Onde \dot{Q} é o calor trocado (recebido ou perdido) em Watts pelo volume de controle:

$$\frac{\dot{Q}}{V} = q_e + q_{\text{conv}} + q_{\text{cond}} + q_{\text{rad}} + q_{\text{LOX}} \quad (8)$$

sendo:

q_e é o fluxo de calor recebido por efeito Joule por unidade de volume (W/m^3)

q_{conv} = fluxo de calor perdido por convecção para o ar ambiente, a 25°C .

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{oo}} \cdot e \cdot (T_{\text{oo}} - T) \quad (9)$$

onde h_{oo} é o coeficiente de película, obtido segundo Özisik (1990) e T_{oo} é a temperatura ambiente.

q_{cond} é fluxo de calor perdido por condução no interior da placa, considerado desprezível devido às baixas diferenças de temperatura ao longo da seção de teste.

q_{rad} é fluxo de calor perdido por radiação para o ambiente:

$$q_{\text{rad}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot e \cdot (T_{\text{oo}}^4 - T^4) \quad (10)$$

onde σ é a constante de Stephan-Boltzman ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}^4$) e ϵ é a emissividade do Ferro.

q_{LOX} é fluxo de calor trocado com o LOX, que evapora sobre a superfície superior da placa. Considerando que a troca é equilibrada ao longo do tempo e toda com a superfície do metal, tem-se:

$$q_{\text{LOX}} = \dot{m}_{\text{gotas de LOX}} \cdot H_{\text{lv}} \quad (11)$$

Durante o processo de oxidação, considerando a mistura de LOX e ferro no interior da zona de reação como homogênea, tem-se:

$$\frac{1}{V} \frac{dH}{dt} = \frac{\dot{Q}}{V} + \frac{\dot{m}_{\text{Fe}_3\text{O}_4}}{V} \cdot h_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - \frac{\dot{m}_{\text{lox}}}{V} \cdot h_{\text{LOX}} \quad (12)$$

onde h é a entalpia em J/kg de cada substância, e H é a entalpia total da massa dentro do volume de controle. Para uma mistura homogênea:

$$H = m_{\text{Fe}} h_{\text{Fe}}(T) + m_{\text{O}_2} h_{\text{O}_2}(T) + m_{\text{Fe}_3\text{O}_4} h_{\text{Fe}_3\text{O}_4}(T) = \\ V \cdot M_{\text{Fe}} \cdot C_{\text{Fe}} h_{\text{Fe}}(T) + V \cdot M_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{O}_2} h_{\text{LOX}} + V \cdot M_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot C_{\text{Fe}_3\text{O}_4} h_{\text{Fe}_3\text{O}_4}(T) \quad (13)$$

Considera-se que $C_{Fe_3O_4} = 0$ e que o oxigênio se mantém como líquido saturado (portanto com entalpia constante) e o óxido é formado e expulso à temperatura de fusão. Derivando a Eq. (13) em relação ao tempo e substituindo o resultado na Eq. (12), obtém-se:

$$M_{Fe} \cdot C_{Fe} \cdot \frac{dh_{Fe}}{dt} + M_{Fe} \cdot h_{Fe}(T) \cdot \frac{dC_{Fe}}{dt} + M_{O_2} \cdot h_{LOX} \cdot \frac{dC_{O_2}}{dt} + M_{Fe_3O_4} \cdot h_{Fe_3O_4}(T) \cdot \frac{dC_{Fe_3O_4}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{V} + \frac{\dot{m}_{Fe_3O_4}}{V} \cdot h_{Fe_3O_4} - \frac{\dot{m}_{lox}}{V} \cdot h_{LOX} \quad (14)$$

As alterações de \dot{Q} em relação ao pré-aquecimento são:

q_e – uma vez que a temperatura de reação foi atingida, o aquecimento por indução é cortado.

q_{lox} – este termo passa à ser contabilizado na entrada de LOX no V.C.

q_q – é o calor de reação em W/m^3 , somado aos outros termos, dado por:

$$q_q = \Delta h_f \cdot M_{O_2} \cdot \frac{dC_{\acute{o}xido}}{dt} \quad (15)$$

A entalpia específica do LOX é a do líquido saturado. As entalpias dos outros reagentes são por:

$$h_{Fe} = C_{p_{Fe-L}}(T - T_{fus\grave{a}o}) + C_{p_{Fe-S}}(T - T_{oo}) + H_{sl-Fe} \quad (16)$$

$$h_{O_2} = h_{LOX} = C_{p_{O_2-G}}(T_{sat} - T_{oo}) + H_{lv-O_2} \quad (17)$$

$$h_{Fe_3O_4} = C_{p_{Fe_3O_4-L}}(T - T_{fus\grave{a}o}) + C_{p_{Fe_3O_4-S}}(T - T_{oo}) + H_{sl-Fe_3O_4} \quad (18)$$

onde H_{lv} e H_{sl} são respectivamente os calores latentes de ebulição e de fusão de cada substância.

A variação da temperatura e as mudanças de estado dos reagentes devem ser contabilizadas para a correção da entalpia de formação do óxido - Δh_f , expressa como:

$$0,724 \cdot (Fe_{(T)} - h_{Fe}) + 0,276 \cdot (O_{2(T,L)} - h_{O_2}) \rightarrow Fe_3O_{4(T)} - h_{Fe_3O_4} + \Delta h_f^\circ \quad (19)$$

$$\Delta h_f(T) = \Delta h_f^\circ(T) - h_{Fe_3O_4}(T) + 0,724 \cdot h_{Fe}(T) + 0,276 \cdot h_{O_2}(T) \quad (20)$$

Onde $\Delta h_f^\circ = 4,83 \times 10^6$ J/kg é a entalpia de formação do óxido no estado padrão. As entalpias para os reagentes usadas na correção são encontradas através das equações 16-18.

4. SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Na fase de pré-aquecimento, o interesse é calcular o input de energia elétrica para o aquecimento, e verificar se é pertinente com os resultados experimentais. Assim, como o perfil de temperaturas é conhecido, temos funções analíticas para $T(t)$ e dT/dt , o que permite obter $q_e(t)$.

Para o processo de oxidação, um sistema de equações diferenciais ordinárias é montado:

$$\frac{dC_{Fe}}{dt} = -K(T)C_{O_2} \quad (21)$$

$$\frac{dC_{Fe_3O_4}}{dt} = -\frac{1}{3} \frac{dC_{Fe}}{dt} \quad (22)$$

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = -\frac{\rho_{O_2}}{M_{O_2}} \frac{M_{Fe}}{\rho_{Fe}} \frac{dC_{Fe}}{dt} \quad (23)$$

$$\frac{dh_{Fe}}{dt} = \left[-M_{Fe} \cdot h_{Fe}(T) \cdot \frac{dC_{Fe}}{dt} - M_{O_2} \cdot h_{O_2}(T) \cdot \frac{dC_{O_2}}{dt} - M_{Fe_3O_4} \cdot h_{Fe_3O_4}(T) \cdot \frac{dC_{Fe_3O_4}}{dt} + \frac{\dot{Q}}{V} - \frac{\dot{m}_{Fe_3O_4}}{V} \cdot h_{Fe_3O_4}(T) + \frac{\dot{m}_{LOX}}{V} \cdot h_{LOX} \right] / (M_{Fe} \cdot C_{Fe}) \quad (24)$$

$$\frac{dT}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{Cp_{Fe}} \frac{dh_{Fe}}{dt} & \text{se } T \neq T_{\text{Fusão do Fe}} \\ 0 & \text{se } T = T_{\text{Fusão do Fe}} \end{cases} \quad (25)$$

O código computacional foi construído em Linguagem FORTRAN, utilizando a rotina DIVPAG, da biblioteca IMSL (1989), que emprega o método de GEAR na solução de problemas de valor inicial. As condições iniciais usadas foram:

$$C_{Fe}(0) = m_{Fe}(0) \cdot M_{Fe} / V \quad (26)$$

$$C_{O_2}(0) = m_{O_2}(0) \cdot M_{O_2} / V \quad (27)$$

$$C_{Fe_3O_4}(0) = 0 \quad (28)$$

$$H_{Fe}(0) = Cp_{Fe-s} \cdot [T(0) - T_{oo}] \quad (29)$$

$$T(0) = 870^\circ \text{ C (Temperatura de ignição do ferro, ou início da reação)} \quad (30)$$

O volume inicial é obtido a partir do V.C. mostrado na fig. (5.c). A espessura do depósito de LOX é estimada através do equilíbrio entre a pressão hidrostática e a tensão superficial (2,3 mm), somado-se a espessura da chapa, resultando uma altura de 3,3 mm. As concentrações iniciais são:

$$C_{Fe}(0) = \frac{m_{Fe}(0)}{V} \cdot M_{Fe} = \rho_{Fe} \cdot \frac{A \cdot e}{A \cdot h} \cdot M_{Fe} = \rho_{Fe} \cdot \frac{e}{h} \cdot M_{Fe} \quad (31)$$

$$C_{O_2}(0) = \frac{m_{O_2}(0)}{V} \cdot M_{O_2} = \rho_{O_2} \cdot \frac{A \cdot (h - e)}{A \cdot h} \cdot M_{O_2} = \rho_{Fe} \cdot \frac{(h - e)}{h} \cdot M_{Fe} \quad (32)$$

As propriedades do oxigênio, do ferro e do Fe_3O_4 , foram obtidas a partir de dados constantes na literatura (respectivamente: Lide, 1980, Walker e Tarn, 1991, Alberty e Silbey, 1996). Devido à ausência de dados encontrados, foi estimado um valor médio de K a partir de dados experimentais de Steinberg et al (1992, 1998), considerando a temperatura constante e igual à de ignição (870° C). Apesar dessa aproximação, considera-se o valor usado ($K = 425,29 \text{ mol}_{Fe} / \text{mol}_{O_2} \cdot \text{s}$) representativo.

5. RESULTADOS E ANÁLISE

5.1. Validação do modelo matemático – fase de pré-aquecimento

A partir da curva $T \times t$, Fig. (3), foi ajustada uma função analítica pra a variação da temperatura:

$$T(t) = 0,0337008 \cdot e^{0,100274 \cdot t} \quad (33)$$

Aplicando a Eq.(33) à Eq.(7), foi possível obter curvas para cada um dos fatores de aquecimento/resfriamento da seção de teste, em W/m^3 . As curvas são mostradas na Fig.(6). O percentual de cada perda em relação ao input elétrico é mostrado na Fig.(7), observando-se que à medida que a seção de teste se aproxima da temperatura de reação a importância destas decresce, tornando-se desprezíveis próximo ao início da reação. Multiplicando o input volumétrico final pelo volume da seção de teste ($2 \times 10^{-7} m^3$), obtém-se a potência de aquecimento elétrica média, de 66 W, o que corresponde a um valor coerente com o processo físico e a potência do indutor, de 100 W.

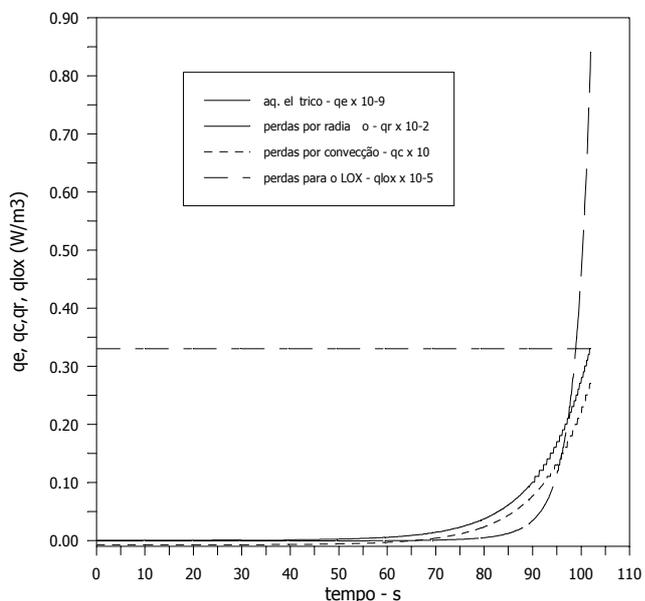


Figura 6. Variação da potência efetiva de aquecimento e das perdas na seção de teste.

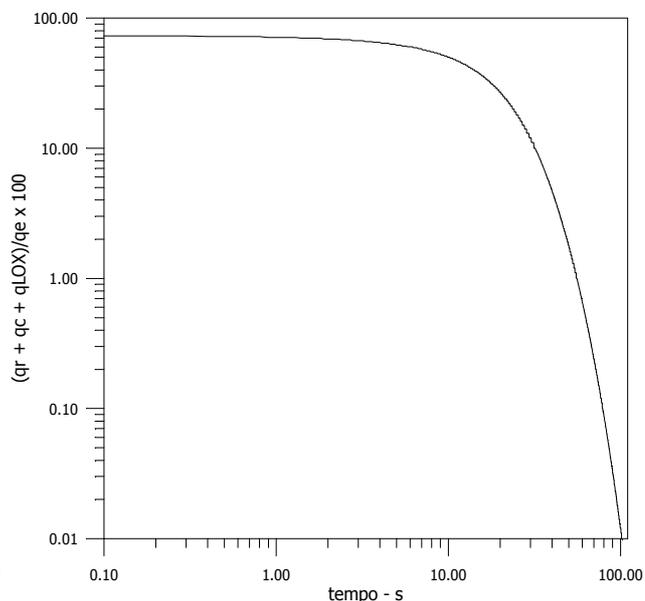


Figura 7. Percentual das perdas totais de energia em relação ao input de potência.

5.2. Oxidação

Foram obtidos resultados para oxidação com oxigênio fornecido como líquido saturado (LOX) ou gás à temperatura e pressão ambientes (GOX). O oxigênio gasoso libera mais energia que o LOX devido à sua entalpia mais alta, o que contribui para o aumento do calor de reação, Fig.(8). No entanto, para uma mesma concentração inicial, a velocidade de reação do LOX foi bem maior que a do GOX, devido à diferença de densidades, que permitia uma maior concentração de oxigênio dentro do volume de controle, Figs.(9,10), e é um fator determinante na taxa de reação.

A temperatura final alcançada foi maior no GOX, devido à maior entalpia deste (figura 9). Porém, o LOX atinge a temperatura máxima em menos tempo, o que indica uma potência de aquecimento maior. Em ambos os casos, a temperatura final está acima da temperatura de dissociação do óxido ($2257^{\circ} C$), e no caso do GOX, maior que a temperatura de ebulição do Fe ($3133^{\circ} C$). Provavelmente esse fator, que não foi levado em conta, reduziria a temperatura máxima alcançada a um desses valores. Isso significa que a hipótese de Glassman (Como descrita por Steinberg et al, 1992) - que admite que a reação ocorria com o ferro em estado sólido - não corresponde aos resultados do modelo. Assim, deve-se admitir que a oxidação ocorre com o ferro em estado líquido, o que está de acordo com os resultados de Steinberg et al (1992).

Finalmente, os resultados finais obtidos para cada estado físico em que o oxigênio foi empregado, tomando as porcentagens relativas à base de GOX, mostram que apesar de o LOX liberar apenas 24 % do calor distribuído na seção de teste e da temperatura máxima alcançada ser 37,3 % menor, o tempo de reação cai 74,8 %, e a entalpia do óxido formada sofre redução de apenas 20 %, o que indica que a reação se mantém de forma sustentável.

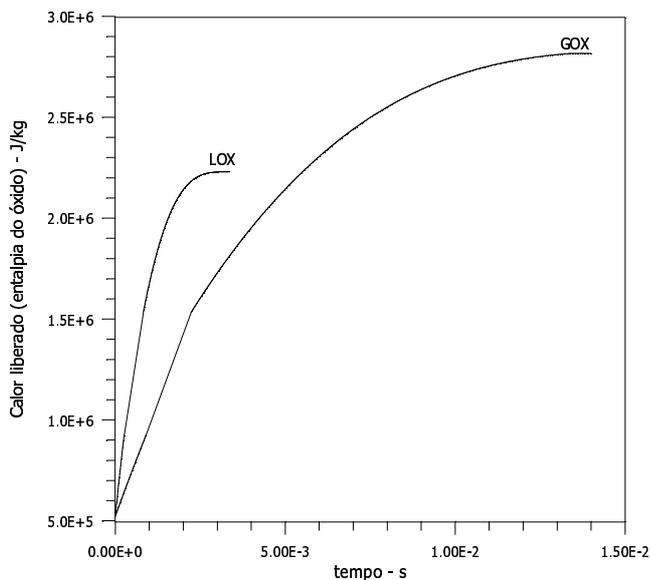


Figura 8. Entalpia do óxido formado.

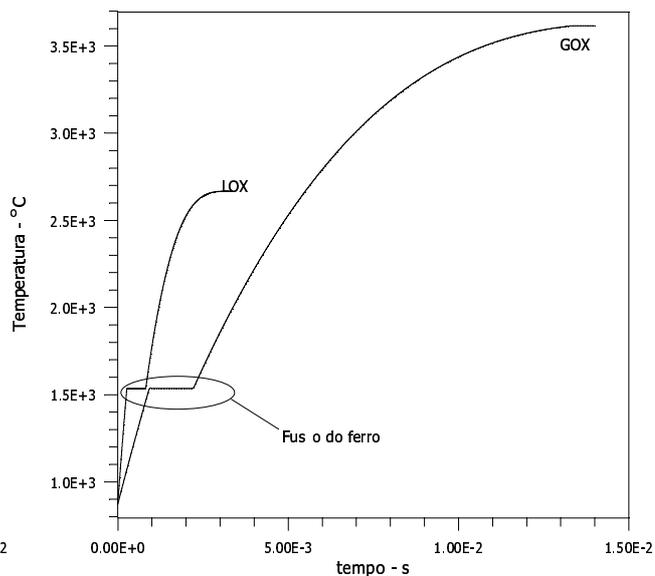


Figura 9. Temperaturas no interior do volume de controle.

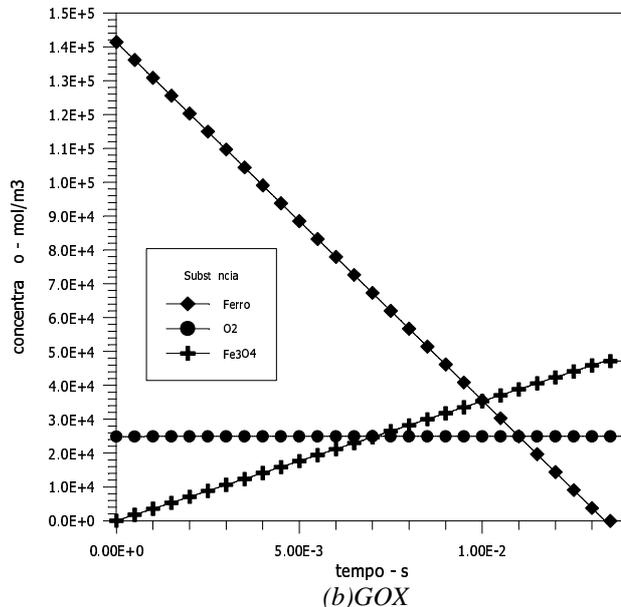
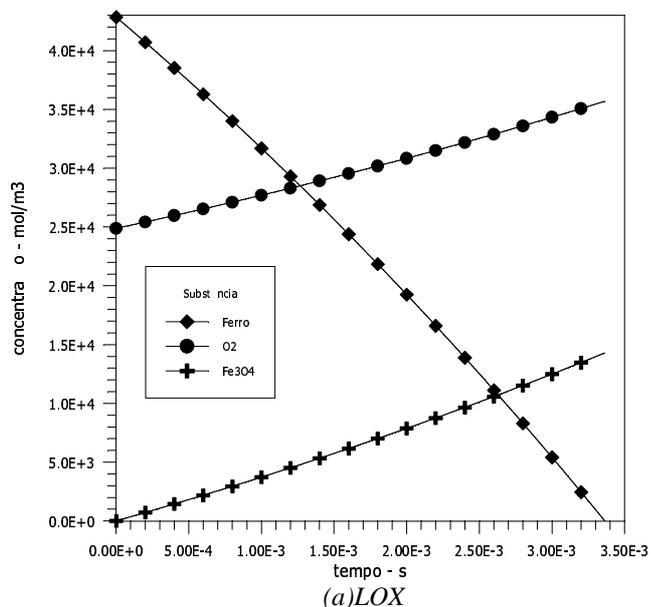


Figura 10. Variação das concentrações no volume de controle.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi simulada a reação de oxidação do ferro com o oxigênio líquido em uma placa aquecida. O modelo foi validado através da comparação com dados experimentais e em seguida os resultados para a oxidação via jato LOX foram comparados com o uso de GOX. Verificou-se que a velocidade da reação de oxidação é bastante aumentada pelo emprego do oxigênio no estado líquido saturado. Na maior parte da reação, o ferro e o óxido reagem no estado líquido, confirmando estudos mais recentes que se opunham à hipótese tradicional de que o ferro reagia no estado sólido. A reação mostrou-se auto-sustentável, apesar de produzir menos energia com o uso de LOX. Propostas para a continuação deste trabalho seriam a um maior detalhamento do modelo matemático, considerando o efeito do movimento, a ausência de equilíbrio químico e a presença de elementos liga, e a determinação da viabilidade econômica do uso de LOX num sistema de corte.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e à FAPESP pelo suporte financeiro durante a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Alberty, R. A., Silbey, R. J., 1996, Physical Chemistry, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Davies, A. C., 1993, Welding Science and Technology, v. 2, Cambridge University, NY.
- Glizmanenko, D., Yevseyev, G., 1962, Gas Welding and Cutting, Mir Publishers, Moscou.
- Kuo, K. K., 1986, Principles of Combustion, Wiley-Interscience, NY.
- Lide, D. R., 1990-1991, Handbook of Chemistry and Physics 71st Edition, CRC Press, USA.
- Marks, L. S. (Ed.), 1958, Mechanical Engineer's Handbook, McGraw-Hill, NY
- Okomura, T., Taniguchi, C., 1982, Engenharia de Soldagem e Aplicações, Rio de Janeiro.
- Özisik, N. M., 1990, Transferência de Calor, Editora Guanabara, Rio de Janeiro.
- Poulikakos, D., Waldvogel, J. M., 1997, Solidification Phenomena in Picoliter Size Solder Droplet deposition on a Composite Substrate, Int. J. Heat & Mass Transfer, v. 40, no. 2, pp 295-309.
- Rossi, B. E., 1954, Welding Engineering, McGraw-Hill Book Company, INC. USA.
- Russel, J.B., 1980, Química Geral, McGraw-Hill do Brasil Ltda. São Paulo.
- Steinberg, T. A., Mulholland, G. P., Wilson, D. B., 1992, The Combustion of Iron in High-Pressure Oxygen, Combustion and Flame, 89: 221-228.
- Steinberg, T. A., Kurtz, J., Wilson, D. B., 1996, The Solubility of Oxygen in Liquid Iron Oxide During the Combustion of Iron Rods in High-Pressure Oxygen, Combustion and Flame, 113: 27-37.
- Walker, P. e Tarn, W. H., 1991, Handbook of Metal Etchants, CRC Press, Flórida.
- White Martins, 2000, Catálogo de Produtos, Manuais de Soldagem e Corte, Brasil.

SIMULATION OF IRON COMBUSTION AT HIGH TEMPERATURE THROUGH LIQUID OXYGEN JET

Rodrigo Ferreira Martins

Humberto Araujo Machado

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP

Av. Shishima Hifume, 2911, 12244-000, São José dos Campos, SP, Brasil

(55) 12-3947-1005, machado@univap.br

Abstract. *The reaction of iron combustion is an important chemical process in several engineering applications, yielding iron oxide and releasing energy. Such reaction is essential for the gas cutting of carbon steel plates, and can occur also in other devices where the ferrous stuff reaches high temperatures in a high oxygen concentration media. A basic aspect in such processes is to use the heat generated by the reaction to cut or heat the surface of the material. Generally, oxygen is provided as a gas, through a pre-heating flame. It was demonstrated that a micrometric droplet stream allows an excellent control of the droplet deposition over a surface. In this work the impact of a liquid oxygen droplet jet is studied. The chemical and thermal processes that occur when the droplet jet sharpens a steel flat plate are modeled and simulated, and the numerical results are compared with experimental data already available. The objective is to check if the reaction temperature rises over the iron melting temperature, determine the temperature and iron physical state during the reaction and verify if the reaction is able to sustain itself. Such knowledge would allow to estimate the possibility of the use of this process in oxi-cutting with some energy savings.*

Key words: oxi-cutting, iron combustion, liquid oxygen