

RELAÇÃO ENTRE A PRODUÇÃO E OS PARÂMETROS DE TRABALHO DO CADINHO DO ALTO FORNO ⁽¹⁾

JOAQUIM BURREL JUVILLAR ⁽²⁾

RESUMO

Discute-se o efeito das diversas variáveis que influem na marcha do cadinho dos altos fornos e dão-se relações quantitativas entre elas e a produção dos fornos.

1. INTRODUÇÃO

A parte do alto forno situada abaixo da zona de fusão é semelhante a uma coluna de recheio com um gás e um líquido circulando em contracorrente através do recheio. O gás é o produzido na combustão do carbono nas ventaneiras; o líquido é o ferro e a escória fundidos e o recheio sólido da coluna está formado pelo carbono ainda sem queimar nas ventaneiras. Segundo a teoria das colunas de recheio, existe um valor limite para a velocidade do gás, que é aquele em que o líquido (ferro e escória fundidos) forma uma capa por cima do recheio (carbono). Este valor se chama “*velocidade de inundação*” (flooding velocity) e pode constituir uma limitação da capacidade dos altos fornos.

O objetivo deste trabalho é estimar nos altos fornos de Monlevade as condições em que se produz a inundação da zona de fusão do alto forno. Estas condições marcarão a capacidade máxima do forno, pelo que se refere à zona de fusão.

(1) Contribuição Técnica n.º 451. Apresentada na Comissão «D», do XVI Congresso Anual da ABM; Pôrto Alegre, julho de 1961.

(2) Membro da ABM e Engenheiro da Usina de Monlevade da Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

2. VELOCIDADE DE INUNDAÇÃO

Neste trabalho utilizam-se a nomenclatura e as unidades que se indicam a continuação:

u_G = velocidade do gás em m/seg

ρ_G = densidade do gás em kg/m³

G = velocidade mássica do gás em kg/seg m²

ρ_L = densidade do líquido em kg/m³

μ_L = viscosidade do líquido em poises

L = velocidade mássica do líquido em kg/seg m²

μ_W = viscosidade da água a 15° em poises

g = aceleração da gravidade em m/seg²

ε = porosidade do recheio, sem dimensões

a = superfície do recheio por unidade de volume em m²/m³

Representando em coordenadas cartesianas retangulares o valor do grupo

$$\frac{u_G^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_L} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W} \right)^{0.2}$$

em ordenadas e o valor do grupo

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

em abscissas, obtém-se um ponto. A posição dêste ponto indica se está trabalhando ou não nas condições em que existe inundação.

A linha que separa a zona de inundação da zona de trabalho normal se representa na figura 1. Pode-se observar que tanto o grupo representado em ordenadas, como o representado nas abscissas são adimensionais.

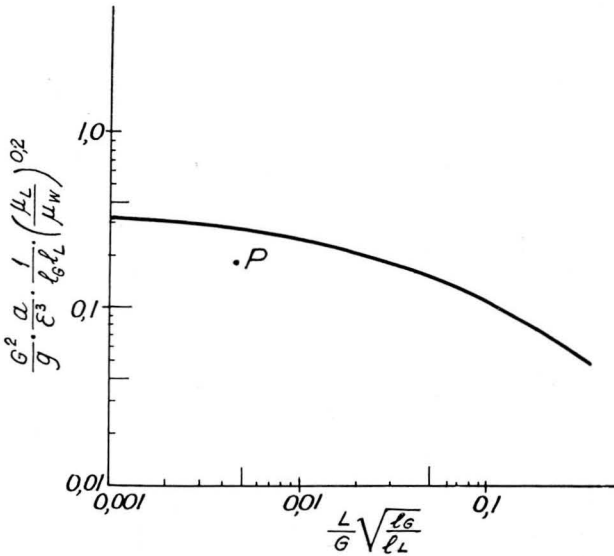


Fig. 1 — Curva de inundação: linha que separa a zona de inundação da zona de trabalho normal.

2.1. CONDIÇÕES DE TRABALHO DA ZONA DE FUSÃO NOS ALTOS FORNOS DE MONLEVADE

As condições de trabalho que se dão a seguir não são fixas nos altos fornos de Monlevade. Simplesmente se utilizam para determinar o ponto de trabalho no gráfico 1 e como ponto de partida da discussão sobre os efeitos de cada uma das variáveis que compõem os grupos já mencionados.

a) *Velocidade mássica (G) dos gases que atravessam a zona de fusão* — Os gases que atravessam a zona de fusão são os que procedem da gaseificação do carbono nas reações de combustão com o ar insuflado no alto forno. Portanto, esses gases constarão somente de monóxido de carbono e de nitrogênio (se prescinde da umidade do ar).

Se o ar insuflado no alto forno é 2,3 kg de ar sêco/K de gusa, os gases produzidos, quando este ar queima o carbono que encontra no alto forno são:

$$\begin{aligned}
 & 2,3 (0,231) \cdot \frac{28}{16} + 0,769 = \\
 & = 2,698 \text{ kg de } (N_2 + CO) \text{ kg de gusa}
 \end{aligned}$$

sendo:

23,1 = porcentagem em pêsos de oxigênio no ar sêco.

76,9 = porcentagem em pêsos de nitrogênio no ar sêco.

Se a produção do alto forno é de 300 t de gusa/dia, os gases que atravessam a zona de fusão serão:

$$2,698 \cdot \frac{300.000}{86.400} = 9,368 \text{ kg de } (N_2 + CO)/\text{seg.}$$

Se o diâmetro da zona de fusão do alto forno é 4,65 m sua secção será 17,0 m² e portanto:

$$G = \frac{9,368}{17,0} = 0,55 \text{ kg de } (N_2 + CO)/\text{m}^2 \text{ seg.}$$

b) *Velocidade mássica (L) dos líquidos que atravessam a zona de fusão* — Os líquidos que atravessam a zona de fusão são o ferro e a escória fundidos. Se a quantidade de escória produzida no alto forno é 0,180 kg de escória/kg de gusa e a produção do alto forno é de 300 t de gusa/dia, os líquidos que atravessam a zona de fusão serão:

$$(1.000 + 0,180) \frac{300.000}{86,400} = 4,1 \text{ kg de líquido/seg.}$$

Por conseguinte:

$$L = \frac{4,1}{17,0} = 0,24 \text{ kg de líquido/m}^2 \text{ seg.}$$

c) *Propriedades dos líquidos que atravessam a zona de fusão* — Do ponto de vista de inundação do alto forno as únicas propriedades que interessam nos líquidos são sua densidade e viscosidade. O início de fusão das escórias dos altos fornos de Monlevade, determinado experimentalmente, oscila em torno dos 1.260°C. Portanto, referiremos êste estudo à temperatura de 1.360°C, isto é, 100°C mais elevado que o início de fusão. Dêste modo temos a certeza de que tôda a escória e todo o gusa estão no estado líquido. Para o gusa os valores destas propriedades a 1.360°C são: ¹

$$\rho_L = 6.900 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_L = 0,075 \text{ poises}$$

enquanto que para a escória os valores destas propriedades a 1.360°C são:

$$\rho_L = 2.300 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_L = 18 \text{ poises}$$

O valor de μ_L para a escória foi deduzido de sua composição ($\text{SiO}_2 = 40\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20\%$; $\text{CaO} = 33\%$; $\text{MgO} = 3,0\%$)². O valor de ρ_L foi deduzido por medição direta do peso de escória líquida que ocupa um volume conhecido. O valor médio de 30 determinações efetuadas foi $2.300 \pm 300 \text{ kg/m}^3$.

Dos valores anteriores deduz-se que a escória líquida por sua menor densidade e maior viscosidade inundará o forno mais facilmente que o gusa líquido.

O líquido que desce através do carvão na zona de fusão está formado pela fase escória e a fase gusa. Para fixar as limitações do alto forno nessa zona pode-se supor que o líquido consta só da fase escória, isto é, a fase que mais tendência tem a produzir a inundação e utilizar a densidade e a viscosidade dessa fase. Esta hipótese equivale a admitir um fator de segurança, já que na realidade a maior parte do líquido que desce é gusa, que tem tendência a inundar muito menor que a escória.

d) *Propriedades dos gases que atravessam a zona de fusão* — Do ponto de vista de inundação do alto forno a única propriedade interessante dos gases que atravessam a zona de fusão é a densidade. A velocidade pode calcular-se pela relação:

$$u_G = \frac{G}{\rho_L}$$

Esta propriedade dos gases deve referir-se à mesma temperatura que as propriedades dos líquidos, isto é, a 1.360°C. Admitindo que os gases constam somente de monóxido de carbono e de nitrogênio (ambos de peso molecular 28) sua densidade a 1.360°C e 1,35 kg/cm^2 é:

$$\rho_G = \left(\frac{28}{22,4} \right) \left(\frac{273}{273 + 1360} \right) 1,35 = 0,28 \text{ kg/m}^3$$

Portanto será:

$$u_G = \frac{G}{\rho_G} = \frac{0,55}{0,28} = 1,96 \text{ m/seg.}$$

e) *Propriedades do recheio da zona de fusão* — O recheio sólido da zona de fusão está formado pelo carvão ainda sem queimar. Êste carvão está já sem voláteis, que foram desprendidos nas zonas mais elevadas do forno. Do ponto de vista de inundação da zona de fusão do alto forno, as propriedades interessantes dêste carvão são sua porosidade e sua superfície específica. Especialmente a porosidade é interessante porque aparece elevada ao cubo e, portanto, exerce uma grande influência.

O carvão vegetal procedente do depósito é peneirado antes de entrar nos altos fornos. Suponhamos que a abertura da peneira seja 3/8". Uma amostra do carvão retido nesta peneira foi colocada em uma mufla a $\approx 1.200^{\circ}\text{C}$ durante 1/2 h em atmosfera de nitrogênio. Dêste modo o carvão ficou livre de voláteis, isto é, tal como chega à zona de fusão do alto forno.

Neste carvão sem voláteis se determinou a densidade aparente (ASTM — D167-24), obtendo-se o valor 0,45 kg/l. Com êste mesmo carvão sem voláteis se determinou a densidade aparente do leito de carvão (pesando um volume conhecido do carvão), obtendo-se o valor 0,23 kg/l.

Então, a porosidade aparente do leito de carvão retido na peneira de 3/8" e sem voláteis é, por definição:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 1 - \frac{\text{densidade aparente do leito}}{\text{densidade aparente do carvão}} \\ &= 1 - \frac{0,23}{0,45} = 1 - 0,51 = 0,49\end{aligned}$$

Para determinar a superfície específica (a) do carvão se utilizou a norma DIN 4190. Esta norma calcula um tamanho médio estatístico das partículas a partir da seguinte equação:

$$\ln \left(\frac{100}{R} \right) = \left(\frac{l}{l'} \right)^n$$

sendo:

R = retidos acumulados (%)

l = abertura da peneira

l' = tamanho médio estatístico

n = índice de uniformidade de tamanhos

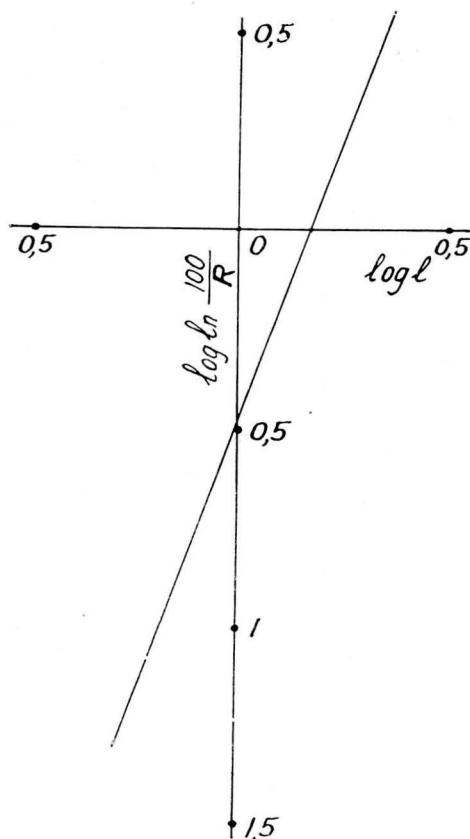


Fig. 2 — Reta «RRS» do carvão retido na peneira de 3/8" e isento de voláteis.

A correlação anterior, chamada lei de Rosin, Rammler e Sperling, pode escrever-se do seguinte modo:

$$\log \ln \frac{100}{R} = n \cdot \log l - n \cdot \log l'.$$

Portanto, representando em ordenadas $\log \ln \left(\frac{100}{R} \right)$ e em abscissas $\log l$ resulta uma linha reta do pendente n e ordenada na origem $(-)$ $n \cdot \log l'$. A representação desta reta requer o conhecimento de R e de l , isto é, da análise granulométrica do material que se estuda. No caso de carvão vegetal na peneira de 3/8" e isento de voláteis, a análise granulométrica deu o resultado indicado na tabela seguinte:

Abertura	$\log l$	Retidos (kg)	Retidos acumulados (kg)	% de retidos acumulados (R)	$\log \left(\frac{100}{R} \right)$	$\ln \left(\frac{100}{R} \right)$	$\log \ln \left(\frac{100}{R} \right)$
2"	0,301	0,727	0,727	14,54	0,84	1,93	0,28
1,5"	0,176	0,940	1,667	33,34	0,47	1,08	0,03
1"	0,000	1,674	3,341	66,82	0,17	0,39	-0,41
3/4"	-0,130	0,944	4,285	85,70	0,07	0,16	-0,80
1/2"	-0,310	0,486	4,771	95,42	0,02	0,05	-1,30
3/8"	-0,400	0,123	4,894	98,00	0,01	0,02	-1,70

A representação gráfica da equação de Rosin, Rammler e Spurling se dá na figura 2. Dela se deduz que:

$$n = 2,8$$

$$l' = 1,4'' \approx 35 \text{ mm}$$

isto é, o tamanho médio estatístico dos pedaços do carvão peneirado na peneira de 3/8" e isento de voláteis é de 35 mm e o índice de uniformidade de tamanho é 2,8, o que significa que o carvão não é de tamanho muito uniforme.

Para determinar a superfície específica (a) do carvão utilizou-se a fórmula de Otake e Kimura³:

$$\log (a \cdot l') = 3,57$$

que dá:

$$a = 107 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

para $l' = 35 \text{ mm}$.

3. PONTO DE TRABALHO DOS ALTOS FORNOS DE MONLEVADE

A abscissa do ponto de trabalho na figura 1 é:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho G}{\rho L}}$$

Nos altos fornos de Monlevade se cumpre normalmente que:

$$L = 0,24 \text{ kg/m}^2 \text{ seg}$$

$$G = 0,55 \text{ kg/m}^2 \text{ seg}$$

$$\rho_G = 0,28 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 1.360^\circ\text{C}$$

$$\rho_L = 2.300 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 1.360^\circ\text{C}$$

Portanto:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = 0,0048.$$

A ordenada do ponto de trabalho na figura 1 é:

$$\frac{u_G^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_L} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W}\right)^{0,2} = \frac{G^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1}{\rho_G \cdot \rho_L} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W}\right)^{0,2}$$

Se nos altos fornos de Monlevade se cumpre que:

$$G = 0,55 \text{ kg/m}^2 \text{ seg}$$

$$\rho_G = 0,28 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 1.360^\circ\text{C}$$

$$\rho_L = 2.300 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 1.360^\circ\text{C}$$

$$\mu_L = 18 \text{ poises a } 1.360^\circ\text{C}$$

$$a = 107 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$\varepsilon = 0,49$$

$$g = 9,8 \text{ m/seg}^2$$

$$\mu_W = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ poises}$$

será:

$$\frac{G^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1}{\rho_G \cdot \rho_L} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W}\right)^{0,2} = 0,186$$

Este ponto de trabalho P (0,0048; 0,186) nos altos fornos de Monlevade está representado na figura 1. Nela se pode ver que está situado na zona de trabalho normal, onde não existe inundação. Já se disse que na determinação do ponto P tomou-

se uma margem de segurança consistente em supor que o líquido que desce tem as propriedades da escória líquida, quando na realidade se trata de duas fases líquidas (gusa e escória).

4. VARIÁVEIS QUE AFETAM A CAPACIDADE DA ZONA DE FUSÃO DOS ALTOS FORNOS

A ordenada do ponto de trabalho P é:

$$\frac{G^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1}{\rho_G \cdot \rho_L} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W} \right)^{0,2}$$

e sua abscissa é:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

A inundação é tanto menos provável quanto menores forem os valores destas coordenadas. Para estudar os efeitos das variáveis que definem essas coordenadas, as dividiremos em dois grupos: Variáveis que dependem das matérias primas; e Variáveis que dependem da forma de trabalho do alto forno. A seguir se estuda cada um destes grupos.

4.1. VARIÁVEIS QUE DEPENDEM DAS MATÉRIAS PRIMAS

Estas variáveis podem por sua vez dividir-se em dois grupos:

- a) Variáveis que dependem só das propriedades físicas do carvão (a e ε);
- b) Variáveis que dependem das propriedades químicas da mistura que constitui a carga do alto forno (ρ_L , μ_L e ρ_G).

As variáveis que dependem das propriedades físicas do carvão aparecem agrupadas no termo $\frac{a}{\varepsilon^3}$. Quanto menor fôr este termo menores serão as probabilidades de inundação do forno. Portanto, é conveniente que a porosidade do leito de carvão sem voláteis (ε) seja grande e sua superfície específica (a) seja pequena. Isto se consegue quando o diâmetro

médio do carvão é grande, isto é, quanto maior fôr a quantidade de finos eliminados do carvão antes de carregá-lo nos altos fornos.

Das variáveis que dependem da composição química da carga do alto forno, a viscosidade da escória μ_L é a que tem menos influência, já que está elevada a 0,2.

Não obstante pode atuar-se sôbre ela mediante adições que diminuam a viscosidade da escória e dificultem, portanto, a inundação do alto forno.

O valor de ρ_L depende da natureza da carga do alto forno (impurezas do minério de ferro, cinzas do carvão, adições) e só pode atuar-se sôbre ela selecionando as matérias primas. Quanto maior fôr o valor de ρ_L menores serão as probabilidades de inundação do alto forno.

O valor de ρ_L depende também da natureza da carga, porque está referido a temperatura dos líquidos e a pressão da zona de fusão. As probabilidades de inundação do alto forno são menores quanto maior fôr ρ_G , isto é, quanto menor fôr a temperatura dos líquidos e maior a pressão da zona de fusão.

Em geral, os valores de ρ_L , μ_L e ρ_G são características de cada alto forno. Já se disse que nos altos fornos de Monlevade é:

$$\rho_L = 2.300 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_L = 18 \text{ poises}$$

$$\rho_G = 0,28 \text{ kg/m}^3$$

Se as propriedades físicas do carvão são constantes, então o fator $\frac{a}{\varepsilon^3}$ é também característico de cada alto forno. Admitimos que nos altos fornos de Monlevade é:

$$a = 107 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$\varepsilon = 0,49$$

e, portanto, que:

$$\frac{a}{\varepsilon^3} = 894$$

as coordenadas do ponto de trabalho nos altos fornos de Monlevade seriam:

$$\text{Abscissa} = 0,011 \frac{L}{G}$$

$$\text{Ordenada} = 0,625 G^2$$

4.2. VARIÁVEIS QUE DEPENDEM DA FORMA DE TRABALHO DO FORNO

Seja:

x = produção do alto forno em kg gusa/dia;

y = consumo específico de ar em kg ar sêcok/g gusa.

Então é:

$$G = 0,80 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot y$$

$$L = 0,80 \cdot 10^{-6} \cdot x$$

e, portanto, as coordenadas do ponto de trabalho são:

$$\text{Abscissa} \quad \frac{0,011}{y}$$

$$\text{Ordenada} = 4,48 \cdot 10^{-16} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot x^2 \cdot y^2$$

e chega-se à conclusão interessante de que a abscissa do ponto de trabalho é constante para cada alto forno, qualquer que seja sua produção (x).

Pelo contrário, a ordenada depende das propriedades físicas do carvão $\left(\frac{a}{\varepsilon^3}\right)$, da produção do alto forno (x) e do consumo específico de ar (y).

O grande valor desta conclusão é que permite estabelecer uma relação quantitativa entre as propriedades do carvão, o consumo específico de ar e a produção de cada alto forno. Basta para isso determinar a abscissa do ponto de trabalho de cada alto forno e ver qual é a ordenada correspondente sobre a linha de inundação.

Por exemplo, nos altos fornos de Monlevade é normalmente: $\text{Abscissa} = 0,0048$. Êste valor é praticamente constante, porque:

- 1.º) O consumo específico de ar (y) varia pouco e por conseguinte afeta pouco ao valor da abscissa.
- 2.º) Devido à forma da curva de inundação, pequenas variações da abscissa nesta zona de valores quase não alteram o valor da ordenada correspondente.

A ordenada correspondente sôbre a curva de inundação   (fig. 1): Ordenada = 0,276; portanto, para que os altos fornos trabalhem sem inundação, ter o de cumprir que:

$$0,276 \supseteq 0,0007 \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot G^2$$

ou:

$$2,276 \supseteq 4,48 \cdot 10^{-16} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot x^2 \cdot y^2$$

ou:

$$6,17 \cdot 10^{14} \supseteq \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot x^2 \cdot y^2$$

ou:

$$2,48 \cdot 10^7 \supseteq \left(\frac{a}{\varepsilon^3} \right)^{1/2} \cdot x \cdot y$$

A representa o da função:

$$x = f(y)$$

para diversos valores de $\frac{a}{\varepsilon^3}$ se d a na figura 3.

Dela se deduz que quando:

$$\frac{a}{\varepsilon^3} = 894$$

(carvão vegetal sêco, retido na peneira de 3/8")  :

$$x = 362.000 \text{ kg gusa/dia}$$

Convém insistir que êste resultado se refere a um alto forno alimentado com carvão vegetal sêco retido na peneira 3/8". Se o carvão  st  úmido, os finos aglomeram ao peneirar, são retidos na peneira de 3/8" e por conseguinte são carregados no alto forno. A conseq ncia   que o t rmo $\frac{a}{\varepsilon^3}$ aumenta e portanto a capacidade de produção do alto forno diminui.

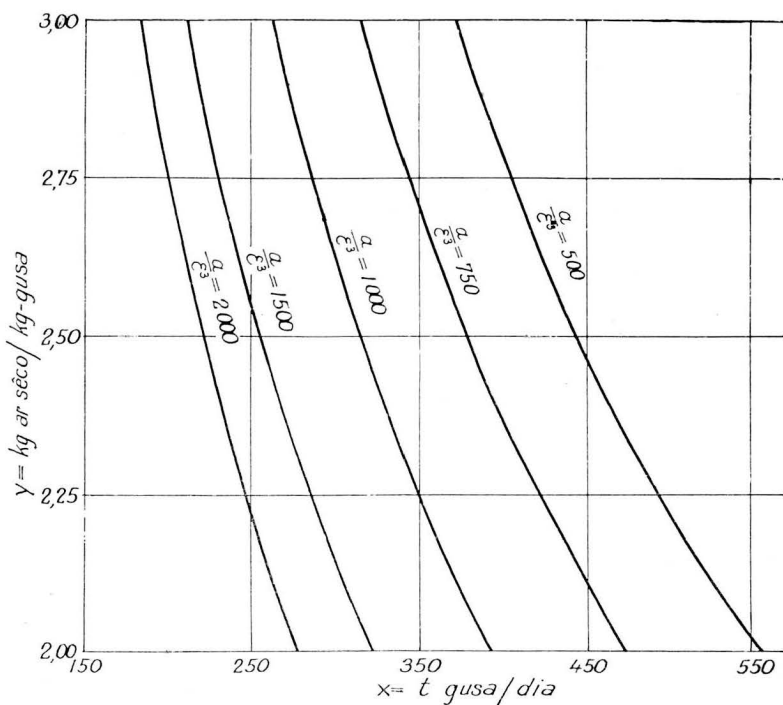


Fig. 3 — Relação entre as propriedades físicas do carvão, o consumo de ar e a produção dos altos fornos de Monlevade.

a = superfície específica do carvão, m^2/m^3

ϵ = porosidade do leito de carvão

Já se disse anteriormente que as coordenadas do ponto de trabalho nos altos fornos de Monlevade são normalmente:

$$\text{Abscissa} = 0,011 \frac{L}{G}$$

$$\text{Ordenada} = 0,0007 \cdot \frac{a}{\epsilon^3} \cdot G^2$$

Portanto, a possibilidade de inundação da zona de fusão do alto forno se verá diminuída por valores pequenos de L (pouca quantidade de escória, pequena produção de gusa) e por pequenos valores de G (pouca quantidade de ar insuflado, utilização de ar enriquecido em oxigênio).

Da figura 3 deduz-se que a produção (x) do alto forno aumenta nos seguintes casos:

- a) Ao aumentar a porosidade do carvão, isto é, ao diminuir o valor do termo $\frac{a}{\epsilon^3}$.
- b) Ao diminuir o consumo específico do ar (y), isto é, ao diminuir o consumo específico de carvão.

5. LIMITAÇÕES DAS CONSIDERAÇÕES ANTERIORES

Nas considerações anteriores se adotou uma margem de segurança, que consiste em supor que todo o líquido que desce através da zona de fusão tem as propriedades da escória líquida (quando realmente é gusa em sua maior parte). Esta margem de segurança tem por objetivo compensar de alguma maneira a fratura que sofre o carvão à medida que desce no alto forno com o conseqüente aumento de $\frac{a}{\epsilon^3}$ e diminuição de produção do alto forno.

Outra simplificação consiste em prescindir da umidade do ar. Esta simplificação se justifica, porque ainda que supondo o ar saturado de vapor de água, o vapor de G resultante, não é muito diferente do valor de G , supondo o ar seco.

Finalmente, é necessário ter em conta que a própria linha de inundação é uma linha média de muitas experiências em colunas de recheio com sistemas gás-líquido⁴ e, portanto, não é uma curva matematicamente exata.

Apesar de tôdas estas restrições a teoria da inundação das colunas de recheio aplicada aos altos fornos é um tratamento totalmente satisfatório do ponto de vista qualitativo e suficientemente aproximado do ponto de vista quantitativo. Por conseguinte, para um tipo de carga de uma composição química determinada o valor da abscissa:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

do ponto de trabalho de cada alto forno é constante, qualquer que seja a produção do alto forno. Já se viu que êste valor nos altos fornos de Monlevade é 0,0048.

Em troca, a ordenada do ponto de trabalho depende das propriedades físicas (superfície específica e porosidade) do

carvão isento de voláteis que chega à zona de fusão, da produção do alto forno e do consumo específico de ar de acôrdo com a fórmula:

$$\text{Ordenada} = K_1 \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot x^2 \cdot y^2$$

sendo K_1 = constante característica da composição química da carga do alto forno.

Para os altos fornos de Monlevade se considera que:

$$K_1 = 4,48 \cdot 10^{-16}$$

Especialmente a porosidade (ε) do carvão isento de voláteis que chega à zona de fusão, a produção (x) do alto forno e o consumo específico de ar (y) tem influência no valor da ordenada do ponto de trabalho, já que aparecem elevadas ao cubo a primeira e ao quadrado as outras duas.

Por isso nunca se insistirá bastante na conveniência de peneirar o carvão no estado o mais sêco possível, porque a umidade aglomera os finos, que são retidos portanto na peneira. Como depois de peneirado o carvão é carregado nos altos fornos, os finos aglomerados pela umidade entram nos altos fornos e diminuem o valor de ε . Como conseqüência a capacidade da produção do alto forno também diminui.

Para cada alto forno pode estabelecer-se uma relação do tipo:

$$K_2 = \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot x^2 \cdot y^2$$

entre as propriedades físicas $\frac{a}{\varepsilon^3}$ do carvão isento de voláteis

que chega à zona de fusão, a produção (x) do alto forno e o seu consumo específico de ar (y). Para os altos fornos de Monlevade se considera que:

$$K_2 = 6,17 \cdot 10^{14}$$

quando se carrega carvão sêco retido em 3/8".

O operador do alto forno sabe que quando o alto forno "se pendura" devem resfriar o ar insuflado, diminuir sua pres-

são e diminuir a vazão dêsse ar. Todo êle não é outra coisa que diminuir o valor de G e, portanto, diminuir a ordenada do ponto de trabalho do forno. Anàlogamente o operador que trabalha nos altos fornos observa que o forno tem uma marcha mais regular quando o carvão carregado é do tamanho grande. O que ocorre então é que o valor de ε e, portanto, a capacidade do forno é maior.

Em geral o trabalho da zona de fusão dos altos fornos pode interpretar-se mediante a teoria das colunas de recheio. Com essa teoria se demonstra a importância dos fatores físicos (produção do alto forno, porosidade do leito de carvão sem voláteis, etc.) na marcha da zona de fusão.

6. CONCLUSÕES

- 1) Estabelecem-se as limitações da zona de fusão dos altos fornos, demonstrando-se que essas limitações obedecem a uma relação do tipo:

$$K = \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot x^2 \cdot y^2$$

- 2) Discutem-se cada uma das variáveis, tanto físicas, como químicas que afetam o trabalho da zona de fusão e se indica a forma de atuar sôbre elas para obter uma marcha uniforme do alto forno.

BIBLIOGRAFIA

1. *Anhaltzahlen fur die Warmewirtschaft* — Verlagstahleisen m.b.h. — Dusseldorf.
2. M. A. PAWLOW — *Metallurgie des Roheisen*. Band II, 201. VEB Verlag Technik — Berlim.
3. *British Chem. Eng.*, 330/334; May 1960.
4. *Absorption and Extraction*. Mc-Graw-Hill, Sherwood; New York.