

NATUREZA E EFEITOS DAS MATÉRIAS VOLÁTEIS DO CARVÃO VEGETAL UTILIZADO NOS ALTOS FORNOS DE MONLEVADE ⁽¹⁾

JOAQUIM BURREL ⁽²⁾
JANUSZ WSCIEKLICA ⁽³⁾

RESUMO

O presente trabalho estuda a composição dos gases desprendidos pelo carvão vegetal ao ser aquecido. Demonstra que estes gases são redutores e, portanto, podem intervir nas reações do alto forno. Com efeito, a soma do hidrogênio e monóxido de carbono nestes gases é \simeq 83% em volume.

Estuda, em seguida, a influência quantitativa notável das matérias voláteis do carvão na quantidade e na composição dos gases que saem do alto forno, mas também, demonstra que a influência destas substâncias no balanço térmico do forno é desprezível.

O cálculo do carbono consumido na redução direta se faz a partir da relação entre as quantidades de monóxido de carbono que sai do alto forno e o total de gases secos que saem do mesmo forno. O monóxido de carbono produzido pelas substâncias voláteis é \simeq 8% em peso do monóxido de carbono que sai do alto forno. Por outro lado, os voláteis do carvão vegetal são 4,8% em peso do total de gases que saem do alto forno. À vista do exposto, é necessário ter em conta os voláteis do carvão no cálculo do carbono consumido na redução direta.

O trabalho menciona também a variação da composição dos gases desprendidos do carvão vegetal à medida que aumenta a temperatura.

1. INTRODUÇÃO

Tôda a fabricação de gusa na Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira é feita em altos fornos a carvão vegetal. Como é sabido, dêste carvão desprendem-se matérias voláteis, à medida

(1) Contribuição Técnica n.º 418, Discutida na Comissão «G» do XV Congresso Anual da ABM; São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM; Engenheiro da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

(3) Membro da ABM; Engenheiro da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

que desce no alto forno. A determinação da natureza destas matérias voláteis permite conhecer melhor o funcionamento dos fornos. O interesse não é somente quantitativo, porque o volume dos gases desprendido pelo carvão vegetal é notável, mas também qualitativo, porque a composição destes voláteis tem influência na composição dos gases que saem do alto forno.

Alguns cálculos importantes para caracterizar a marcha dos altos fornos — por exemplo, porcentagem na redução direta, quantidade de gases produzidos, etc. — não podem ser realizados com exatidão sem conhecer a natureza dos voláteis desprendidos do carvão vegetal.

O objetivo deste trabalho é determinar a forma em que se verifica esse desprendimento e a sua composição. O carvão utilizado não tem procedência nem preparação homogênea, pelo que foi necessário realizar ensaios durante prolongado tempo (cêrca de três meses).

2. CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal é obtido por destilação sêca da madeira, isto é, aquecendo-a na ausência de ar.

O resíduo desta destilação é o carvão vegetal e a quantidade é tanto maior quanto menor a temperatura final da destilação. A composição química do carvão também é influenciada pela temperatura de destilação da madeira.

Em geral, pode-se dizer que, à medida que aumenta a temperatura de destilação da madeira, aumenta a porcentagem de carbono no carvão obtido e diminuem as porcentagens de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, segundo se mostra na seguinte tabela:

TABELA 1

Composição do carvão vegetal obtido a diferentes temperaturas

Temp. °C	% C	% H ₂	O ₂ + N ₂	M. V. (t) carvão m ³
300	75,09	4,93	19,98	355
400	79,81	4,33	15,86	328
500	88,87	4,23	7,89	283
700	95,39	1,79	2,85	122

A última coluna desta tabela dá o volume de matérias voláteis (M. V.) contidas em uma tonelada de carvão vegetal; pode-se ver que a quantidade diminui ao aumentar a temperatura final da destilação da madeira.

O carvão vegetal utilizado nos altos fornos de Monlevade procede de florestas nativas e a sua composição não é constante devido aos numerosos fatores aleatórios que intervêm na sua preparação. Como exemplo de composição, apresentamos a análise imediata do carvão utilizado nos fornos desta usina durante o ano de 1958:

Carbono fixo	72,8%
Matérias voláteis	20,4%
Cinzas	6,8%

Todos os números anteriores estão referidos ao carvão sêco. As matérias voláteis e as cinzas foram obtidas segundo as normas usuais. O carbono fixo foi calculado por diferença.



Fig. 1 — Esquema do aparelho de extração de materiais voláteis do carvão vegetal.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL PARA EXTRAIR AS MATÉRIAS VOLÁTEIS

O aparelho utilizado para realizar a extração está representado na figura 1. O método operatório foi o seguinte:

A amostra do carvão a ensaiar foi triturada a —10 mesh USS (2,0 mm). Dêste modo aumenta-se a superfície específica do carvão e facilita-se o desprendimento posterior das matérias voláteis.

A amostra triturada foi sêca em estufa com corrente de ar a 105°C, até pêsso constante; um pêsso determinado da amostra assim preparada foi colocado numa naveta de aço inoxidável introduzido depois num tubo de porcelana aquecido elêtricamente.

O tubo de porcelana, que tem volume conhecido, foi purgado com nitrogênio puro antes de ligar a corrente elêtrica de aquecimento.

Os gases que se vão desprendendo, ao aumentar a temperatura, são recolhidos num frasco aferido que contém água acidulada saturada de cloreto de sódio.

A extração das matérias voláteis é considerada terminada depois de manter o carvão à temperatura de 950°C durante 10 minutos. Experiências realizadas aquecendo o carvão até 1.300°C demonstram que não há desprendimento apreciável de matérias voláteis depois de manter o carvão a 950°C durante 10 minutos.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Pelo processo descrito foram realizadas 24 extrações de matérias voláteis nas amostras médias, referentes a 10 dias, dos carvões utilizados nos altos fornos de Monlevade, e analisados, num aparelho Orsat, os gases resultantes.

O seguinte quadro dá os valores médios da composição dos gases obtidos nestas extrações:

	% em volume	% em pêsso
CO ₂	9,5	37,2
CO	16,3	40,7
H ₂	67,0	11,9
CnHm	7,2	10,2
Total	100,00	100,00

Êstes resultados foram obtidos, depois de efetuada uma correção devida ao nitrogênio utilizado na purga do aparelho e à reação do dióxido de carbono desprendido com o carbono do carvão.

Devido à diversidade de procedência do carvão vegetal, a composição dos voláteis não é constante. No quadro seguinte, é dado o desvio padrão (“standard deviation”) das análises:

	% em volume	% desvio padrão
CO ₂	9,5	± 1,1
CO	16,3	± 3,0
H ₂	67,0	± 3,4
CnHm	7,2	± 3,7
Total	100,00	

As porcentagens de oxigênio e nitrogênio encontradas dão a média zero com um desvio normal de $\pm 0,2$ e $\pm 0,6$, respectivamente. Por isso não se incluem na tabela anterior.

Para se conhecer a forma em que se vão despreendendo os gases, à medida que aumenta a temperatura do carvão, realizaram-se extrações das matérias voláteis de um mesmo carvão, a 600°C, 700°C e 800°C, e os resultados — expressos em percentagem em volume — foram os seguintes:

	Temperatura final da extração de voláteis			
	600°C	700°C	800°C	950°C
CO ₂	28,5	18,7	12,8	9,5
CO	14,6	15,7	17,6	16,3
H ₂	35,4	51,5	60,0	67,0
CnHm	21,4	14,1	9,6	7,2
Total	100,0	100,0	100,0	100,0

Êstes resultados indicam que, ao aumentar a temperatura, diminui a concentração de dióxido de carbono e hidrocarburetos nos gases, e aumenta a concentração de hidrogênio e monóxido de carbono. Os resultados estão representados gráficamente na figura 2.

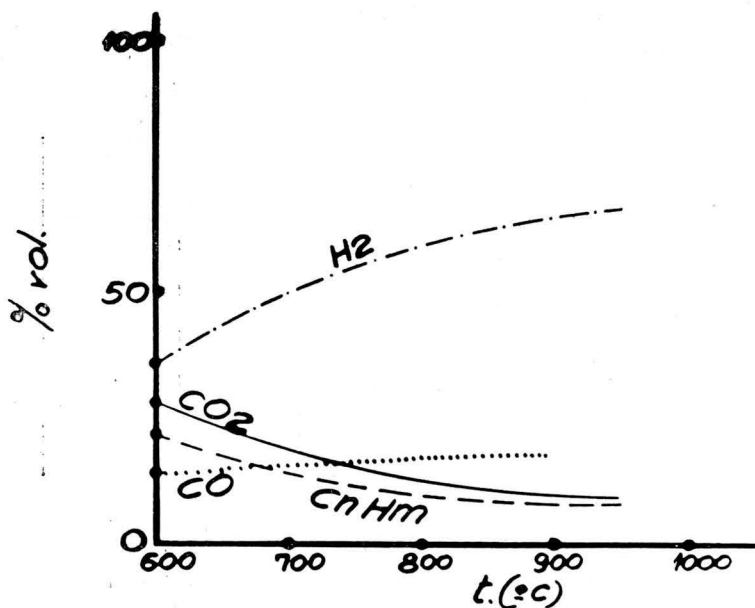
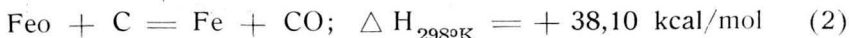
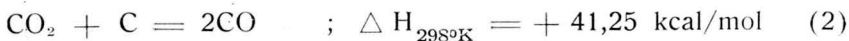


Fig. 2 — Composição dos gases desprendidos pelo carvão vegetal ao aumentar a temperatura.

5. INFLUÊNCIA DAS MATÉRIAS VOLÁTEIS DO CARVÃO VEGETAL NA MARCHA DOS ALTOS FORNOS

Os gases produzidos pelas substâncias voláteis do carvão vegetal são redutores, já que $\approx 83\%$ em volume destes gases são constituídos por monóxido de carbono e hidrogênio. Portanto, esses gases tomarão parte no processo global de redução que se realiza no alto forno, motivo pelo qual passamos a estudar, em continuação, a influência destes gases, de um modo quantitativo.

Monóxido de carbono produzido no alto forno — Quase todo o carbono fixo contido no carvão é convertido em monóxido de carbono; parte, mediante combustão ao nível das ventaneiras, e parte, no processo de redução direta. São estas as reações que expressam esta conversão:



O carbono fixo não consumido nas reações anteriores fica retido no gusa. Portanto, designando:

$$a = \frac{\text{kg de carvão sêco consumido}}{\text{kg de gusa}}$$

$$a = \frac{\text{kg de carbono contido no carvão sêco}}{\text{kg de carvão sêco}}$$

$$i = \frac{\text{kg de carbono contido no gusa}}{\text{kg de gusa}}$$

o monóxido de carbono produzido no alto forno a partir do carvão fixo de carvão será:

$$(a \cdot d - i) \frac{28}{12} \quad (\text{kg CO/kg gusa})$$

Entretanto, nos altos fornos a carvão vegetal, há ainda outra fonte importante de monóxido de carbono, constituída pelas matérias voláteis desprendidas pelo carvão:

$$c = \frac{\text{kg de M. V. contidos no carvão sêco}}{\text{kg de carvão sêco}}$$

$$z_1 = \frac{\text{kg de monóxido de carbono}}{\text{kg de M. V. produzidos pelo carvão sêco}}$$

o monóxido de carbono produzido no alto forno a partir do voláteis será:

$$a \cdot c \cdot z_1 \quad (\text{kg CO/kg gusa})$$

A quantidade total de monóxido de carbono produzida no alto forno será, portanto:

$$B = \left[\frac{28}{12} (ad - i) + a \cdot c \cdot z_1 \right] \quad (\text{kg CO/kg gusa})$$

Por exemplo, nos altos fornos de Monlevade, considerando os seguintes valores típicos:

$$a = 0,741$$

$$c = 0,204$$

$$d = 0,728$$

$$i = 0,040$$

$$z_1 = 0,407$$

a quantidade média de monóxido de carbono produzida é de:

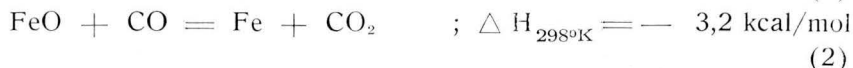
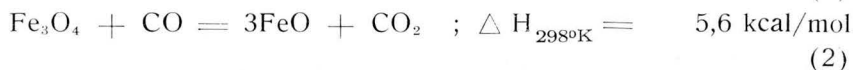
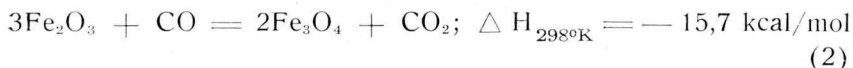
$$\frac{28}{12} (0,539 - 0,040) + 0,062 = 1,226 \text{ (kg CO/kg gusa)}$$

Os números anteriores indicam que o monóxido de carbono procedente dos voláteis (0,062) atinge $\approx 5\%$ em peso do monóxido de carbono produzido (1,226). Esta é uma proporção importante e que não pode ser desprezada.

O monóxido de carbono procedente dos voláteis influirá nos processos de redução indireta do alto forno, já que se desprende a temperaturas que não excedem os 950°C .

Total de gases que saem do alto forno — Os voláteis do carvão vegetal modificam, tanto a quantidade, como a composição dos gases que saem do alto forno. Com efeito, embora a maior proporção em peso das matérias voláteis corresponda ao monóxido de carbono, nelas ocorrem também percentagens importantes de dióxido de carbono, hidrogênio e hidrocarburetos.

Monóxido de carbono que sai do alto forno — Já se viu que, nos altos fornos de Monlevade, são produzidos, em média, 1,252 kg CO/kg gusa. Parte desse monóxido de carbono é consumido na redução indireta dos óxidos de ferro, de acordo com as equações:



Para determinar a quantidade de monóxido de carbono consumido na redução indireta, basta ter em conta que:

Oxigênio eliminado na redução indireta =

= oxigênio total eliminado dos óxidos metálicos —

— oxigênio eliminado na redução direta =

$$= \left[\left(\frac{48}{112} j + \frac{32}{28} k + \frac{32}{55} l + \frac{80}{62} m \right) - \right.$$

$$\left. - \left(a \cdot d \cdot x \cdot \frac{16}{12} \right) \right] \left(\frac{\text{kgO}^2}{\text{kg gusa}} \right)$$

sendo:

$$j = \frac{\text{kg de Fe contido no gusa}}{\text{kg de gusa}}$$

$$k = \frac{\text{kg de Si contido no gusa}}{\text{kg de gusa}}$$

$$l = \frac{\text{kg de Mn contido no gusa}}{\text{kg de gusa}}$$

$$m = \frac{\text{kg de P contido no gusa}}{\text{kg de gusa}}$$

$$x = \frac{\text{kg de C consumido na redução direta}}{\text{kg de C consumido no alto forno}}$$

A carga dos altos fornos contém o ferro, silício, manganês e fósforo sob a forma de Fe_2O_3 ; SiO_2 ; MnO_2 e P_2O_5 . Levando em conta os fatores respectivos, o monóxido de carbono eliminado na redução indireta será:

$$C = \left[\left(\frac{48}{112} j + \frac{32}{28} k + \frac{32}{55} l + \frac{80}{62} m \right) - \left(a \cdot d \cdot x \cdot \frac{16}{12} \right) \right] \cdot \frac{28}{16} \left(\frac{\text{kg CO}}{\text{kg gusa}} \right)$$

Nos altos fornos de Monlevade, considerando os seguintes valores típicos:

$$j = 0,948$$

$$k = 0,006$$

$$l = 0,004$$

$$m = 0,002$$

$$x = 0,209$$

O consumo de redução indireta será de:

$$C = 0,467 \text{ kg CO/kg gusa.}$$

Daquí se deduz que o monóxido de carbono que sai do alto forno é:

$$B - C = 1,226 - 0,467 = 0,759 \text{ kg CO/kg gusa.}$$

Este cálculo somente é possível quando se conhece o valor de B, isto é, quando se conhece a composição dos voláteis do carvão vegetal.

Dióxido de carbono que sai do alto forno — O dióxido de carbono, que sai do alto forno, tem três procedências: as reações da redução indireta; os voláteis do carvão e a decomposição das adições (calcário).

Nos altos fornos de Monlevade não se utilizam adições que se decomponham dando dióxido de carbono, pois eles trabalham com alta percentagem de sinter na carga, capaz de conter todo o óxido de cálcio exigido como fundente. Portanto, o dióxido de carbono procederá somente das duas primeiras fontes, e será:

$$\left(\frac{44}{28} \cdot C + a \cdot c \cdot z_2 \right) \text{ kg CO}_2/\text{kg gusa}$$

sendo:

$$z_2 = \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg de voláteis produzidos pelo carvão sêco}}$$

Nos altos fornos de Monlevade, considerando os seguintes valores típicos:

$$C = 0,467$$

$$a = 0,741$$

$$c = 0,204$$

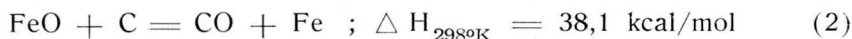
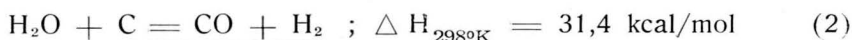
$$z_2 = 0,372$$

a quantidade de dióxido de carbono produzida é:

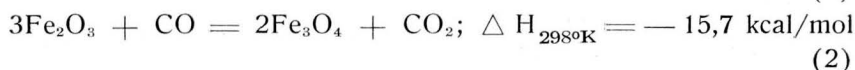
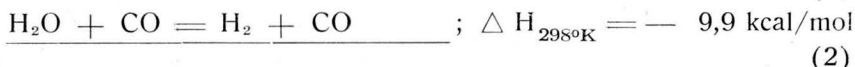
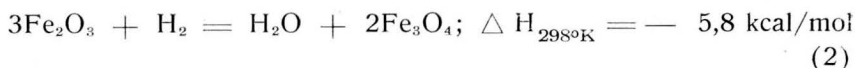
$$7,734 + 0,056 = 0,790 \text{ kg CO}_2/\text{kg gusa.}$$

Os números anteriores indicam que o dióxido de carbono procedente dos voláteis (0,056) representa $\cong 7\%$ em peso de dióxido de carbono total produzido (0,790).

Hidrogênio que sai do alto forno — Embora ainda não totalmente esclarecido, parece que o hidrogênio produzido nos gases dos altos fornos é pouco utilizado, porque predomina a reação inversa de decomposição da água. Com efeito, acima de 1.000°C as reações seriam:



E, portanto, o hidrogênio não tem intervenção na reação global de redução. Nas temperaturas mais baixas (400°C a 500°C) as reações são:



Neste caso, o hidrogênio tem limitada intervenção na reação global de redução. As coisas acontecem como se o hidrogênio catalizasse, tanto a redução direta, como a indireta dos óxidos de ferro. Para se ver como as reações de decomposição da água estão dirigidas para a direita, basta considerar que a reação:



tem a 1.000°C a seguinte constante de equilíbrio:

$$K_{1.273^\circ\text{K}} = 89$$

ao passo que a reação:



tem a 400°C a seguinte constante de equilíbrio:

$$K_{673^\circ\text{K}} = 55$$

Portanto, supomos que o hidrogênio que sai do alto forno proceda da decomposição da umidade do ar e dos voláteis do carvão.

Isto é:

$$\left(\frac{2}{18} \cdot n \cdot A + a \cdot c \cdot z_3 \right) \left(\frac{\text{kg H}_2}{\text{kg gusa}} \right)$$

sendo:

$$A = \frac{\text{kg de ar úmido insuflado}}{\text{kg de gusa}}$$

$$n = \frac{\text{kg de vapor de água no ar úmido}}{\text{kg de ar úmido insuflado}}$$

$$z_3 = \frac{\text{kg de hidrogênio}}{\text{kg de voláteis produzidos pelo carvão sêco}}$$

Nos altos fornos de Monlevade, considerando os seguintes valores típicos:

$$A = 2,097$$

$$n = 0,018$$

$$a = 0,741$$

$$c = 0,204$$

$$z_3 = 0,119$$

o hidrogênio produzido é:

$$0,004 + 0,018 = 0,022 \text{ (kg H}_2\text{/kg gusa).}$$

Deve-se notar que, apesar de o ar insuflado nos altos fornos de Monlevade ser muito úmido (0,018 kg vapor de água/kg ar úmido), o hidrogênio procedente dos voláteis do carvão é mais de quatro vezes maior que o procedente da umidade do ar insuflado.

Hidrocarburetos que saem do alto forno — Os hidrocarburetos que saem do alto forno são unicamente os que procedem dos voláteis do carvão. Isto se explica, porque o gás dos altos

fornos a carvão é mais rico em hidrocarburetos que o gás dos altos fornos a coque. A quantidade formada de hidrocarburetos será:

$$a \cdot c \cdot z_4 \text{ (kg hidrocarburetos/kg gusa)}$$

sendo:

$$z_4 = \frac{\text{kg de hidrocarburetos}}{\text{kg de voláteis produzidos pelo carvão sêco}}$$

Nos altos fornos de Monlevade, considerando os seguintes valores típicos:

$$a = 0,741$$

$$c = 0,204$$

$$z_4 = 0,102$$

Os hidrocarburetos produzidos são: 0,015 kg/kg gusa.

Nitrogênio que sai do alto forno — O carvão vegetal não contém quantidades importantes de nitrogênio e, portanto, somente sairá do alto forno o nitrogênio que procede do ar insuflado, isto é:

$$A \cdot p \text{ (kg nitrogênio/kg gusa)}$$

Sendo:

$$p = \frac{\text{kg de nitrogênio no ar úmido}}{\text{kg de ar úmido}}$$

Nos altos fornos de Monlevade, considerando os seguintes valores típicos:

$$A = 2,097$$

$$p = 0,753$$

o nitrogênio que sai desses fornos será:

$$1,579 \text{ kg nitrogênio/kg gusa}$$

Composição dos gases que saem do alto forno — Dos valores anteriores, pode-se deduzir a composição dos gases que

saem do alto forno. Os valores típicos obtidos anteriormente foram:

C ₂	0,790	kg CO ₂ /kg gusa
CO	0,759	kg CO/kg gusa
H ₂	0,022	kg H ₂ /kg gusa
C _n H _m	0,015	kg C _n H _m /kg gusa
N ₂	1,579	kg N ₂ /kg gusa
Total (E-D)	== 3,164	kg gases secos/kg gusa

Portanto, a composição dos gases é a seguinte:

	% em pêsos	% em volume
CO ₂	25,0	15,6
CO	24,0	23,9
H ₂	0,7	9,7
C _n H _m	0,5	0,9
N ₂	49,8	49,9

Esta composição foi comprovada mediante análises do gás dos altos fornos no aparelho Orsat e a concordância obtida foi boa, exceto para o hidrogênio, que deu valores mais baixos, indicando que êle tem uma certa participação nas reações da cuba.

Pode-se observar que a relação CO/CO₂ em volume é 1,53, a qual está de acôrdo com o pequeno consumo de carbono (0,539 kg carbono/kg gusa).

6. INFLUÊNCIA DAS MATÉRIAS VOLÁTEIS NO BALANÇO TÉRMICO DOS ALTOS FORNOS

Já se viu que as matérias voláteis do carvão influem na quantidade de gases que saem do alto forno. Com efeito, dos 3,164 kg gases secos/kg gusa que saem do forno, 0,152 procedem dos voláteis do carvão vegetal. Viu-se, também, que esta cifra é 4,8% em pêsos do total de gases secos que saem do forno. Uma comprovação dêste número é a seguinte: a percentagem dos voláteis será:

$$\frac{0,151 \text{ (kg voláteis/kg gusa)}}{0,741 \text{ (kg carvão sêco/kg gusa)}} \cdot 100 =$$

$$= 20,4\% \text{ (kg voláteis/100 kg carvão sêco)}$$

que é justamente o valor de 100 . c. determinado de acôrdo com a norma ASTM: D980-53. Em média, o calor eliminado dos altos fornos de Monlevade pelos gases que dêles saem tem sido de 125 kcal/kg gusa. Portanto, o calor arrastado pelos voláteis do carvão é:

$$125 \cdot 0,048 = 6 \text{ kcal/kg gusa.}$$

Esta quantidade é sòmente 0,24% do calor total eliminado do alto forno (aproximadamente 2.500 kcal/kg), de modo que as matérias voláteis quase não têm influência no balanço térmico do alto forno.

7. CARBONO CONSUMIDO NA REDUÇÃO DIRETA

O carbono consumido na redução direta é calculado do seguinte modo: Analisa-se o gás que sai dos altos fornos e obtém-se uma percentagem em pêso (v) do respectivo monóxido de carbono. Êste valor deve satisfazer à equação:

$$\begin{aligned} v &= 100 \cdot \left(\frac{B-C}{E-D} \right) = \\ &= 100 \cdot \left(\frac{\text{kg de CO que sai do alto forno}}{\text{kg gases secos que saem do alto forno}} \right) \end{aligned}$$

Tanto C como E são funções de x e, portanto, pode-se escrever:

$$v = f(x)$$

com o que resulta uma equação do primeiro grau, na qual x é a única incógnita.

Para se ver a influência dos voláteis no cálculo de x, basta considerar o seguinte: tendo em conta os voláteis desprezados pelo carvão vegetal, obtiveram-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned} v &= 23,9 \quad (\text{análises}) \\ (B-C) &= 0,759 \\ (E-D) &= 3,164 \\ x &= 0 \ 209 \end{aligned}$$

No entanto, não se levando em conta os voláteis, os valores são:

$$\begin{aligned}v &= 23,9 \quad (\text{análises}) \\(B-C) &= 0,733 \\(E-D) &= 3,070 \\x &= 0,240\end{aligned}$$

isto é, este último valor de x é 15% maior que o valor real.

8. CONCLUSÕES

- 1) Os voláteis do carvão vegetal constituem 4,8% em peso do total de gases secos que saem do alto forno.
- 2) A composição em volume dos voláteis desprendidos pelo carvão vegetal é, em %: CO_2 — 9,5; CO — 16,3; H_2 — 67,0; C_xH_m — 7,2.
- 3) As substâncias voláteis do carvão vegetal praticamente não influem no balanço térmico do alto forno. Porém, o cálculo do carbono consumido na redução direta, e, portanto, o balanço térmico dos fornos não pode ser realizado com exatidão, sem ter em conta as matérias voláteis procedentes do carvão vegetal.

*

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Joseph Hein, Diretor-Superintendente da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira e ao Dr. Henri Meyers, Diretor-Superintendente da Usina de Monlevade, a autorização e o estímulo para publicar este trabalho.

BIBLIOGRAFIA

1. M. A. PAWLOW — Metallurgie des Roheisens, Band. I, pg. 159, 1953.
2. O. KUBASCHEWSKI e E. L. L. EVANS — Metallurgical Thermochemistry, 1951.



DISCUSSÃO ⁽¹⁾

F. P. Sousa ⁽²⁾ — Felicito os A.A. pelo trabalho apresentado, que cheguei a supor, inicialmente, fôsse inspirado em discussões ocorridas no Congresso anterior, quando houve um debate a propósito de redução direta de minérios de ferro pelo processo semelhante ao Hoganas, que o IPT de São Paulo desenvolveu. Na ocasião, houve discussões sobre a influência que poderiam ter os voláteis no alto forno. Tratava-se de uma presunção, porquanto os estudos nesse sentido são mal conhecidos, e, nos fornos operando com carvão vegetal, a influência das matérias voláteis pode ser sensível. Por ocasião daqueles debates foi evidenciado o interesse da questão, porque o Prof. Tharcísio D. de Souza Santos havia assinalado a grande influência que o teor mais ou menos elevado de voláteis do carvão vegetal exercia no desenvolvimento do processo. Também havia notícias, não bem comprovadas, de que altos fornos trabalhando com carvão vegetal de alto teor de voláteis obtinham resultados tão bons ou melhores que os com carvão de carbono fixo elevado, portanto, com baixo teor de voláteis. Como o alto forno sofre muitas influências, essa presunção poderia ser fruto de má interpretação. Mas, então, foi aventada a idéia de se procurar examinar melhor a questão, pondo de quarentena a idéia, aceita como definitiva, de que um carvão é de tanto melhor qualidade quanto mais elevado o seu teor de carbono fixo. Isso, se é presumido, não está provado de modo categórico, porque as matérias voláteis podem ter outras influências e facilitar certas reações no alto forno. Desta maneira, este trabalho constitui mais uma presunção no sentido de pesquisar a influência que as matérias voláteis possam exercer na marcha dos altos fornos.

Carlos Dias Brosch ⁽³⁾ — Os A.A. chegam à conclusão de que as substâncias voláteis do carvão vegetal praticamente não têm influência no balanço térmico. Daí se deduz que também não tenham influência direta no processo de redução, porque senão alterariam o balanço térmico do forno?

Joaquim Burrel Juvillar ⁽⁴⁾ — O que se quer dizer nas conclusões é o seguinte: que não se pode fazer corretamente o cálculo da redução direta sem ter em conta as matérias voláteis do carvão. Mas, depois de conhecidas as porcentagens da redução direta no balanço térmico do forno, os voláteis não têm praticamente influência.

F. P. Sousa — Não têm influência no balanço térmico, mas podem ter influência na marcha da operação. Poderiam ter um efeito catalítico.

C. D. Brosch — Seria pouco provável.

F. P. Sousa — Não sei se seria pouco provável.

(1) Contribuição Técnica n.º 418. Discutida na Comissão «G» do XV Congresso Anual da ABM; São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM e Presidente da Comissão; Professor da Escola de Engenharia da Universidade de Minas Gerais; Belo Horizonte, MG.

(3) Membro da ABM; Engenheiro da Companhia Siderúrgica Paulista; São Paulo, SP.

(4) Membro da ABM e co-autor do trabalho; Engenheiro da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

Janusz Wscieklica (5) — Queria esclarecer que, apesar de não haver influência no balanço térmico propriamente dito, tomando-se em consideração a quantidade de calorías arrastadas do forno pelas matérias voláteis, elas contribuem sensivelmente para as reações de redução. Como foi demonstrado pelo Eng. Joaquim Burrel Juvillar, a quantidade de hidrogênio que sai do forno — que foi de 8,2% no período estudado — é igual à soma do hidrogênio que provém da umidade do ar insuflado e do hidrogênio das matérias voláteis.

A primeira vista, poderíamos supor que o hidrogênio que passou através do forno não tomou parte nas reações de redução. Entretanto, tivemos oportunidade de verificar que não é este o verdadeiro mecanismo do que ocorre. Uma parte do hidrogênio reduz os óxidos de ferro, formando H_2O . O vapor de água formado, por sua vez reage com o C ou CO e restitui o hidrogênio. Uma sucessão destas reações pode ocorrer, comportando-se o hidrogênio como um catalisador. De qualquer forma, uma certa percentagem do hidrogênio da umidade do ar e das matérias voláteis sai do forno como H_2O .

De outro lado, o H_2O da umidade da carga, principalmente do carvão, também reage com o CO, produzindo H_2 na cuba do forno e compensando o H_2 dos voláteis ou do ar, que reagiu com o minério. É uma coincidência que o H_2 proveniente destas duas fontes é igual, no nosso caso, ao H_2 nos gases da goela.

Tivemos a oportunidade de verificar algumas vezes em Monlevade que há reação da umidade da carga com os gases: $H_2O + CO = H_2 + CO_2$. Nestes períodos, que variavam de algumas horas e alguns dias, registramos teores anormalmente elevados de H_2 e CO_2 (até 16% e 25%, respectivamente) acompanhados de CO baixo. Resumindo, podemos afirmar que o hidrogênio influencia a cinética das reações no alto forno, mas altera pouco o balanço térmico. Aliás, alguns trabalhos norte-americanos preconizam a necessidade de uma certa quantidade de hidrogênio, e se esta baixa, a marcha do alto forno torna-se irregular e, inclusive, resulta numa perda de produção.

Chegou-se a estas conclusões nos estudos sobre utilização da seagem do ar a ser insuflado no alto forno; ao secar o ar, verificou-se que a marcha do alto forno melhorava quando se baixava a umidade, mas quando ela foi eliminada completamente, tornou rapidamente a piorar. Este teor crítico é de 3 g de água por m^3 normal de ar, é aparentemente a quantidade mínima necessária para o alto forno.

J. B. Juvillar — Se o teor de umidade do ar soprado no alto forno era inferior a 3 g de água por m^3 de ar, então o forno não tinha marcha regular. Modernamente umedece-se o ar soprado no alto forno; então, a umidade do ar é decomposta no próprio alto forno, com desprendimento de hidrogênio. Mas nos altos fornos que trabalham com carvão vegetal existe um fenômeno muito típico, que se vê claramente nesta equação: $H^{\circ} \text{ saída} = H^{\circ} \text{ ar} + H \text{ vol.} = 0,04 + 0,016 = 0,020$, quer dizer, o hidrogênio dos voláteis é quatro vezes o hidrogênio do ar. O ar utilizado nos altos fornos em Monlevade é quase saturado, contém cerca de 18 g de água por kg de ar úmido, a uma temperatura média de 20°C. Apesar disso, o hidrogênio proveniente do ar é somente a quarta parte do hidrogênio procedente dos voláteis do carvão.

Parece que nos altos fornos a carvão vegetal, a necessidade de se produzir o hidrogênio umedecendo o ar é menor que nos altos fornos

(5) Membro da ABM e co-autor do trabalho Engenheiro da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

a coque, porque aquêles fornos desprendem muito hidrogênio na cuba, procedente do carvão vegetal.

Luiz Corrêa da Silva (6) — Queria congratular-me com os A.A., do presente trabalho, que acho deve ser encarado como mais uma contribuição entre as numerosas que vêm sendo feitas pelo Laboratório de Pesquisas da Belgo-Meineira, num sentido de pioneirismo de pesquisas na indústria metalúrgica do Brasil.

Quanto ao trabalho, a parte experimental é extremamente interessante e as conclusões certamente são justificadas. Mas, queria fazer uma observação a respeito da interpretação dos cálculos utilizados para chegar às conclusões, e que acho que estão sujeitos a restrições, porque hoje se pode encarar com bastante ceticismo as idéias clássicas sobre redução direta e indireta nos altos fornos, bem como as idéias sobre a marcha desse reator em regime estacionário que é o alto forno, e que precisam ser completamente revistas com base nos princípios da Física e da Físico-Química, que hoje já estão disponíveis. A Metalurgia, em geral, e a Siderurgia, em particular, constituem um ramo da Engenharia retardatário no emprêgo dos princípios citados.

Depois da última guerra, no entanto, estudos em todos os ramos da Engenharia foram estendidos e foram atacados com grande empenho. Assim, apenas a título de exemplo, nos Estados Unidos estão estudando a marcha do reator do alto forno por meio de computadores eletrônicos, tentando estabelecer um conjunto de equações que permitam calcular as influências das variáveis independentes do alto forno sobre as suas variáveis dependentes. As variáveis independentes seriam a quantidade de carvão introduzida na carga, a temperatura do ar, etc., e as variáveis dependentes seriam a produção diária, o «coke-rate», etc. De modo que, entre outras coisas, aquêles conjunto de equações que encontramos nos livros e artigos sobre siderurgia de até poucos anos atrás, que não eram mais do que a transposição simplificada para a Metalurgia de equações químicas do tipo das que os químicos se utilizam para soluções aquosas ou para reações entre gases, esse conjunto todo de reações que teriam lugar no alto forno quase que se pode dizer que deve ser posto completamente de lado; é um conjunto de equações sem significado do ponto de vista da Metalurgia. É esta uma afirmativa com a qual acho que o Eng. Janusz Wscieklica concordará, pelo menos em parte, porque os processos de redução em alto forno não podem ser expressos por equações como esta: $\text{FeO} + \text{C}$, dando $\text{CO} + \text{Fe}$.

Hoje sabemos perfeitamente que a reação no alto forno é complexa: uma reação entre um sólido e um gás, com a formação de camadas intermediárias, e difusão nessas camadas. Quer dizer que uma equação como a que acabo de apontar não representa o mecanismo do processo que está tendo lugar, nem a proporção dos reagentes e produtos obtidos. Portanto, o seu valor é nulo.

Queria fazer esta observação. Teria ainda muitas outras, mas o assunto é extenso de mais...

F. P. Sousa — O Sr. poderá apresentar, por escrito, o seu ponto de vista, que seria anexado ao trabalho; seria como que um trabalho paralelo. O assunto é de alto interesse, de modo que é uma verdadeira «bomba» que se lança. Todo mundo, ao produzir carvão vegetal, só pensava em fazê-lo com o mais alto carbono fixo, mesmo com prejuizo do rendimento da lenha. Pode ser que não seja tanto assim.

(6) Membro da ABM; Docente da EPUSP e Engenheiro do IPT; São Paulo, SP.

L. C. da Silva — Tenho a impressão, Sr. Presidente, que já é tempo de termos no próximo Congresso da ABM uma Reunião Aberta sobre prática de altos fornos — coisa que até hoje ainda não foi feita — abrangendo somente a discussão do que se passa no alto forno, sob todos os pontos de vista.

F. P. Sousa — A sua proposta será transmitida à direção da ABM.

L. C. da Silva — Quero dar uma pequena justificativa para que não se pense que estou fazendo uma afirmação afoita. Dois livros, dos mais recentes, sobre altos fornos, publicados na Rússia, e que todos os siderurgistas aqui presentes conhecem, são de Pavlov, em quatro volumes, e de Pochvisnev, também interessante. Trata-se de duas obras monumentais, as únicas que conheço publicadas no mundo inteiro, depois de 1950, sobre o assunto. Em certa página do livro de Pavlov encontra-se a afirmação de que no alto forno é desejável o máximo de redução direta, e no outro livro, o de Pochvisnev, encontra-se a afirmação de que no alto forno é desejável aumentar a redução indireta. De modo que um dos dois vai para a Sibéria. (*Risos*).

J. B. Juvillar — Queria dizer, sobre essa observação do Eng. Luiz Corrêa da Silva, que de fato é difícil formular as reações químicas que ocorrem no alto forno. Na separata somente são dadas as mais representativas, as mais prováveis, sob o ponto de vista termodinâmico, mas não as únicas, e ainda não se faz uso delas nos cálculos do trabalho; são apenas equações químicas ilustrativas.

L. C. da Silva — Como observação final, desejo dizer o seguinte: certamente, os A.A. do trabalho não devem ser criticados, pois nada mais fizeram do que aplicar o tratamento clássico na análise dos dados de alto forno. Isso permite fazer comparações com dados anteriores, chegar a conclusões comparativas. Referi-me apenas ao significado intrínseco das interpretações, significado esse que é bastante duvidoso.

J. B. Juvillar — A propósito dessas constatações, tivemos oportunidade também de verificar na semana passada, antes de vir para cá, dois trabalhos sobre umidificação do ar soprado em alto forno, sendo que o primeiro afirma que o hidrogênio tem participação direta nas reações da cuba, e o segundo afirma que o hidrogênio não tem nenhuma participação nas reações da cuba. Esses trabalhos são recentes e feitos por dois especialistas em alto forno. Quer dizer que o alto forno, apesar de ser um aparelho muito velho, ainda é uma grande incógnita.

J. Wscieklica — Ao escrever este trabalho e ao usar as fórmulas velhas, estávamos perfeitamente cientes de que elas não ocorrem, mas usamos esse modo de apresentação para pôr em relêvo alguns fatores de operação do alto forno. Ao fazer isso, não queremos pressupor nada no que diz respeito aos fenômenos internos do alto forno, mas queríamos tirar algumas conclusões que fôssem de utilidade para o operador do forno. Infelizmente, é necessário apresentar fórmulas aritméticas compreensíveis.

Se quiséssemos apresentar as conclusões deste trabalho numa forma que julgamos mais certa, entrando nos assuntos mais concretos da Termodinâmica, da Cinética, etc., não nos seria possível apresentar o resultado em forma de conclusões curtas e claras. Mas posso adiantar que estamos trabalhando nesse ramo também, empenhados num estudo das limitações da marcha do alto forno, inspirados em parte pelos estudos norte-americanos, liderados por Wagstaff, do grupo de pesquisas da United States Steel Corporation, e que queríamos aplicar no nosso caso.

Já temos adiantada parte dêste estudo, dividindo-o em três áreas: 1) as limitações do alto forno do ponto de vista da fluidização das camadas do material carregado; 2) o alto forno como reator, com leito sólido atravessado pelo gás e onde ainda aparece a fase líquida representada pela escória viscosa, e, finalmente, 3) limitações que decorrem da velocidade de redução dos óxidos carregados no forno.

Esperamos, para o próximo ano ou daqui há dois anos, completar êsse estudo que poderá, talvez, esclarecer melhor as reações, os fenômenos verdadeiros que ocorrem no alto forno e que neste trabalho foram propositalmente postos de lado.

F. P. Sousa — As palavras do Eng. Wscieklica confirmam o interesse na Reunião Aberta proposta pelo Eng. Corrêa da Silva; não sei, porém, se não seria oportuno esperarmos um pouquinho mais, para que amadurecessem as idéias novas. É certo que o proponente dessa Reunião está num nível capaz de interpretar essas idéias novas, mas creio que ainda não exista muita gente em condições de acompanhá-las com o interesse e com a aplicação que se objetiva no caso. Enfim, essa sugestão será transmitida de qualquer maneira; mesmo que ela não resulte numa primeira Reunião Aberta, será uma discussão preliminar.

Orlando Barbosa (7) — Foi aventada a conveniência de se considerarem os conhecimentos mais avançados no campo da Física, da Físico-Química e da Química para o estudo de processos industriais, como o de fabricação de gusa no alto forno. Tenho uma dúvida. Lembro que a orientação que nos dão êsses conhecimentos teóricos é de suma importância, mas citaria ainda um fator bastante esquecido no campo siderúrgico, que é o da necessidade de se medir dentro das condições peculiares de cada usina, de se levantar as reações empíricas de gamas variadas. Êsses estudos modernos, feitos nos Estados Unidos, utilizando-se computadores eletrônicos, a que se referiu o Eng. Luiz Corrêa da Silva, nada mais são do que um levantamento empírico, orientado, naturalmente, pelos conhecimentos teóricos dos fenômenos, mas reações empíricas dentro das condições de cada usina e de cada alto forno.

É necessário quantificar, antes de mais nada, as reações entre as variáveis e usar êsses valores assim determinados válidos apenas para cada usina, a fim de se obter resultados mais vantajosos dentro de cada usina isoladamente.

J. B. Juvillar — O nosso objetivo foi o de quantificar o trabalho dos altos fornos. Quer dizer, êsse estudo dos voláteis que poderia ter sido feito, por exemplo, para relacionar a qualidade da madeira com a qualidade do carvão, não foi realizado com êsse fim, mas sim como contribuição ao melhor conhecimento dos altos fornos, para uma exata realização do balanço térmico dos altos fornos a carvão vegetal.

O. Barbsa — No caso, aí, não há nenhuma dúvida. Os senhores fizeram os estudos e deram condições para que o alto forno pudesse fazer um balanço térmico — vamos dizer assim — mais bem feito, dentro das condições das matérias primas que utilizam. Considerei o aspecto, não do trabalho em si, mas em relação ao que aventou o Eng. Luiz Corrêa da Silva, da necessidade de se utilizarem conhecimentos mais avançados, mais modernos, e da necessidade ainda dêsse terceiro fator: a preocupação de quantificar, de relacionar variáveis.

(7) Membro da ABM; Engenheiro da CSN; Volta Redonda, RJ.

L. C. da Silva — A discussão poderia alongar-se por algumas horas. Aliás, seria mais uma conversação, com troca de idéias que seriam muito úteis. Não há um ponto de vista teórico nem um ponto de vista prático; não há cientistas e mestres. Há o engenheiro que une a ciência à prática; examina o alto forno sob a luz dos conhecimentos científicos que já são disponíveis. A idéia é aplicar êsses conhecimentos científicos àquilo que se observa nos altos fornos reais e funcionantes. Não há uma idéia de se separar, mas de tentar interpretar resultados que têm sido empíricos, interpretá-los de forma mais segura, mais justificada, utilizando conhecimentos, às vêzes elementares, já disponíveis em outro ramo da ciência ou na própria Metalurgia; porque é um fato que o desenvolvimento do estudo das reações entre sólidos ou entre sólidos e líquidos, ou ainda entre sólidos e gases é, em grande parte, fruto do trabalho de metalurgistas. Não foram químicos que estudaram as reações entre Fe e O ou entre CO e óxido de ferro, mas foram metalurgistas. De modo que temos estudos complexos e bastante avançados que visam a interpretar êsse fenômeno e interpretá-lo de maneira racional, para que se evitem definições arcaicas como essa de redução direta ser essa equação $\text{FeO} + \text{C}$ dando $\text{CO} + \text{Fe}$. Isto ocorria ao tempo em que se aplicava a Química diretamente à Metalurgia, mas hoje a Metalurgia já tem cabedal científico de conhecimentos para serem aplicados a aparelhos existentes e funcionantes. A idéia seria, pois, essa de unir as duas coisas, que estavam separadas.

Walter de Almeida Motta ⁽⁸⁾ — Não consigo distinguir a barreira que o Eng. Corrêa da Silva quer levantar entre a Química e a Metalurgia. É a única observação que tenho a fazer.

L. C. da Silva — O ponto n.º 19 do Curso «Princípios Básicos da Metalurgia» dado pela ABM indica oito ou dez importantes diferenças entre reações químicas e reações metalúrgicas.

(8) Membro da ABM; Engenheiro da CSN; Volta Redonda, RJ.