

# ASPECTOS TÉRMICOS DA SINTERIZAÇÃO COM CARVÃO VEGETAL <sup>(1)</sup>

JANUSZ WSCIEKLICA <sup>(2)</sup>

## RESUMO

*As medições bastante completas, realizadas em Monlevade, permitem construir os balanços de materiais e térmico da sinterização. Completando os dados da operação industrial com os obtidos no laboratório, o autor determina os parâmetros que caracterizam a cinética térmica da sinterização. Sob este ângulo, o carvão vegetal — por excesso de sua reatividade — aparece como um combustível pouco favorável.*

## 1. INTRODUÇÃO

A sinterização de finos de hematita com carvão vegetal na Usina de Monlevade da C. S. B. M. já foi objeto de três comunicações nos Boletins ABM anteriores <sup>1, 2, 3</sup>. A instalação, os resultados de operação, a qualidade do sínter e o mecanismo da sinterização foram focalizados. O presente trabalho é dedicado ao estudo térmico da sinterização. Trata de responder à questão: como fabricar um bom sínter com mínima despesa de combustível. Não devemos perder de vista que a sinterização consome 80-90 kg de carvão por tonelada de sínter ou 130-150 kg/t de gusa trabalhando com 100% de sínter na carga, o que representa 15-20% do combustível total utilizado na fabricação de gusa. Referimo-nos aqui às calorias consumidas. A qualidade e preço do combustível da sinterização são inferiores ao do alto forno.

Nos quadros I e II juntamos os dados de operação e as características dos materiais empregados e produzidos. Estes dados referem-se ao período em que foram feitas as medições; aproximam-se bem dos dados médios <sup>2</sup>.

---

(1) Contribuição Técnica n.º 457. Apresentada ao XVII Congresso Anual da ABM; Rio de Janeiro, julho de 1962.

(2) Membro da ABM e Engenheiro-Chefe do Departamento de Pesquisas Técnicas da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

## QUADRO I

## Dados de operação

Área da panela (150 pés <sup>2</sup> ):.....	13,9 m <sup>2</sup>
Altura da carga:.....	42 cm
Volume de carga:.....	5,80 m <sup>3</sup>
sendo: camada superficial; 9 cm (+).....	1,25 m <sup>3</sup>
mistura principal; 28 cm (+).....	3,89 "
cascalho ("bedding"); 5 cm (+).....	0,66 "
Umidade média; % H <sup>2</sup> O .....	10,15
Densidade da mistura:.....	1,77 t/m <sup>3</sup>
Densidade de cascalho (10 - 20 m/m):.....	2,4 t/m <sup>3</sup>
Tempo de cozimento:.....	18,7 min.
Sucção (média das máximas das panelas):.....	1,274 m
Produção média por dia útil:.....	863 t
Produção média por panela:.....	6,15 t
Produção média por m <sup>2</sup> , 24 h.:.....	30,8 t
Ignição: óleo Diesel 87% C; kg/t sinter.....	1,50 kg/t

(+) - Com 9%, 10,5% e 1% de água, respectivamente.

## Composição da carga

%	PESADA	% H <sup>2</sup> O	PESO SECO
Minério Fe:.....	53,7	2,2	54,8
Minério Mn:.....	1,0	2,2	1,0
Retorno:.....	32,8	4,8	32,6
Carvão:.....	7,2	18,0	6,2
Escória alto forno.....	2,1	2,0	2,2
Calcário:.....	2,0	3,0	2,0
Palha de laminação:.....	1,2	1,0	1,2

*Análise de carvões* Materiais voláteis — 20,5% (com % em peso de 37,2 de CO<sub>2</sub>; 40,7 de CO; 11,9 de H<sub>2</sub> e 10,2 de C<sub>n</sub> H<sub>m</sub>). Cinzas — 13,5%. C fixo — 66,0%. C total na mistura — 4,60%.

## QUADRO II

## Características dos materiais. Análise granulométrica da carga

%	RETORNO	MINÉRIO	CARVÃO	MISTURA
- 3/8" + 1/4"	1,0	12,8	6,0	7,0
- 1/4" + 5 mesh	21,0	17,1	12,8	16,5
- 5 + 10 "	35,9	15,5	21,6	25,3
- 10 + 18 "	16,5	8,0	14,8	14,4
- 18 + 35 "	9,5	4,9	12,0	9,0
- 35 + 60 "	4,8	3,9	9,0	5,0
- 60 + 100 "	2,5	4,7	4,8	3,8
- 100 + 200 "	5,4	19,8	7,0	9,7
- 200 + 325 "	2,0	7,2	2,8	4,6
- 325 "	1,4	6,1	9,2	4,7

## Análise química (base seca)

%	PALHA DE LAMINAÇÃO	MINÉRIO DE FERRO	CINZAS DE CARVÃO	ESCÓRIA A F	CALCÁRIO	SÍNER (RETORNO)
Fe total	74,1	67,14	-	-	-	65,52
Fe metal	-	-	-	-	-	0,15
FeO	74,5	-	-	-	-	6,84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,0	96,01	6,21	-	-	85,92
SiO <sub>2</sub>	0,2	1,63	59,12	39,38	2,75	3,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,22	-	-	-	0,23
CaO	-	-	10,62	32,78	52,84	2,16
P. F.	-	1,07	-	-	42,26	-
G. O.	74,0	100,00	-	-	-	96,84

## 2. MEDIÇÕES EFETUADAS

As figuras 1, 2 e 3 representam os resultados obtidos. Trata-se de um grupo de dados típicos, relativo a uma panela determinada, escolhido de modo a corresponder à média das panelas pesquisadas.

A vazão do gás (Q) foi medida com tubos Pitot antes do exaustor e corrigida para a temperatura, pressão e umidade. Representa Nm<sup>3</sup>/min. de gás seco. No mesmo lugar foi instalada a tomada de gases para análise Orsat. A temperatura superficial (T<sub>s</sub>) foi medida com um pirômetro de radiação total Land, e a temperatura abaixo da grelha (T) com um termopar nú de Fe-constantan. Ao lado deste último era colocada a segunda tomada de gases para análise Orsat.

Dentro da mistura, a 5, 10, 17, 23, 30 e 37 cm da superfície, instalamos termopares Pt-PtRh protegidos com tubinhos

de sílica fundida,  $\varnothing$  6 m/m. A ponta dos pirômetros foi deixada nua. Com êste arranjo obtinha-se uma pequena inércia térmica dos termopares e distúrbio insignificante na passagem do ar pela carga.

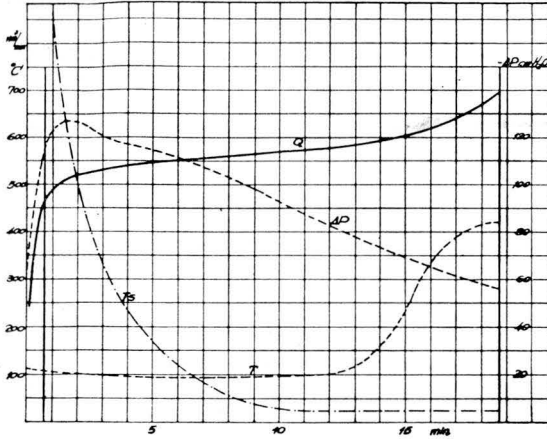


Fig. 1 — Curvas de vazão do gás (Q), sucção ( $\Delta P$ ), temperatura abaixo da grelha (T) e temperatura superficial da mistura (T) em função do tempo, características de uma panela.

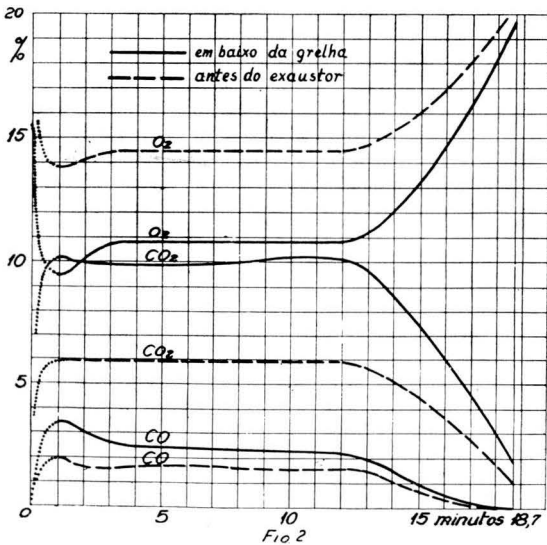


Fig. 2 — Análise do gás abaixo da grelha e antes do exaustor, em função do tempo, para a mesma panela.

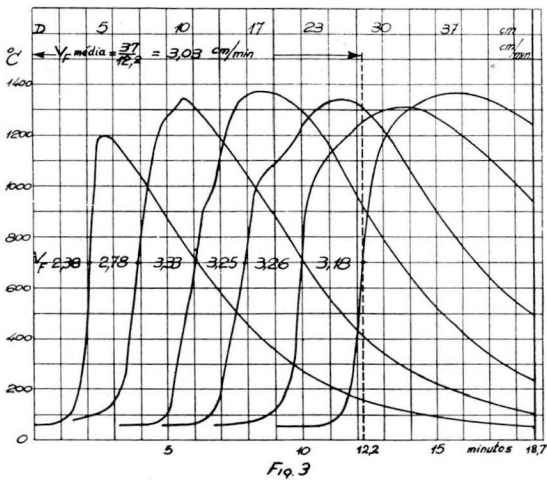


Fig. 3 — Evolução da temperatura em seis pontos verticais da mistura.

### 3. BALANÇO DOS MATERIAIS (por 1 t de mistura sêca)

#### A. Balanço do carbono (kg):

ENTRADA:	C no óleo diesel da ignição .....	1,0
	C fixo do carvão .....	40,9
	C no CO, CO <sub>2</sub> dos voláteis (CH <sub>4</sub> não queima) .....	3,5
	C no CO <sub>2</sub> do calcário .....	2,3
	<hr/>	
	Total .....	47,7

A análise direta da mistura indicou 46,0 kg C que, com o C do óleo, somam 47,0 kg C, valor bastante próximo dos 47,7 kg indicados acima. Consideramos 47,7 kg devido à melhor reprodutibilidade das análises parciais.

SAÍDA:	C nos gases, sob forma de CO e CO <sub>2</sub> .....	45,2
	C não queimado (por diferença) .....	2,5
	<hr/>	
	Total .....	47,7

O C não queimado provém dos finos arrastados pelos gases e do carvão residual no sinter. Aproximadamente

$$\frac{2,5}{47,7} \cdot 100 = 5,2\%$$

do carbono se perde.

B. *Balanço do ar (sêco):*

Para simplicidade do balanço, referimos os gases secos medidos antes do exaustor (Q, fig. 1) como ar. O êrro é pequeno: a soma  $CO + CO_2 + O_2 = 21-22\%$  no gás, comparado com  $21\%$  no ar.

Vazão média do ar medida antes do exaustor .	1.304 Nm <sup>3</sup>
Ar falso (37%) .....	483 Nm <sup>3</sup>
Ar que atravessa a mistura (63%) .....	821 Nm <sup>3</sup>

A porcentagem de ar falso é determinada a partir da análise média dos gases abaixo da grelha e antes do exaustor:

		0 — 12,2 min.		12,2 — 18,7 min.	
CO <sub>2</sub>	$\frac{\text{gr.}}{\text{CO}}$	ex.	$\frac{9,6\%}{6,03\%} = 1,59$	$\frac{6,18\%}{3,94\%} = 1,57$	
CO	$\frac{\text{gr.}}{\text{CO}_2}$	ex.	$\frac{2,5\%}{1,55\%} = 1,61$	$\frac{0,97\%}{0,60\%} = 1,62$	

Admitindo o valor intermediário de 1,59, temos 59 Nm<sup>3</sup> de ar falso por 100 Nm<sup>3</sup> que atravessam a mistura, 37% e 63% respectivamente.

A determinação da quantidade do ar atravessando a mistura conduz a uma observação interessante: a figura 3 mostra que nos primeiros 12 minutos de operação a temperatura dos gases que atravessam a mistura úmida é constante e igual a 55°C. O ar saturado a 55°C contém 148,4 g H<sub>2</sub>O/Nm<sup>3</sup> de ar sêco. O ar que entra na panela (25°C — 70% de umidade) contém 18,2 g H<sub>2</sub>O/Nm<sup>3</sup>; pode pois eliminar da carga 148,4 — 18,2 = 130,2 g. H<sub>2</sub>O/Nm<sup>3</sup>. A quantidade mínima de ar a 55°C que deveria atravessar a mistura para evitar a condensação nas camadas inferiores é  $\frac{113 + 10}{0,1302} = 945 \text{ Nm}^3/\text{t}$ , mistura sêca.

Como passam 821 Nm<sup>3</sup>, ocorre condensação do vapor de água, que se torna nociva quando em excesso. Resulta em desequilíbrio térmico e reduzida permeabilidade das camadas inferiores.

C. *Balanço de mistura sêca* (kg):

1.000 kg da mistura sêca (Quadro I) transformam-se em:

Sinter (sem cascalho) .....	560
Retôrno .....	326
Perdas por arrastamento de finos .....	46
Perda do oxigênio do minério .....	5
Perda do CO <sub>2</sub> do calcário .....	9
Perda de carvão .....	54

A perda por arrastamento de finos  $x$  foi calculada da produção do sinter (6,15 t/panela) e das densidades medidas da mistura e cascalho. O cálculo dá:  $x = 0,046$  t.

D. *Balanço dos materiais*:

Vimos que de 1 t de mistura sêca obtém-se 560 kg de sinter (sem cascalho). Obtém-se ainda 192 kg de cascalho necessário para proteger a grelha. Estes dados completam o balanço de materiais que em forma de um "flow sheet" aparece na figura 4.

## 4. BALANÇO TÉRMICO (aos 18,7 min.; relativo a 25°C e 1.000 kg de mistura sêca)

A. *Calor fornecido*:

1. Combustão do óleo:  $1,13 \times 10.000 = 11.300$  Kcal.

2. Combustão do carbono: A quantidade total de CO<sub>2</sub> e CO encontrada nos gases foi 561 Nm<sup>3</sup> e 128 Nm<sup>3</sup> respectivamente.

Subtraindo CO<sub>2</sub> e CO proveniente do óleo, calcário e matérias voláteis, obtém-se a quantidade de gases resultantes da combustão do carbono. Consideramos que 70% do CO dos voláteis queimam formando CO<sub>2</sub>.

$$\text{CO}_2 \frac{561}{8,17} - (1,83 + 4,30 + 5,32) 0,948 = 57,9 \text{ Nm}^3$$

$$\text{CO} \frac{128}{8,17} - 1,24 \times 0,948 = 14,5 \text{ Nm}^3$$

O calor gerado é igual a

$$57,9 \times \frac{12}{22,4} \times 8.100 + 14,5 \times \frac{12}{22,4} \times 2.460 = 270.100 \text{ Kcal}$$

3. Combustão dos voláteis do carvão: Admitimos que se queima apenas a fração dos voláteis despreendidos acima da temperatura de inflamação. Assim temos:

	<i>T inflamação °C</i>	<i>% queimada</i>
CO .....	644 — 658	70,0
H <sub>2</sub> .....	580 — 590	82,4
CH <sub>4</sub> .....	650 — 750	0

O calor gerado é:

$$62 \times 0,205 (0,119 \times 0,824 \times 28.900 + 0,407 \times \\ \times 0,70 \times 2.420) = 44.850 \text{ Kcal.}$$

4. Formação da escória: Consideramos 125 Kcal/kg de óxidos livres + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub> + CaO + MgO. A escória dos altos fornos não participa.

$$33,9 \times 125 = 4.250 \text{ Kcal.}$$

#### B. *Calor consumido:*

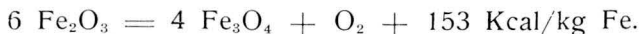
1. Evaporação de água (a 55°) da mistura e cascalho:

$$115 (565,6 + 30) = 68.500 \text{ Kcal.}$$

2. Decomposição do calcário:

$$20 (0,5284 + 0,0080) \times 775 = 8.320 \text{ Kcal.}$$

3. Decomposição e/ou redução de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: desconhecemos se se trata da dissociação térmica ou redução com H<sub>2</sub> ou CO. Eliminando a hipótese da redução com H<sub>2</sub>, do ponto de vista térmico é inútil conhecer o mecanismo. O calor consumido é da dissociação:





O sinter (752 kg) contém 0,15% Fe met. que supomos vem da escória AF e 6,84% FeO, seja 51,5 kg FeO. Da palha de laminação provém  $12 \times 0,745 = 8,9$  kg FeO. O calor consumido é:

$$(51,5 - 8,9) \frac{56}{72} \times 3 \times 153 = 15.200 \text{ Kcal.}$$

4. Calor sensível nos gases: No período 0 — 12,2 min. a temperatura dos gases é constante; a determinação é precisa.

$$550 \times 0,63 \times 12,2 (55 - 25) \frac{0,315}{8,17} = 4.900 \text{ Kcal.}$$

No período 12,2 — 18,7 min. a temperatura dos gases varia rapidamente. Avaliamo-la da figura 5. A temperatura (T) da figura 1 é muito mais baixa devido ao calor perdido pelos gases ao aquecer a grelha da panela.

De 12,2 — 15,0 min. temos:

$$590 \times 0,63 \times \frac{2,8}{8,17} \left( \frac{1000 + 55}{2} - 25 \right) 0,330 = 21.100 \text{ Kcal}$$

De 15,0 — 18,7 min. temos:

$$640 \times 0,63 \times \frac{3,7}{8,17} \left( \frac{1000 + 540}{2} - 25 \right) 0,340 = 46.100 \text{ Kcal}$$

somando para o período 0 — 18,7 min.: 72.100 Kcal.

5. Calor no sinter com retôrno (886 kg) (fig. 5):

$$886 \cdot (451 - 25) \cdot 0,24 = 90.500 \text{ Kcal.}$$

6. Calor no cascalho (192 kg):

$$192 \cdot (1030 - 25) \cdot 0,22 = 42.500 \text{ Kcal.}$$

7. Perdas: A perda de calor por irradiação, determinada a partir da curva  $T_s$  da figura 1 e admitindo emissividade  $\Sigma = 0,9$  eleva-se a 3.020 Kcal. Outras perdas — na mistura quente arrastada, carbono queimado fora da panela, perdas por condução e convecção, e os erros — são iguais, por diferença, a 30.360 Kcal.

O quadro III resume o balanço térmico em forma de tabela.

## QUADRO III

## Balanço térmico

(aos 18,7 min; relativo a 25°C e 1.000 kg de mistura seca)

CALOR FORNECIDO	KCAL	%	CALOR CONSUMIDO	KCAL	%
1. Combustão do óleo:.....	11.300	3,4	1. Evaporação de água:..	68.500	20,7
2. Combustão do carbono:.....	270.100	81,7	2. Decomposição do $\text{CaCO}_3$	8.320	2,5
3. Combustão das mat.voláteis:..	44.850	13,6	3. $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ :.....	15.200	4,6
4. Formação de escória:.....	4.250	1,3	4. Calor nos gases:.....	72.100	21,8
			5. Calor no sinter:.....	90.500	27,4
			6. Calor no cascalho:...	42.500	12,9
			7. Perdas por radiação:..	3.020	0,9
			8. Outras perdas, erros:	30.360	9,2
T o t a l : .....	330.500	100,0	T o t a l : .....	330.500	100,0

Nota-se que o consumo de calorías por 1 t de mistura sêca, do tipo empregado em Monlevade, é de 330.000 Kcal. Por 1 t de sinter contendo cascalho (752 kg) passa a 440.000 Kcal.

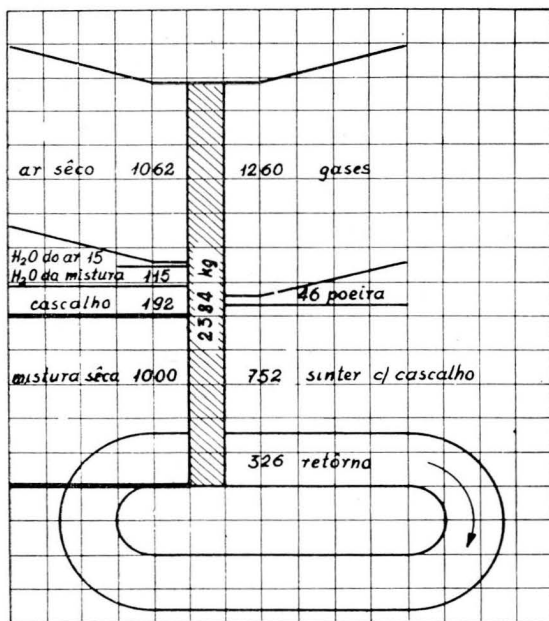


Fig. 4

Fig. 4 — "Flow sheet" de materiais relativo a 1 t de mistura sêca.

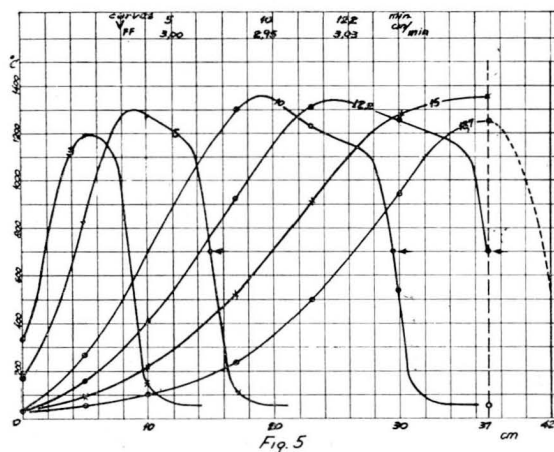


Fig. 5

Fig. 5 — Distribuição da temperatura na mistura aos 3, 5, 10, 12,2, 15 e 18,7 minutos.

## 5. TROCAS TÉRMICAS NA PANELA

Na figura 3 examinamos as curvas de temperatura em função do tempo, em 6 pontos da panela. Considerando arbitrariamente a temperatura de  $700^{\circ}$  como o início da combustão de carvão, determinamos a velocidade do seu avanço:  $V_F = 3,03$  cm/min. (foram necessários 12,2 min. para atravessar 37 cm de mistura). As velocidades locais entre dois pontos considerados são também indicadas. Variam de 2,38 a 3,33 cm/min.

A partir da figura 3 e para um tempo determinado, podemos traçar as curvas de temperatura em função da posição na panela. Obtemos assim a figura 5 com 6 curvas correspondentes a 3, 5, 10, 12,2, 15 e 18,7 minutos. A área abaixo das curvas é proporcional ao calor contido no sínter. Utilizamos a curva dos 18,7 minutos para estabelecer o balanço térmico.

A velocidade de avanço da combustão ( $V_F$ ) aparece praticamente constante, da ordem de 3 cm/min. Mas a quantidade de calor contida no sínter aumenta sensivelmente de 3 a 12,2 minutos. Outros aspectos característicos das curvas são: rápida elevação da temperatura no início de combustão com igual inclinação para todos os pontos; uma inflexão das curvas 5, 10 e 12,2 minutos entre  $1.100^{\circ}\text{C}$  e  $1.200^{\circ}\text{C}$  parecida com a curva de 3 minutos. Procurando esclarecer melhor o assunto, subtraímos das curvas 5, 10 e 12,2 minutos a de 3 minutos (figs. 6 e 7). A área complexa das curvas originais ficou assim decomposta em duas ondas simples.

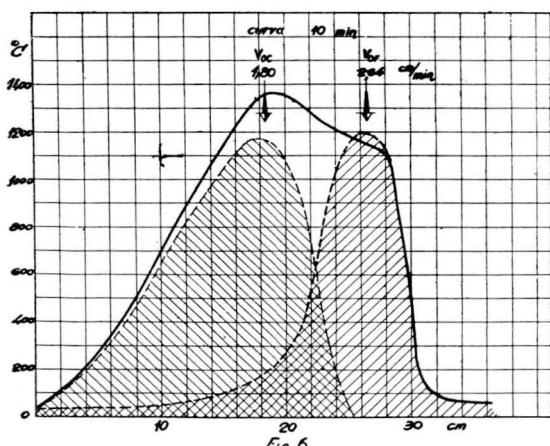


Fig. 6 — Curva de 10 min da figura anterior decomposta em duas ondas: de combustão (OF) e de calor (OC).

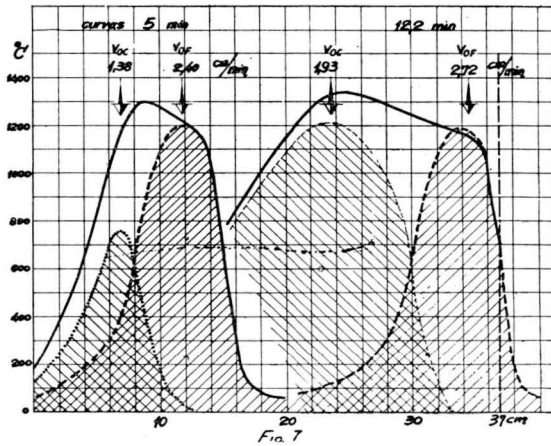


Fig. 7 — Curvas de 5 e 12,2 min decompostas em ondas de combustão e de calor.

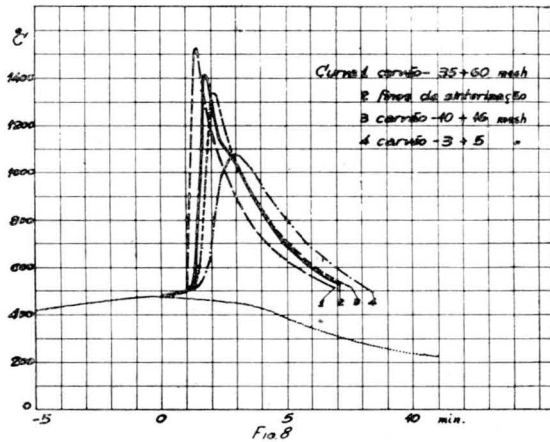


Fig. 8 — Curvas de combustão do carvão vegetal de quatro granulometrias diferentes, obtidas no laboratório.

A área da curva de 3 minutos representa o calor gerado neste período menos o calor extraído pelo ar e gasto para preparação da mistura (secagem, decomposição de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , etc.) e perdas. A esta curva de 3 minutos daremos o nome de “onda de combustão”. A segunda onda, crescente com o tempo, representa o excesso de calor, que ficou no sinter, não retirado pelo ar. Será a “onda de calor”. Nota-se que as duas ondas avançam com velocidades diferentes. A velocidade

da onda da combustão ( $V_{OF}$ ), representada por seu máximo, varia de 2,40 a 2,72 cm/min. e é sensivelmente superior à velocidade da onda do calor ( $V_{OC}$ ) 1,38 — 1,93 cm/min. A relação  $V_{OF}/V_{OC} = 1,41$  a 1,74.

No laboratório tentamos reproduzir e estudamos a onda de combustão. Num tubo de porcelana vertical, 17 m/m de diâmetro, colocamos mistura de 18,8 g de areia com 1,2 g de carvão, formando um leito de 5 cm de altura. Na superfície do leito instalamos um termopar Pt — PtRh nú. Aquecemos a carga sob atmosfera de azoto até 478° e, a partir deste momento, desligado o aquecimento, soprmos ar à razão de 5 N litros/minutos. Assim, aproximamos bem a composição da carga e a vazão do ar na sinterização.

A figura 8 representa resultados das experiências variando a granulometria do carvão. Naturalmente, carvão mais fino queima mais rápido, obtendo-se uma temperatura mais elevada. A velocidade da reação é moderada; varia de 20 a 150 seg. A área das quatro curvas é semelhante, a quantidade de calor em jôgo sendo a mesma. A curva 2, obtida com os finos da sinterização, apresenta uma irregularidade relacionada, provavelmente, com as partículas maiores de carvão presentes na mistura. A curva pontilhada refere-se a um ensaio em branco, sem soprar o ar. Ao contrário do que acontece na panela de sinterização onde a combustão progride em função da secagem e aquecimento da carga, no ensaio de laboratório — depois de poucos segundo — toda a coluna participa da reação.

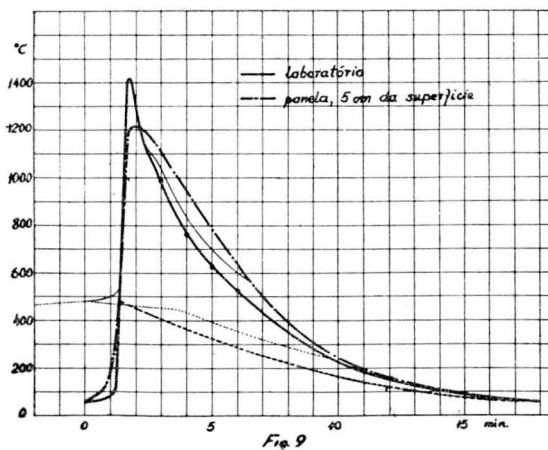


Fig. 9 — Comparação das curvas de laboratório e da panela de sinterização obtidas por combustão do mesmo carvão numa camada de 5 cm de altura.

Na figura 9 comparamos a curva 2 obtida no laboratório com a curva a 5 cm da superfície da figura 3 registrada na panela da sinterização. (A curva do laboratório foi ligeiramente corrigida para eliminar a influência do calor fornecido pelo tubo de porcelana depois de desligado o aquecimento). A semelhança das duas curvas é patente. A menor velocidade de combustão na panela deve ser atribuída à fusão do material aglomerado que envolve as partículas do carvão e à passagem de ar menos uniforme.

Os fenômenos de redução superficial dos cristais de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e sua posterior reoxidação complicam ainda o quadro. Deixamo-los propositalmente fora, tratando aqui somente de aspectos térmicos da sinterização.

Voltando às figuras 5, 6 e 7 podemos agora melhor caracterizar a nossa "onda de combustão". Representa ela o calor gerado pela combustão do carvão na camada 5 cm de espessura. A área da onda de combustão referida a 1 t da mistura seca correspondente a 47.000 Kcal. (A exatidão deste número é confirmada estabelecendo o balanço térmico parcial aos 3 minutos). O calor gerado pela combustão de carvão em 5 cm de mistura  $= \frac{5}{37} \times 314.950 = 42.600$  Kcal.

Notemos ainda que a onda de combustão, para assegurar uma boa aglomeração, deve apresentar um nível de temperatura bastante elevado (1.200-1.400°) e uma largura (tempo em, por exemplo, 1.200°) suficiente para que se completem as reações de sinterização. Por este motivo, escolha de uma onda de referência mais estreita não seria indicada.

## 6. DISCUSSÃO

Demonstramos que dois fenômenos térmicos distintos ocorrem na panela de sinterização: a combustão do carvão e a transferência do calor gerado.

Do ponto de vista da economia de combustível, o processo atingirá seu rendimento máximo quando estes dois fenômenos evoluírem em fase:  $V_{\text{OF}} = V_{\text{OC}}$ . A onda conjunta deve ser uma largura mínima, apenas necessária para promover uma boa aglomeração.

Os dois fenômenos são distintos, não porém independentes; a vazão do ar e utilização do seu oxigênio influencia ambos.

Pensamos nos modos seguintes para promover o avanço em fase das duas ondas:

1. Aumentar a vazão do ar.  $V_{OC}$  aumentará mais que  $V_{OF}$  se a utilização do oxigênio diminuir, o que geralmente acontece.
2. A figura 8 mostra que aumento da granulometria do carvão retarda a sua combustão, mas resulta em mais baixa temperatura que deve ser compensada por um acréscimo do consumo. Prática desaconselhável. Boa granulometria do carvão é — 10 mesh.
3. Diminuir o teor de oxigênio no ar.  $V_{OC} = \text{const.}$ ,  $V_{OF}$  diminui. A recirculação dos gases seria, teoricamente, uma solução elegante, mas complicada na prática.
4. Substituir o carvão vegetal, em parte ou totalmente, por um combustível menos reativo: coque ou carvão mineral. Esta solução é a mais segura. As experiências realizadas em Monlevade substituindo carvão vegetal pelo coque em proporções variáveis de 0 até 100% resultaram não somente em diminuição do consumo de carbono por t de sinter mas também em melhor qualidade do produto.

É uma coincidência que a sinterização com finos de coque e 1 t de ar por 1 t de mistura seca resulta em igualdade das velocidades das ondas de combustão e calor<sup>5</sup>. Grafita teria reatividade insuficiente.

As considerações que acabamos de fazer classificam o carvão vegetal como um combustível imperfeito do ponto de vista térmico. Em compensação possui êle certas características favoráveis ao processo:

- 1.º — Sendo mais reativo, na queima do carvão vegetal resulta um gás com maior porcentagem de CO, o que facilita a redução superficial de  $Fe_2O_3$ , desejada para obter-se uma boa resistência do sinter.
- 2.º — Tendo pequena densidade, aumenta a porosidade da mistura.
- 3.º — Na maioria das usinas brasileiras é o combustível mais barato.

## 7. CONCLUSÕES

O equilíbrio entre a velocidade da onda de combustão e a velocidade da onda de calor aparece como o fator primordial na economia de sinterização.



A vazão adequada do ar, obtida por boa permeabilidade de carga e sucção suficiente, é o meio mais importante para aproximar-se do equilíbrio. Em condições normais de sinterização, o carvão vegetal, por excesso de reatividade, conduz ao desequilíbrio das velocidades das ondas de combustão e de calor, compensado por aumento do seu consumo. O coque surge como combustível mais adequado para sinterização.

\*

### AGRADECIMENTOS

O autor agradece à direção da Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira, pela permissão de publicar este trabalho. É grato aos engenheiros e técnicos da Sinterização e Secção de Pesquisas que realizaram as medições; ao Químico Celso Costa, pela colaboração na redação do trabalho.

### BIBLIOGRAFIA

1. PINTO DE SOUZA, F. J. — “Instalação de sinterização montada na usina de Monlevade”. ABM-Boletim, vol. 5, pág. 552, 1949.
2. ZWETKOFF, PETER — “Doze anos de sinterização em Monlevade”. ABM-Boletim, vol. 18, pág. 81, 1962.
3. WSCIEKLICA, JANUSZ — “Microestruturas observadas em sinters de Monlevade”. ABM-Boletim, vol. 9, pág. 332, 1953.
4. J. MICHARD — “2.<sup>o</sup> Symposium International sur l'Agglomération”, vol. II, pág. 34, 1957.
5. E. VOICE et R. WILD — “2.<sup>o</sup> Symposium International sur l'Agglomération”, vol. II, pág. 11, 1957.
6. H. WENDEBORN — “Journal of the Iron and Steel Inst.”, vol. 175, pág. 280, 1953.



### DISCUSSÃO

**Renato F. Azevedo** (1) — Desejo felicitar o Eng. Janusz Wscieklica pelo interessantíssimo trabalho que acaba de apresentar, e que representa uma investigação científica de alto valor dos fenômenos térmicos que ocorrem na operação de sinterização. Conhecemos todos a grande importância da sinterização ou, de maneira mais geral, da aglomeração dos finos de minério que ocorrem em nossas jazidas. Tenho certeza de que estudos como o que o Eng. Janusz Wscieklica apresentou farão com que a nossa técnica se desenvolva rapidamente no sentido de um aproveitamento mais econômico dos nossos minérios na operação de aglomeração.

(1) Membro da ABM e Presidente da Comissão Técnica; da, Diretoria da Companhia Siderúrgica Nacional; Rio de Janeiro, GB.

Ao abrir os debates, desejaria indagar ao Autor quanto à possibilidade (não admitida no seu trabalho) e sôbre a conveniência de se usar carvão de vapor em sinterização. Como sabemos, há grande disponibilidade desse material resultante da exploração do carvão metalúrgico brasileiro. O carvão-lavador brasileiro fornece de 40% a 45% de carvão-vapor, ou seja, dá lugar à produção de uma tonelagem igual de carvão-vapor, o qual praticamente não encontra mercado. Perguntaria ao Eng. Janusz se êle chegou a investigar um pouco mais profundamente êsse problema.

**J. Wscieklica** <sup>(2)</sup> — Existem alguns estudos na literatura estrangeira que permitem supor que essa operação é possível. Minha opinião pessoal é favorável à utilização dos finos de carvão nacional. A Usina de Monlevade montou uma panela experimental de sinterização e a sua Secção de Pesquisas patrocina êste ano um ciclo de experiências para determinar a viabilidade da utilização de vários tipos de carvão mineral nacional. Os dois pontos fracos do nosso carvão residem no alto teor de enxôfre e cinzas, porém para a sinterização enxôfre e cinzas têm influência menos nociva do que para outros processos. As cinzas incorporam-se à escória, que, devido à pureza extraordinária dos nossos minérios, deve de qualquer forma ser adicionada à carga. De outro lado, na operação de sinterização o enxôfre contido no carvão fica eliminado, o que, aliás, é uma prática conhecida em outros países.

**R. Azevedo** — Agradeço o esclarecimento do Eng. Janusz Wscieklica, que é perfeitamente lógico. Parece-nos realmente de grande interesse econômico para todos nós aqui encontrarmos um uso para os carvões de vapor resultantes da produção de carvão metalúrgico. Assim, poderemos reduzir o custo do carvão metalúrgico, que hoje carrega todo o pêso do custo de beneficiamento e, desta maneira, fazer grande economia em todo o processo siderúrgico, uma vez que os custos do carvão e do coque têm na nossa economia siderúrgica um pêso muito grande.

Na nossa experiência em Volta Redonda, o coque representa 70% do preço do gusa e 40% do preço do lingote. Portanto, o que pudermos fazer no sentido de reduzir o preço do carvão terá influência muito grande no custo final do produto siderúrgico, com os benefícios óbvios decorrentes dessa operação.

Conseqüentemente, creio que os institutos de pesquisa e as companhias como a do Autor do trabalho devem estar pensando como eu e como minha própria empresa, a qual, sendo hoje um dos maiores consumidores de carvão nacional, tem necessidade de se aproveitar desses estudos.

**L. C. Corrêa da Silva** <sup>(3)</sup> — Em primeiro lugar, queria cumprimentar o Eng. Janusz Wscieklica pela extraordinária contribuição em que, de longe, a sua capacidade de interpretação e inteligência supera os dados coligidos, numa obra em que há mais contribuição de inteligência do que trabalho experimental de coletânea de dados, e que, certamente, vai ter repercussão mundial nos fenômenos da sinterização.

Queria perguntar ao Autor se êle determinou a análise das curvas de temperatura e se fez análise em duas ondas, a onda de calor e a onda de combustão, indagando ainda se no caso se trata de sinteres obtidos com moinha de coque ou de carvão mineral.

(2) Membro da ABM e Autor do Trabalho; Engenheiro do Departamento de Pesquisas da CSBM; Monlevade, MG.

(3) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista e Professor de Siderurgia na Escola Politécnica da USP; Chefe da Secção de Aços do IPT; São Paulo, SP.

**J. Wscieklica** — Ainda não fizemos êsse trabalho para o carvão mineral. As curvas apresentadas aqui referem-se a um período experimental de duas semanas, levado a efeito na nossa instalação industrial de sinterização. Como as experiências foram feitas durante a produção normal, tratamos de prejudicar o menos possível o ritmo normal de operação e limitamo-nos aos fenômenos verificados com a moinha de carvão vegetal. Entretanto, comparando-se a operação da sinterização com carvão vegetal e as experiências de há dois anos com moinha de coque, pode-se afirmar que o avanço das ondas de combustão e calor é mais concordante no segundo caso, sem mesmo traçar as curvas de temperatura. Frequentemente, quando se vira uma panela cuja mistura não tinha uma homogeneidade completa, ou uma sucção bem distribuída, aparecem grandes blocos incandescentes. Isto se deve à pequena velocidade local da passagem do ar resultando numa defasagem importante das duas ondas. Quando utilizamos moinha de coque obtivemos, com as mesmas proporções de carbono por tonelada de sinter, temperaturas sensivelmente superiores, indicando que a largura da onda foi diminuída, desde que todos os outros parâmetros da operação foram constantes.

Uma outra experiência interessante que fizemos foi com a carga de sinterização pré-pelotizada (pelotas de alguns milímetros de diâmetro) para aproveitar um minério de ferro dificilmente sinterizável. E chegamos ao outro extremo: acesa a carga, depois de cinco minutos a sinterização apagou a panela, devido ao excesso de ar soprado através dos interstícios.

**C. Dias Brosch** (4) — Gostaria de fazer uma pergunta ao Eng. Janusz Wscieklica, relativamente à permeabilidade. Desejo saber se durante o trabalho experimental foi medida essa característica nas misturas úmidas e secas.

**J. Wscieklica** — Não foi medida separadamente a permeabilidade, já que ela é diretamente indicada pela depressão inicial da panela. Na figura 1 aparece uma depressão inicial da ordem de 1,30 m, que no caso da sinterização de Monlevade é um valor baixo, correspondente a uma alta permeabilidade da carga e operação satisfatória. Aliás, por coincidência, no período experimental foi obtido um bom sinter e uma produção elevada. Isso indica boas condições de trabalho da sinterização daquela Usina.

**C. Dias Brosch** — Indago do Autor se não foi conhecido êsse valor de permeabilidade; somente para efeitos comparativos de testes de laboratórios que realizámos. Desejaria também conhecer a velocidade da vazão por unidade de área, porque não tive tempo de fazer o cálculo que o Sr. dá em detalhes. Parece que aqui o Sr. fez o cálculo pela área da panela. Por acaso aproxima-se de 1,5 m<sup>3</sup>/s?

**J. Wscieklica** — A área da panela é de 13,9 m<sup>2</sup>. A vazão do ar que atravessa a mistura 0,63 — 550 Nm<sup>3</sup>/min. Temos assim:

$$\frac{0,63 - 550}{13,9 - 60} = 0,42 \text{ Nm}^3/\text{seg.}, \text{ m}^2$$

**F. Pinto de Souza** (5) — O trabalho do Eng. Janusz aborda o assunto sob o ponto de vista termodinâmico. São interessantes as conclusões a

(4) Membro da ABM e Engenheiro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo, SP.

(5) Membro da ABM e Professor Catedrático de Siderurgia na Escola de Engenharia da UMG; Belo Horizonte, MG.

que chegou considerando que sob aquele aspecto o emprêgo do carvão vegetal apresenta-se inferior ao coque.

Outro aspecto, e este, no meu modo de ver, ainda muito mais desfavorável às características do sinter obtido com carvão vegetal em comparação com o obtido com moinha de coque, refere-se à baixa densidade do primeiro. Esta baixa densidade obriga, para o mesmo débito de carbono, utilização de muito maior percentagem volumétrica de carvão vegetal que de coque. A queima do combustível deixa vazios, que até certo ponto favorecem as características do produto, imprimindo-lhe maior porosidade, mas além de certo limite, e é o caso do carvão vegetal, torna o sinter friável. Em Monlevade, certa ocasião, procuramos, em caráter experimental, produzir um sinter de alta resistência, sem preocupar-nos com redutibilidade do produto. Tal foi possível aumentando sensivelmente a adição de moinha de coque, provocando assim uma alta escorificação. Quando experimentamos proceder do mesmo modo com moinha de carvão vegetal, o sinter obtido apresentou-se quebradiço e reduzia-se, na maior parte, em pequenos blocos, embora estes apresentassem alta resistência.

Considero o aspecto acima, do emprêgo do carvão vegetal em comparação com o emprêgo do coque, mais inconveniente que o termodinâmico, alertado pelo brilhante trabalho do Eng. Janusz.

Entretanto, o que leva as usinas mineiras a empregarem moinha de carvão vegetal na fabricação de sinter — e note-se que talvez seja o único lugar no mundo onde esta prática tem caráter industrial, — é o fator econômico. Dispõem aquelas usinas de moinha de carvão vegetal em excesso e não contam com moinha de coque.

A Belgo-Mineira estuda a briquetagem desta moinha de carvão vegetal para utilização nos seus altos fornos. É possível que um dia, quando este problema fôr resolvido, convenha briquetar toda a moinha de carvão vegetal e adquirir de terceiros moinha de coque para usar em sua sinterização. Até lá, mesmo reconhecendo as vantagens da moinha de coque, não cremos que, economicamente, a solução se justifique.

A questão apresentada pelo Eng. Renato Azevedo, relativa ao emprêgo de carvão vapor, é deveras interessante e reputo digna de estudo. Mas, pode ocorrer com as usinas a coque o mesmo que atualmente ocorre com as que utilizam carvão vegetal. Se utilizassem carvão vapor, o que fariam com os fins de coque disponíveis?

Gostaríamos de ser informados pelo Eng. Renato Azevedo, qual a situação atual das disponibilidades de moinha de coque de Volta Redonda, depois que tem em marcha sua usina de sinterização? Ainda há excesso de moinha de coque, há equilíbrio, ou já ocorre falta? Se houvesse excesso, haveria outro emprêgo ou mercado externo?

**R. Azevedo** — No momento, não há nenhum excesso de moinha de coque em Volta Redonda. Toda a que tínhamos está sendo usada na sinterização; até pelo contrário, há certa deficiência. Tínhamos uma caldeira que usava moinha de coque. Tivemos então de fazer uma transformação, com resultado muito feliz, passando a usar carvão-vapor, para que essa moinha de coque fôsse para a sinterização. Como o Prof. Pinto de Souza esclareceu muito bem, a Belgo-Mineira, pelo menos atualmente, não tem mais interesse nesse assunto. Mas para usinas que usam coque, como CSN, COSIPA e USIMINAS, acredito que o problema permaneça realmente palpitante. Outra destinação dependeria do mercado externo. Não me ocorre momentaneamente um uso para toda essa moinha dentro da Usina. Voltaríamos à situação anterior à sinterização, isto é, oferta de moinha de coque ao mercado nacional, o qual, aliás, já estava praticamente bem desenvolvido.