

BALANÇO TÉRMICO NUMA OPERAÇÃO DE SINTERIZAÇÃO ⁽¹⁾

CARLOS DIAS BROSCH ⁽²⁾

RESUMO

O balanço térmico de uma operação de sinterização permite situar a economia energética operacional e dar a direção a ser tomada para o aprimoramento da técnica do processo.

1. EXPERIÊNCIAS FEITAS

Não é fácil a tarefa de determinar com exatidão o balanço térmico de uma operação de sinterização. Entretanto, um cálculo aproximado já dá indicações interessantes sobre a economia térmica do processo.

Em experiências com 50 kg de mistura, contendo 5% de coque e 8% de umidade, foram queimados em um único ciclo operatório cerca de 2,5 kg de coque (com 75,2% de carbono e, no total da mistura, 2,12 kg de carbono) que produziram cerca de 17.000 kcal por combustão completa ($C + O_2 = CO_2$).

Foram vaporizados 4 litros da água da mistura, que foram incorporados aos gases de combustão, absorvendo cerca de 2.500 kcal.

Cerca de 7 quilos de calcário da mistura, a qual continha 14% deste componente, foram decompostos a temperatura inferior a 900°C (devido a menor pressão absoluta ambiente) e absorveram cerca de 3.000 kcal.

Calor sensível dos gases de combustão — Pelas curvas operacionais de vazão, pode-se determinar qual o calor sensível dos gases de combustão, evoluídos durante a sinterização e conforme exemplo de valores tabelados a seguir:

(1) Contribuição Técnica n.º 466. Apresentada ao XVII Congresso Anual da ABM; Rio de Janeiro, julho de 1962.

(2) Membro da ABM; Engenheiro de Minas e Metalurgista; da Seção de Aços do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo, SP.

Tempo (min.)	Intervalo de tempo t (min.)	Ganho de temperatura Δt (°C)	Vazão "V" (m ³ /min.)	Produto $\Delta t \times t \times V$
2	2	2	12,0	48
4	2	6	12,0	144
10	6	10	11,7	702
14	4	14	11,6	649
20	6	39	11,9	2.784,6
22	2	63	11,7	1.474,2
24	2	101	11,2	2.262,4
25	1	104	11,2	1.164,8
Total			93,3	9.229,0

Sendo o calor específico médio dos gases queimados: 0,33 kcal/m³, entre 0°C a 300°C, tem-se $Q = 0,33 \times 9.229 = 3.000$ kcal.

Calor retido no sinter, após o final da combustão — As curvas completas de vazão \times temperatura do ar (que incluem o resfriamento do sinter após o fim do ciclo de combustão)³ mostram que cêrca de 3/5 do calor total levado pelos gases quentes são consumidos para resfriar o sinter. O calor retido pela massa ainda quente do sinter (cêrca de 1/3 de massa total) ao final da combustão, pode pois ser avaliada em 4.500 kcal.

Admitindo o calor perdido para resfriar o sinter como índice de ineficiência do processo metalúrgico (num processo de máxima eficiência, o material entraria e sairia frio) tem-se como medida do rendimento térmico do processo:

$$E = \frac{17.000 - 4.500}{17.000} = 73\%.$$

A operação de sinterização apresenta, pois, uma eficiência relativamente alta, quanto ao aproveitamento do calor do combustível. É notório que as perdas de calor por irradiação são relativamente baixas, dado que as trocas térmicas são efetuadas por meio de convecção gasosa, no seio do material.

2. AR DE COMBUSTÃO

Nas instalações industriais, usa-se como excesso do ar de combustão, de 2 a 4 vezes a quantidade necessária à queima completa do carbono contido na mistura. Assim é que, para uma produção média horária de sinter de 1 t num processo contínuo de esteira, são consumidos $1,0 \text{ m}^3$ de ar por segundo ou 3.600 m^3 por hora. Para consumir 5% do combustível do sinter, seriam necessários apenas 500 m^3 ; há pois um excesso de cinco vezes o volume de ar necessário.

Nos ensaios realizados, constatou-se um consumo de cerca de 90 m^3 normais de ar para 2,5 kg de coque, com um excesso de ar de três e meia vezes o volume teórico para se obter uma combustão completa.

De acordo com a fluido-dinâmica da operação de sinterização, um regime de fluxo gasoso de alta velocidade garante uma rápida propagação da onda térmica no interior do material, embora com sacrifício do rendimento de transmissão do calor para o interior dos grãos. Ou, em outras palavras, com fluxo gasoso de alta intensidade (alta depressão originando alta vazão) ter-se-á uma alta velocidade de sinterização (até 3 ou mais centímetros por minuto na componente vertical) resultando alta produtividade (até $2 \text{ t/m}^2/\text{h}$) porém com sacrifício do rendimento térmico operacional, fazendo diminuir a intensidade de sinterização e, em decorrência, deteriorando a qualidade mecânica do sinter.

É presumível que o uso de sobrepessão do ar de injeção (mediante a adoção de uma cúpula injetora superior à panela ou grelha móvel) permitiria aumentar a velocidade de sinterização (e a produtividade portanto), diminuindo a proporção do excesso de ar de combustão, com vantagem para a eficiência térmica do processo e também para a qualidade do sinter.

Se situarmos o processo de sinterização quanto ao regime de combustão em comparação ao ALTO FORNO ou com o CUBILÔ, ver-se-á que o forno de sinter se situa no extremo quanto ao consumo de ar. Enquanto o ALTO FORNO consome cerca de $4 \text{ m}^3/\text{kg}$ de coque e o CUBILÔ cerca de $11 \text{ m}^3/\text{kg}$ de coque, o forno de Sinterização consumirá de 20 a 40 m^3 normais de ar por quilo de combustível carbonoso contido na mistura, o que corresponde a uma massa de ar igual a duas vezes a massa de sinter. É, pois, provável que o regime de sobrepessão, aplicado com vantagem nos dois outros fornos, tenha utilidade processual no forno de Sinterização.

3. BALANÇO ENERGÉTICO

Pode se estimar da seguinte forma o Balanço Energético da operação:

<i>Crédito de energia</i>	Quilo calorias	Porcentagem (%)
Reações exotérmicas:		
Combustão do coque	15.000	88
Outras reações ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \xrightarrow{\text{O}} \text{Fe}_2\text{O}_3$ e queima do C contido nos finos)	2.000	12
Total	17.000	100

<i>Débito de energia</i>	Quilo calorias	Porcentagem (%)
Reações endotérmicas:		
Decomposição e aquecimento da água e vapor d'água a 1300°C	2.500	15
Decomposição e aquecimento calcário a 1300°C	3.000	18
Calor absorvido pela massa do sinter (descontada a água e o calcário)	8.000	47
Dos gases efluentes	3.000	17
Total	16.500	97

CONTA DE LUCROS E PERDAS

<i>Deficit</i>	Quilo calorias	Porcentagem (%)
Perda por irradiação	500	3
Perda no calor sensível dos gases chaminé	3.000	17
Total	3.500	20

Rendimento metalúrgico: 80%.

Ativo energético: 340 kcal/kg sinter (combustível queimado).

Passivo energético: 20 kcal/kg sinter (energia de sucção do ar).

BIBLIOGRAFIA

1. SOUZA SANTOS, T. D. e BROSCH, C. D. — “Ustulação de concentrados de scheelita com enxofre, empregando serragem como combustível”. ABM-Boletim, n.º 20, Julho de 1950.
2. SOUZA SANTOS, T. D. — “Influência de alguns fatores sobre a sinterização de minérios de ferro”. ABM-Boletim, n.º 14, Janeiro de 1949.
3. SOUZA SANTOS, T. D. e VERA JUAN FIGUEROA — “Influência de alguns fatores sobre a intensidade de sinterização de finos de hematita”. ABM-Boletim, novembro de 1961.
4. SOVIET DELEGATION TO THE COMMITTEE OF THE UNITED NATIONS — “Self-fluxing agglomeration in the URSS”. Journal of Metals, July, 1946.
5. SOUZA, JOSÉ PINTO DE — “Tratamento prévio de minério de ferro destinado a altos fornos”. Tese de Concurso, 1954.
6. “Agglomeration”, International Simposium de Philadelphia; John Wiley & Sons Inc.; New York 16, N. Y., 1962.



DISCUSSÃO

R. F. Azevedo ⁽¹⁾ — Muito grato ao Eng. Carlos Dias Brosch, pelo trabalho que acaba de apresentar e que tem particular interesse por tratar de tema análogo ao abordado antes pelo Eng. Janusz Wscieklica. Foi feita como que uma comparação, com pequena dispersão da aproximação dada ao problema. De um lado, um estudo mais de laboratório, de outro, um estudo mais industrial com confirmação dos dados de laboratório. Aplicam-se aqui as observações que fizemos sobre o valor econômico das pesquisas para o desenvolvimento e aproveitamento dos finos de minérios.

J. Wscieklica ⁽²⁾ — Primeiramente desejo cumprimentar o Eng. Carlos Dias Brosch por uma apresentação de balanço térmico em hora tão oportuna, quando os nossos dois trabalhos saem juntos, um confirmando o outro. As comparações são interessantes.

Tenho duas observações a fazer. Uma delas é a seguinte: a única diferença entre os nossos balanços é que no crédito de energia do seu balanço aparece oxidação de magnetita. Parece então que o Sr. utilizou um minério pouco oxidado. No nosso caso saímos de uma hematita, e pelo contrário, acabamos com sinter com grau de oxidação de 96%, resultando em perda de calor.

C. Dias Brosch ⁽³⁾ — Desejo explicar que partindo inicialmente de hematita, embora contendo magnetita, essa reação seria compensada pela reação em sentido contrário, pelo débito de energia, pois o sinter

(1) Membro da ABM; Engenheiro de Minas e Metalurgia e Presidente da Comissão Técnica; da Diretoria da CSN; Rio de Janeiro, GB.

(2) Membro da ABM e Engenheiro da CSBM; Monlevade, MG.

(3) Membro da ABM e Autor do Trabalho; Engenheiro do IPT; São Paulo, SP.

inicial tinha da ordem de 3% de FeO, passando no final a cerca de 6% de FeO. De forma que, realmente, pode parecer que essa reação não fosse a principal, uma vez que a mesma reação em sentido contrário apareceria ocasionando perda de energia. A reação indicada não é a única. A principal é a queima do carbono, não contido na moinha de coque, mas contido nos finos de alto forno, utilizados.

J. Wscieklica — De outro lado, quero discordar um pouco da sua afirmação: “*de acordo com a fluido dinâmica da operação de sinterização, um regime de fluxo gasoso de alta velocidade garante uma rápida propagação da onda térmica no interior do material, embora com sacrifício do rendimento de transmissão do calor para o interior dos grãos*”. Isso é verdade para um determinado combustível. Mas, como nos empenhámos em mostrar, varia de combustível para outro. De modo que essa consideração da própria reatividade ou combustividade do carvão a coque empregado também influi sensivelmente na cinética da sinterização.

C. Dias Brosch — Não há dúvida. Mas não deixa de ser um fator desfavorável, porque aumentando a velocidade diminui-se a eficiência da troca térmica entre os gases quentes e o material a ser aquecido. Isso é uma dedução. Se o Sr. me der licença, eu poderia dar outra explicação. Esse fluxo térmico depende da vazão, porém mais ainda da velocidade da percolação dos gases. Aumentando a vazão, mantida a pressão, aumenta-se a velocidade e a eficiência diminui. Isso não invalida a observação que o Sr. fez, da dependência da qualidade do combustível e dos materiais. Aliás, creio que previa a sua interpretação, tanto que tinha até rascunhado uma dedução matemática das fórmulas que vou passar à lousa. Chega-se a expressão:

$$Q = V \Delta p C_p \Delta t / u^2,$$

onde Q é o calor trocado, V a vazão dos gases e u a velocidade.

J. Wscieklica — A sua dedução está inteiramente certa, mas parece mais aplicável aquilo que chamei de “*onda de combustão*” na minha exposição. Porque, quando a quantidade de ar é insuficiente para extrair o oxigênio existente nas camadas superiores do sinter, esse calor torna-se inútil. Poderia lembrar aqui os dados obtidos por Foyce e Vine, apresentados no II Simpósio Internacional de Aglomeração, que estudaram a sinterização de areia. Aliás, não é propriamente sinterização. No laboratório, num pequeno vaso tubular, sinterizavam misturas de areia com coque, carvão vegetal, diferentes tipos de coque e de grafita, e obtinham para a mesma vazão de ar os seguintes resultados: carvão vegetal, coque e grafita, demonstrando claramente que a reatividade do combustível era extremamente importante e que influi muito no tempo de avanço da fonte de sinterização.

C. Dias Brosch — Acho que estamos falando de duas coisas diferentes. Na onda térmica, o que se tem é uma impulsão de calor, resultante da reação exotérmica, que dá uma diferença de temperatura e que vai alterar a própria cinética da reação.

Roberto Jafet (4) — Últimamente tem havido certa confusão quanto ao que se entende por reatividade. Desejaria ouvir a opinião dos dois

(4) Membro da ABM e Engenheiro Metalurgista; Diretor da “Minerasil”; São Paulo, SP.

ilustres conferencistas sôbre o que precisamente entendem por reatividade. Definições de autores eu as conheço. Quero conhecer as dos colegas Dias Brosch e Janusz Wscieklica.

C. Dias Brosch — Reatividade ou combustividade pode ser definida como sendo a maior ou menor reação de formação de CO ou CO₂, respectivamente, formada na queima do combustível, componente da mistura. Quer dizer, nos gases de combustão, a uma mesma pressão e temperatura, aquêle combustível que produzir maior formação de CO ou CO₂ terá maior reatividade ou combustividade respectivamente. Relaciono a reatividade com o tipo de gás formado. Se predominar o monóxido de carbono, será menos combustivo e mais reativo, e se predominar o bióxido de carbono será mais combustivo e menos reativo.

Roberto Jafet — Agradeço a sua explicação, apesar de não estar de acôrdo com ela. Queria ouvir agora o Eng. Janusz.

Janusz Wscieklica — Combustividade seria correspondente à reação de $C + O_2 \rightarrow CO_2$. E reatividade seria $CO_2 + C \rightarrow 2 CO$. Porque o que acontece na sinterização são os dois, mas o que controla a sinterização e em princípio controla a redução superficial, é o segundo processo. É a capacidade do CO₂ reagir com o carbono, para formar o 2 CO, monóxido de carbono.

R. Jafet — Então o Sr. dá a mesma definição que usamos no alto forno. Neste caso, apesar de irmos de um polo a outro na discussão do assunto, o Sr. consideraria, para um alto forno — e sei que o Sr. conhece bem o assunto — como melhor combustível, como melhor agente redutor um combustível de alta reatividade ou um de baixa reatividade?

J. Wscieklica — Depende do forno. Aliás, êsse problema foi tratado pelo Prof. Michard, no último curso que êle deu na ABM. Êle demonstrou claramente que há uma “zona de reserva” no forno; depende da existência ou não dessa zona para que o carvão e o coque devam ser mais ou menos reativos. Não se pode dizer que para cada alto forno o coque deve ser o mais reativo possível. Existem casos nos quais com vontade reduziremos a reatividade do carvão. Entretanto, geralmente, quando existe a “zona de reserva” no alto forno, a reatividade do carvão é importante, porque ela determina a temperatura da reação $CO_2 + C \rightarrow 2 CO$. Quanto mais baixa essa temperatura, mais eficiente a operação no alto forno; em têrmos do Prof. Michard, mais alto se coloca o limite da “zona de reserva”. Mas isso num forno trabalhando em condições normais. Quando o forno está um pouco “doente”, quando não tem zona de reserva, é melhor que tenha reatividade menor. Em geral é assim. Mas deveríamos estudar o diagrama do forno e tirar as conclusões para cada casos. (5)

R. Jafet — Se a reatividade é a capacidade de absorção de oxigênio para transformar com CO₂ em CO, e o Sr. está interessado, no alto forno de maior proporção de redução indireta, em diminuir a redução direta, o Sr. não acha que seria lógico que o combustível de baixa reatividade fôsse mais econômico no alto forno? Refiro-me a um forno em marcha normal. Porque êsse ponto tem sido de grande controvérsia,

(5) Ver o Curso de Especialização da ABM sôbre “Redução direta dos minérios de ferro”, do Prof. Jean Michard, do IRSID; Belo Horizonte, Março-Abril de 1962.

permito-me fazer essas perguntas, embora fora do tema apresentado aqui.

J. Wscieklica — Insisto em que cada caso deve ser estudado em particular e que existem casos em que a diminuição da reatividade é altamente favorável. Tudo depende da “*temperatura crítica da zona de reserva*”, usando a terminologia do Prof. Michard, já que nos referimos ao seu curso.

R. Jafet — O que é “*zona de reserva*”?

J. Wscieklica — Para explicar isso eu precisaria fazer um resumo do curso que tivemos durante três meses com o Prof. Michard. Em todo o caso, vou procurar fazer um desenho explicativo aqui na lousa. Foi verificado, pelas medidas tomadas, que numa curva de alto forno, normalmente trabalhando a coque, a distribuição de temperatura era a seguinte: uma zona de constante temperatura, em que não há trocas térmicas ou químicas. A essa zona o Prof. Michard chamou de “*zona de reserva*”. Não há trocas nessa zona do alto forno, que, portanto, é dispensável. Dependendo da existência ou não dessa zona, a reatividade do carvão influirá ou não no processo do alto forno. Onde essa zona exista, deve-se procurar eliminá-la, por inútil.

R. Jafet — E o Sr. concorda com êsse conceito? Teria coragem de fazer um forno sem essa zona?

J. Wscieklica — Sim. Os altos fornos de Monlevade são assim.

R. Jafet — Mas os alto fornos de Monlevade usam carvão vegetal, altamente reativo. E no caso de coque?

J. Wscieklica — A mesma coisa. Mas cada forno tem uma curva diferente. O alto forno tem distribuição de gases absolutamente harmônica, em que não há essa zona inútil. Quando essas duas zonas estão uma dentro da outra, é um forno “*doente*”, inútil. Só serve para trituração do material.

R. Jafet — E o Sr. não acredita em armazenamento de calor, que seria a função dessa zona? Não é ela uma acumuladora de calor? Se o Sr. não tiver essa zona, não acha que a dependência do cadinho será muito crítica?

J. Wscieklica — Mas êsse conceito de “*reserva de temperatura*” já foi superado.

R. Jafet — Então o Sr. teria coragem de usar só oxigênio, em vez de nitrogênio? Porque uma das funções dessa zona é a do armazenamento de calor. Neste caso o Sr. utilizaria oxigênio puro no alto forno?

J. Wscieklica — Utilizaria tanto oxigênio quanto necessário para eliminar essa zona, 1% ou 2%. Está ultrapassado o conceito de “*reserva de calor*”, tanto na curva como no cadinho pelos sistemas antigos, de escória elevada, quando se dizia nos livros antigos que o mínimo era 500 kg. Monlevade trabalha com 110 kg. Uma vez que o forno tenha carga pré-estabelecida e que a distribuição seja conveniente, essa reserva é perda, é inútil.

R. Jafet — E a temperatura no tópo?

J. Wscieklica — O Sr. perde calor nessa zona.

R. Jafet — Quanto ao conceito, estamos em divergência. Acho que armazena e não que perde calor. Porque o Sr., não tendo essa zona, não tem êsse calor. E a temperatura no tôpo do forno, seria a mesma ou maior?

J. Wscieklica — A mesma. Aqui não há modificação de temperatura. Se o Sr. eliminar essa parte de fora, a operação continuará igual.

R. Jafet — Concordo em que há uma modificação de temperatura. Mas o Sr. tem uma massa muito grande de material; êsse material todo está a alta temperatura. Então o Sr. tem uma energia, uma massa de caour, um volante térmico. E no outro caso o Sr. não a teria.

J. Wscieklica — Mas ela é inútil. Qual a função dêsse volante térmico?

R. Jafet — Sempre entendemos que a função dêsse volante seria a de socorrer o forno em casos de falta de calor em zonas inferiores. O Sr. não concorda com isso? Pois também não concordo com muito do que o Sr. disse.

J. Wscieklica — Aliás, essa opinião é a do Prof. Michard, com a qual tanto eu como os outros siderurgistas que participaram do curso concordam.

R. Jafet — E que altura teria um alto forno sem essa zona?

Janusz Wscieklica — De 5 a 6 m.

R. Jafet — Pois gostaria de ver o Prof. Francisco Pinto de Souza colocar um alto forno com 5 ou 6 m em Monlevade!

F. Pinto de Souza — 5 ou 6 m é a altura da zona. A altura do forno é evidente que vai variar.

J. Wscieklica — A altura do forno ideal é aquela que apenas elimina essa zona, ou que a torna a menor possível, 2 m, digamos.

R. Jafet — E o Sr. aceitou êsse conceito?

J. Wscieklica — Aceitei, e por isso o estou defendendo.

R. Azevedo — O Eng. Roberto Jafet suscitou uma discussão muito interessante. Infelizmente, temos que nos ater ao nosso programa. Temos ainda pela frente mais dois trabalhos a serem relatados; precisamos acelerar um pouco o ritmo de nossos debates.

L. C. Corrêa da Silva ⁽⁶⁾ — Embora compreendendo que estamos saindo um pouco do tema dos nossos trabalhos, não queria deixar de assinalar a minha absoluta discordância do ponto de vista do Eng. Janusz Wscieklica e do Prof. Michard: pelo simples fato de a temperatura ser constante, fazemos o raciocínio de que essa zona poderia ser cortada do alto forno. Não se pode separar uma parte do alto forno. Ele é um reator em regime estacionário onde está sempre acontecendo algo.

(6) Membro da ABM; Professor da Escola Politécnica da USP; Chefe da Seção de Aços do IPT; São Paulo, SP.

Por que o Eng. Janusz não considerou as análises de $\text{CO} - \text{CO}_2$, a redução de minérios na parte superior e inferior da zona do meio? São fatores que nos interessam muito mais no alto forno.

J. Wscieklica — Todas as curvas expostas no trabalho do Prof. Michard (temperatura, redução da carga, relação $\text{CO} - \text{CO}_2$), ficam constantes nessa zona. Todos os parâmetros do forno, na zona de reserva, ficaram constantes segundo determinações práticas.

L. C. Corrêa da Silva — Não assisti o curso do Prof. Michard e por isso não conhecia a existência desses dados peculiares. Penso que isso deve ser um caso muito particular e não geral dos altos fornos.

R. Azevedo — Meus senhores, queria dar uma palavra de conciliação entre as duas teorias. O Eng. Janusz apresentou um conceito que nos foi trazido pelo Prof. Michard, no sentido de que a zona de reserva é um volante de calor. Um forno que trabalhasse em condições ideais não precisaria desse volante. Mas isso nem sempre acontece. As máquinas têm paradas e saídas, variação de velocidade e por isso precisam do volante. O alto forno nem sempre trabalha em condições ideais, de modo que é bom existir esse reservatório de calor. Apoiando, de certa forma, a idéia do Eng. Janusz, quando trabalhássemos com oxigênio puro não haveria necessidade daquela zona. Sabemos, por estudos teóricos já feitos, que quando o oxigênio do ar atinge teor elevado, o alto forno deixa de ser alto forno para ser baixo forno. Não sei se este esclarecimento poderá harmonizar os pontos de vista.

R. Jafet — Está provado que, com o uso de oxigênio puro, o consumo de coque é muito mais elevado. A temperatura no tópo é elevadíssima e se perde grande porcentagem na redução direta para a indireta. Este ponto, porém, nos levaria a uma discussão muito longa. Agradeço ao Eng. Janusz a gentileza da explicação, mas devo dizer que não concordo com o seu ponto de vista.

R. Azevedo — Creio que aí está uma bela tese para um próximo trabalho que o Eng. Janusz, ou qualquer dos presentes, poderá trazer num futuro Congresso. O assunto é palpitante e propiciará debates dos mais interessantes.