

INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO NA VELOCIDADE DE REDUÇÃO DA HEMATITA DA MINA DE ANDRADE ⁽¹⁾

JOAQUIN BURREL JUVILLAR ⁽²⁾

RESUMO

O autor apresenta as curvas de redutibilidade do minério de ferro da Serra de Andrade, utilizado pela Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira na Usina de Monlevade. As determinações foram feitas a 800°C, com hidrogênio como redutor. O minério foi preparado em forma de cubos de 10, 15, 20, 25 e 30 mm de aresta. O autor assinala a grande influência do tamanho de grão na velocidade de redução da hematita ensaiada e a repercussão deste fato na marcha dos altos fornos.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo expôr os resultados obtidos ao estudar a influência do tamanho de grão na redutibilidade do minério de ferro utilizado pela Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira nos altos fornos de Monlevade. Este minério é extraído da Serra de Andrade; consiste de hematita muito pura, de aspecto laminar. Estuda-se a influência do tamanho de grão sobre a velocidade da redução do minério de ferro, mantendo constantes as demais condições de trabalho (temperatura, velocidade dos gases, etc.).

2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MINÉRIO ESTUDADO

Foi determinada de acôrdo com a Norma DIN 4190, obtendo-se os seguintes resultados:

Tamanho médio estatístico = 62 mm

Índice de uniformidade de tamanhos $n = 2,375$

(1) Contribuição Técnica n.º 465. Apresentada ao XVII Congresso Anual da ABM; Rio de Janeiro, julho de 1962.

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

O valor $n = 2,375$ indica que os grãos da hematita não são de tamanho muito uniforme, o que se pode observar por simples inspeção visual. O minério carregado nos altos fornos de Monlevade é normalmente peneirado entre 25 e 75 mm.

3. ANÁLISE QUÍMICA

A análise química da hematita foi realizada conforme os métodos clássicos. Os resultados obtidos foram os seguintes, em %:

| | |
|-------------------------------|-------|
| Fe_2O_3 | 94,91 |
| FeO | 0,54 |
| SiO_2 | 1,66 |
| Al_2O_3 | 1,13 |
| MnO | 0,15 |
| P_2O_5 | 0,11 |

O resultado anterior pode também ser expresso do seguinte modo, em %:

| | |
|---------------------|-------|
| Ferro férrico | 66,44 |
| Ferro ferroso | 0,43 |
| Ferro total | 66,87 |

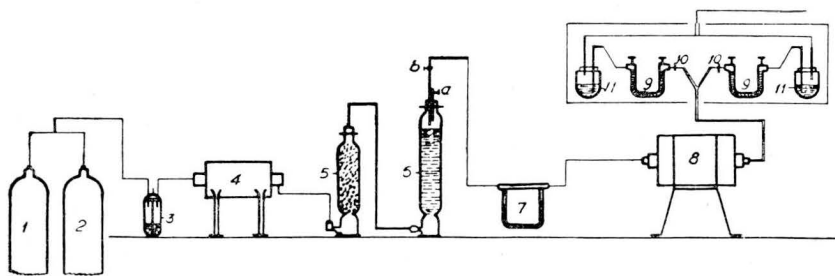


Fig. 1 — Esquema da instalação usada nos ensaios de redutibilidade.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizadas experiências para determinar as curvas: % redução = f (tempo), para cubos de 10 a 30 mm de aresta.

O aparelho utilizado é dado na figura 1. Os gases (hidrogênio para a redução e nitrogênio para purga) atravessam um frasco de segurança e depois um forno de depuração (carre-

gado com limalhas finas de cobre) a 600°C aproximadamente. A saída do forno se colocam, em série, duas tôres de absorção de água formada; a primeira é carregada com cloreto de cálcio anidro e a segunda é carregada com pentóxido de fósforo. O gás sêco (hidrogênio ou nitrogênio) é medido pela perda de pressão do mesmo ao atravessar um diafragma. O gás sêco entra em seguida no reator de redução, constituído de um tubo de quartzo, também aquecido elêtricamente e provido de um termopar e cromel-alumel. A regulação da temperatura é automática.

O vapor de água formado na redução é absorvido num dos tubos em U, instalados em paralelo e carregados com cloreto de cal anidro e pentóxido de fósforo. O hidrogênio em excesso, já sêco, atravessa um frasco de fechamento contendo ácido sulfúrico concentrado e sai à atmosfera. O forno de redução é colocado em posição horizontal. Em seu interior coloca-se a hematita apoiada na parede. A extremidade quente do forno é refrigerada com água.

*

O método operatório é o seguinte:

Prepara-se um cubo de hematita do tamanho desejado e aquece-se-o durante 12 horas a 650°C em uma mufla aberta. Em seguida é resfriado em dessecador, pesado e colocado no forno de redução.

Aquece-se o forno de depuração a 600°C aproximadamente e o de redução a 800°C exatamente. Purgam-se e aquecem-se durante 2 horas os fornos, passando uma corrente de nitrogênio através de todo o aparelho, sem colocar, todavia, os tubos de absorção. O nitrogênio utilizado contém 0,5% de oxigênio antes de entrar no forno de depuração, do qual sai puro, porque o oxigênio é retido no forno em forma de CuO.

Transcorridas as 2 horas, já os fornos estão em equilíbrio térmico com o meio ambiente e pode começar-se a redução. Para isto colocam-se os tubos de absorção, pesados previamente, que alternativamente absorverão a água produzida na redução.

Depois corta-se a passagem de nitrogênio e abre-se a de hidrogênio; toma-se êste momento como tempo zero do ensaio, pondo em marcha um cronômetro. Os primeiros litros de hidrogênio não produzem redução, apenas eliminam o nitrogênio do circuito. Depois começa a redução da hematita.

Em intervalos de tempo determinados retira-se o tubo em U (o que está em serviço) e pesa-se. Imediatamente, antes de retirar o tubo em U em serviço, liga o tubo em U que está isolado.

Especialmente interessante no ensaio de redutibilidade é a velocidade do gás; deve ser elevada, para evitar condensação de vapor de água no tubo de saída e para renovar continuamente as películas de gás em contacto com o minério. No aparelho utilizado o diâmetro interno do forno de redução é 50 mm e a vazão de hidrogênio 15 l/min com o que a velocidade de hidrogênio dentro do tubo é de 76,5 dm/min \cong 1,275 dm/seg. É considerada velocidade suficiente³.

Deve-se ter preparado tubos de absorção de reserva para substituir rapidamente os que estão sendo utilizados, quando estes se esgotam ou se inutilizam. A absorção de água pela capa testemunha de P_2O_5 indica que o Cl_2Ca deve ser renovado.

*

E continuação se resumem às condições em que se realizou o ensaio de redução.

Material a reduzir: Cubos de hematita da Serra de Andrade.

Análise química da amostra: A indicada no parágrafo 3.

Temperatura de redução: 800°C.

Velocidade do hidrogênio: 1,275 dm/seg.

A porcentagem de redução obtém-se mediante a fórmula:

$$\% \text{ redução} = 100 \frac{a}{0,320 \cdot b}$$

na qual:

a = g de água formada;

b = g de hematita utilizadas no ensaio.

O fator 0,320 resulta da expressão:

$$0,9491 \cdot \left(\frac{3 \text{ H}_2\text{O}}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \right) + 0,0054 \left(\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{FeO}} \right)$$

Esse fator indica a água formada ao reduzir totalmente 1 g de hematita ensaiada (94,91% de Fe_2O_3 e 0,54% de FeO), segundo foi dito no parágrafo 3. Os resultados experimentais médios constam da Tabela I seguinte:

TABELA I

Resultados experimentais médios da redutibilidade do minério de Andrade

| Tempo de redução (min) | % redução | | | | |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Cubos de 30 mm | Cubos de 25 mm | Cubos de 20 mm | Cubos de 15 mm | Cubos de 10 mm |
| 10 | 13 | 16 | 19 | 26 | 35 |
| 20 | 25 | 29 | 36 | 46 | 61 |
| 30 | 36 | 42 | 50 | 62 | 80 |
| 39 | - | - | - | - | 90 |
| 40 | 46 | 53 | 62 | 74 | |
| 50 | 55 | 65 | 72 | 84 | |
| 58 | - | - | - | 90 | |
| 60 | 62 | 71 | 80 | | |
| 70 | 69 | 77 | 86 | | |
| 77 | - | - | 90 | | |
| 80 | 75 | 82 | | | |
| 90 | 80 | 87 | | | |
| 96 | - | 90 | | | |
| 100 | 84 | | | | |
| 110 | 88 | | | | |
| 116 | 90 | | | | |

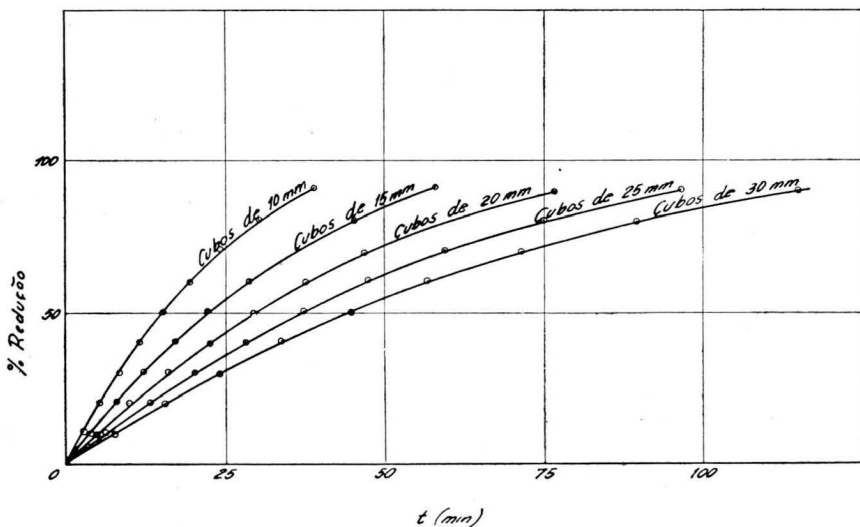


Fig. 2 — Expressão gráfica dos resultados da Tabela 1, da redutibilidade do minério de Andrade.

A tabela anterior é representada na figura 2. Tanto na tabela como no gráfico foi eliminado o tempo consumido na purga do nitrogênio mediante hidrogênio.

5. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Recentemente, McKewan¹ demonstrou, utilizando pelotas de minério de ferro de composição e dimensões conhecidas, que a velocidade de redução dos óxidos de ferro é proporcional à superfície de contacto entre o metal *Fe* formado na redução e o óxido de ferro ainda não reduzido. Matematicamente isto se expressa assim:

$$\frac{dW}{dt} = K A, \quad (1)$$

na qual:

W = peso do minério de ferro já reduzido, em g.

A = superfície óxido-metal em cm^2 .

t = tempo em min.

A constante de proporcionalidade K depende da temperatura, pressão e composição do gás. As suas dimensões são:

$$\frac{M}{L^2 \cdot T} = \frac{g}{\text{cm}^2 \cdot \text{min.}}$$

Para ver se as idéias de McKewan são aplicáveis aos ensaios descritos com o minério de Andrade, é necessário ter em conta o seguinte:

- a) Como tôdas as experiências de redutibilidade foram feitas à mesma temperatura (800°C), pressão (\cong atmosférica) e composição (100% H_2) do gás, o valor de K deve ser o mesmo em tôdas as experiências, qualquer que seja a granulometria.

- b) As amostras ensaiadas de minério têm forma cúbica. Portanto, se a redução é topoquímica e:

L = aresta do cubo ensaiado, em cm.

l = aresta do cubo sem reduzir, no tempo t , em cm.

ρ = densidade inicial do cubo em g/cm³, resulta:

$$W = \rho (L^3 - l^3) \text{ g}$$

$A = 6 \times l^2 \text{ cm}^2$; portanto

$$\frac{dW}{dt} = - 3 \rho l^2 \cdot \frac{dl}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dW}{dt} = K A = 6 K l^2 \quad (3)$$

Igualando os segundos membros de (2) e (3):

$$- \rho \frac{dl}{dt} = 2 K$$

isto é:

$$\rho (L - l) = 2 K t \quad (4)$$

Denominando R = tanto por um de redução, temos por definição:

$$R = 1 - \frac{l^3}{L^3}$$

isto é:

$$l = L (1 - R)^{1/3}$$

e substituindo na equação (4):

$$\left[1 - (1 - R)^{1/3} \right] = \frac{2 K}{\rho L} t = 0,384 \frac{K}{L} t \quad (5)$$

já que a hematita de Andrade é de $\rho = 5,2 \text{ g/cm}^3$.

Da equação (5) se deduz que a representação de

$$\left[1 - (1 - R)^{1/3} \right] = f(t) \quad (6)$$

deve ser uma linha reta que passe pela origem das coordenadas e tenha um coeficiente angular igual a $0,384 \frac{K}{L}$. Como L (aresta do cubo) é conhecida, K pode ser calculado a partir dessa reta. A representação da equação (6) a partir das curvas de redutibilidade (figura 2) é dada na figura 3, baseada na Tabela II seguinte:

TABELA II

Dados para a determinação da constante de velocidade de redução, servindo de base para o traçado das curvas da figura 3

| R | 1-R | $[1-(1-R)^{1/3}]$ | t (min) | | | | |
|------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | cubos 30 mm | cubos 25 mm | cubos 20 mm | cubos 15 mm | cubos 10 mm |
| 0,10 | 0,90 | 0,035 | 8 | 6 | 5 | 4 | 3 |
| 0,20 | 0,80 | 0,072 | 16 | 13 | 10 | 8 | 5 |
| 0,30 | 0,70 | 0,112 | 24 | 20 | 16 | 12 | 8 |
| 0,40 | 0,60 | 0,156 | 34 | 28 | 22 | 17 | 11 |
| 0,50 | 0,50 | 0,206 | 44 | 37 | 30 | 22 | 15 |
| 0,60 | 0,40 | 0,264 | 57 | 48 | 38 | 29 | 19 |
| 0,70 | 0,30 | 0,331 | 71 | 60 | 48 | 36 | 24 |
| 0,80 | 0,20 | 0,416 | 90 | 75 | 60 | 45 | 30 |
| 0,90 | 0,10 | 0,536 | 116 | 96 | 77 | 57 | 39 |

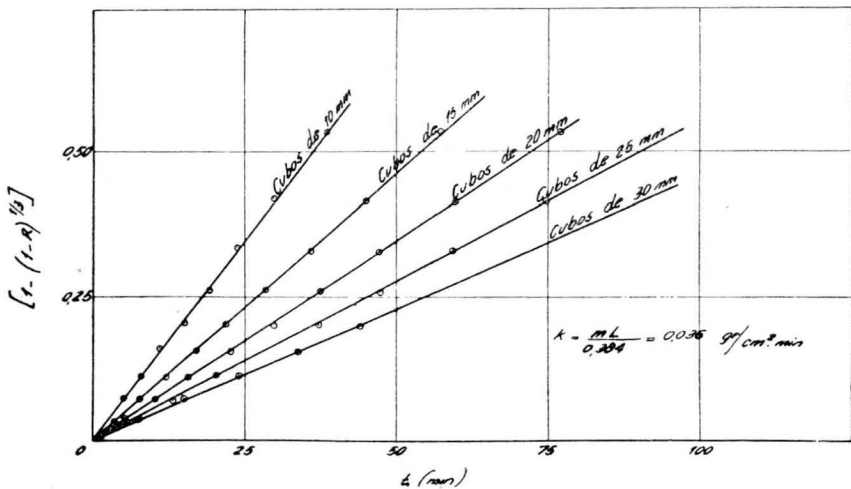


Fig. 3 — Determinação da constante de velocidade de redução.

Pode-se ver que as linhas obtidas na figura 3 são retas com os coeficientes angulares da Tabela III seguinte:

TABELA III

| Aresta do cubo (L cm) | Pendente da reta (m) |
|--------------------------|-------------------------|
| 3,0 | 0,0046 |
| 2,5 | 0,0055 |
| 2,0 | 0,0069 |
| 1,5 | 0,0092 |
| 1,0 | 0,0138 |

O valor de

$$K \cong \frac{m L}{0,384}$$

e, portanto, 0,036 g/cm²/min nas condições do ensaio (800°C e 1,275 dm/seg de hidrogênio puro).

6. SIGNIFICAÇÃO DOS RESULTADOS ANTERIORES

As considerações anteriores supõe que a redução da hematita realiza-se topoquimicamente, isto é, que o núcleo de hematita que ainda não foi reduzido, conserva a forma cúbica original. Verificou-se, porém, que os cubos ensaiados apresentavam trincas ao terminar a redução, de forma que a superfície externa não era mais a superfície de um cubo. O fato de ser reta a função:

$$[1 - (1 - R)^{1/3}] = f(t)$$

indica que tudo acontece como se a redução fôsse topoquímica apesar das trincas formadas.

Nos ensaios realizados observou-se que os cubos de hematita crepitam ao ser aquecidos, tanto mais facilmente quanto

maior fôr a sua aresta. Por exemplo, um cubo de 30 mm durante o seu aquecimento em atmosfera de nitrogênio, para levá-lo à sua temperatura de redução (800°C), fragmentou-se em pedaços de aproximadamente 5 mm de tamanho médio. Este fenômeno de crepitação acontece também, sem dúvida, no alto forno e tornará irregular a sua marcha, porquanto a fragmentação do minério não se realiza de uma forma controlada. Se a crepitação é muito freqüente em cubos de 30 mm de aresta, sê-lo-á mais nos pedaços de 62 mm de tamanho médio (parágrafo n.º 2) que se carregam no alto forno.

A crepitação é, pois, um motivo a favor da diminuição do tamanho médio do minério carregado nos altos fornos.

Outro motivo é que, dêste modo, fica muito aumentada a velocidade de redução (parágrafo n.º 4). Por exemplo, com cubos de 20 mm de aresta a redutibilidade é quase duas vezes maior que com cubos de 30 mm de aresta. Philbrook² escreveu, em 1954, que o tamanho ótimo do minério carregado nos altos fornos encontra-se entre 1/2" e 2" (12,7 mm e 50,8 mm). Os resultados anteriormente expostos confirmam essa opinião. Com esta prática deve-se esperar:

- a) Marcha mais regular dos fornos, devido a uma diminuição dos fenômenos de crepitação;
- b) Aumento do ritmo de produção dos fornos, devido à maior velocidade de redução da carga, ou — se a produção se mantém constante — uma diminuição do consumo de carvão devido a um aumento de redução na cuba.

Os efeitos anteriores serão tanto mais acentuados quanto maior fôr a proporção de minério na carga. Em geral, a determinação da redutibilidade dos minérios de ferro é interessante tanto ao vendedor, que pode assim conhecer melhor o valor de sua mercadoria, como ao consumidor, que tem dêste modo uma orientação boa para melhor utilizar o minério que compra.

7. EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE REDUTIBILIDADE

No alto forno n.º 3 de Oberhausen (Alemanha), um têrço do minério carregado é procedente de Kiruna (Suécia). No ano de 1959, durante dois meses, foram mantidas praticamente as mesmas condições de marcha, exceto que durante 4 semanas o

minério de Kiruna foi calibrado entre 20 e 60 mm e durante as 4 semanas restantes foi calibrado entre 6 e 20 mm. A consequência desta única variação foi que a redução indireta subiu de 42% a 62% e o consumo de coque baixou de 876 kg/t gusa a 760 kg/t gusa.³

Na Tabela IV se transcrevem as condições de trabalho mais importantes durante o mencionado período.

TABELA IV

Dados experimentais obtidos no alto forno de Oberhausen (Alemanha), variando-se a granulometria do minério de Kiruna (Suécia), mantidas constantes as demais condições de trabalho

| Granulometria do minério de Kiruna em mm | 20 a 60 | 6 a 20 |
|------------------------------------------|---------------|---------------|
| Data de ensaio | 3 a 27-4-1959 | 3 a 30-5-1959 |
| Produção de gusa (t/24 h) | 696 | 693 |
| Consumo de coque (kg/ton gusa) | 876 | 760 |
| Ferro de minério de Kiruna % | 36,9 | 33,7 |
| Wabana (sem calibrar) % | 3,4 | 3,7 |
| Sínter % | 19,2 | 20,5 |
| Minério alemão (100 mm) % | 13,6 | 11,6 |
| " venezuelano (6 a 60 mm) % | 4,1 | 10,6 |
| Adições metálicas % | 11,1 | 7,6 |
| Escórias % | 6,3 | 5,7 |
| Adições especiais % | 5,4 | 7,2 |
| Temperatura do vento (°C) | 703 | 649 |
| Temperatura do gás % | 229 | 185 |
| Composição do gás %: | | |
| CO ₂ | 7,5 | 10,7 |
| CO | 33,3 | 30,0 |
| H ₂ | 1,6 | 1,8 |
| Produção de escórias (kg/ton gusa) | 689 | 608 |

As restantes condições de trabalho foram as mesmas durante as 8 semanas de experiências.

Os resultados anteriores não precisam de explicação. Pode-se ver que apesar de que o minério de Kiruna, cuja granulometria se modificou, fornece somente 1/3 aproximadamente do ferro carregado no alto forno, a redução do consumo de coque foi mais de 13%.

8. CONCLUSÕES

- a) Ao diminuir o tamanho dos grãos de hematita de Andrade, mantendo constante as outras condições de trabalho, aumenta a sua velocidade de redução de acordo com a equação:

$$[1 - (1 - R)^{1/3}] = \frac{K_1}{L} t$$

sendo:

R = tanto por um de redução

t = tempo

L = dimensão linear característica

K_1 = constante

- b) Pode-se aumentar a redutibilidade e diminuir a crepitação carregando nos altos fornos hematita de Andrade de 1" de tamanho médio (o tamanho médio atual é 2,4").

*

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Diretoria da C. S. B. M. a permissão para publicar este trabalho, que foi realizado no Departamento de Pesquisas da Usina de Monlevade.

BIBLIOGRAFIA

1. McKEWAN, W. M. — "Kinetics of Iron Oxide Reduction". Trans. of the A. I. M. E., Febr. 1960, 1/6.
2. PHILBROOK, W. O. — "Analysis of Factors that Limit the Production Rate and Coke Rate in the Iron Blast Furnace". Journal of Metals, Dec., 1954, 1396/1406.
3. H. BIRNHAUM, L. VON BOGDANDY & W. JANKE — "Prüfung von Stückerzen auf ihr Verhalten im Hochofen". Stahl u. Eisen 80 (1960), Nr. 12, 9 Juni, 781/788.

DISCUSSÃO

Renato F. Azevedo (1) — Desejo cumprimentar o Eng. Joaquim Burrel Juvillar pelo interessante trabalho que apresentou a respeito da redução de hematita da mina de Andrade, que, acredito, tenha características bastante semelhantes às de outros minérios que ocorrem na região de Minas Gerais.

Em apoio ao seu trabalho, quero dizer que há cêrca de 20 anos, quando fazia parte do escritório da C.S.N. nos Estados Unidos, pedi ao Prof. Joseph, conhecido de todos nós, que fizesse um estudo a respeito. Consegui uma boa amostra, bastante compacta, e êle fêz um estudo com redução de atmosfera de hidrogênio. Partindo da porosidade muito baixa que têm os nossos minérios na temperatura ambiente, êle provou que, durante o aquecimento, êsse minério se esboroava e, portanto, facilitava muito a redução, uma vez que apresentava, desta maneira, uma superfície de ataque muito maior do que a que era de se esperar com a porosidade inicial. Nesse estudo, êle sugeriu que não carregássemos os altos fornos com minério acima de duas polegadas. Isso já há muito tempo, é verdade, mas de certa forma concorda com o que o Eng. Burrel acaba de dizer. E de fato, em Volta Redonda, nas operações de alto forno, seja pelas ventaneiras ou mesmo pela parada do alto forno — quando retiramos a carga e penetramos no interior — não temos notado pedaços de hematita pouco reduzida ou sem redução, o que confirma que o minério carregado dentro dessa bitola é perfeitamente digerível no alto forno nestas condições.

R. Jafet (2) — Queria perguntar ao Eng. Burrel se o tamanho de uma polegada — que preconiza como o melhor para o alto forno — foi relacionado com a pressão e permeabilidade da carga, ou resultado de ensaios de laboratório. Faça esta pergunta porquanto naturalmente as perdas de minério, para se conseguir uma granulometria homogênea em finos, seriam muito grandes. Desta forma o Sr. optaria por uma granulometria de uma polegada? O Sr. fala em minério sinterizado ou não? É sinter ou minério da mina, como está?

J. Burrel Juvillar (3) — O estudo foi sômente baseado nos ensaios e curvas obtidas em laboratório. Operámos com minério sem sinterizar.

R. Jafet — Então, neste caso, o Sr. precisaria de uma instalação de sinter ao lado.

J. Burrel Juvillar — Sim. É o caso da Usina de Monlevade.

R. Jafet — Verificamos que últimamente no Japão usam uma granulometria muito menor, que vai até 15 milímetros, e os resultados são muito bons. O que limita o tamanho é a permeabilidade da carga, porquanto é pacífico que quanto menor fôr o tamanho do grão de minério, maior será a superfície de contacto e melhor a redução. No

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

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

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

entanto, no alto forno há fatores que limitam esse tamanho. Então sugiro que seria mais interessante, no seu trabalho, dizer que devido às perdas de finos que resultariam de uma britagem de tamanho pequeno, seria necessário ter uma instalação de sinter ao lado.

J. Burrel Juvillar — Já disse, no início do trabalho, que a uniformidade do minério utilizado é relativamente pequena e as conclusões do trabalho mostram que, ao diminuir o tamanho dos grãos de hematita de Andrade, mantendo constantes as outras condições de operação do forno, aumenta a sua velocidade de redução, de acordo com a equação dada. Doutro lado, pode-se aumentar a redutibilidade e diminuir a crepitação, carregando nos altos fornos hematita de Andrade de 1" de tamanho médio. Lembro que o tamanho médio atual é de 2,4".