

# AValiação DA SENSIBILIDADE DOS ÍNDICES OPERACIONAIS DA SINTERIZAÇÃO AO AFINAMENTO DE MINÉRIOS DE DIFERENTES MINERALOGIAS<sup>1</sup>

Arthur Napoleão de Souza Neto<sup>2</sup>  
Dauter Luis do Amaral Oliveira<sup>3</sup>  
Maria Beatriz Harmendani Vieira<sup>4</sup>  
Hamilton Porto Pimenta<sup>5</sup>

## Resumo

Tem sido relatada com frequência a tendência de afinamento dos minérios explorados no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais devido ao avanço da exploração de minas com predomínio de itabiritos. Naturalmente, isto tem promovido uma lenta e contínua revisão nas práticas operacionais das empresas clientes visando minimizar os impactos no desempenho dos processos siderúrgicos. No caso dos minérios para sinterização, é de conhecimento amplo que quanto mais fina a mistura de minérios alimentada na máquina, menor tende a ser a produtividade da planta de sinterização. Todavia, tem sido pouco discutido em que grau os índices operacionais da sinterização seriam afetados pelo afinamento de minérios de diferentes mineralogias. Como contribuição para esta discussão, o presente trabalho mostra o estudo realizado na Vale em instalação piloto de sinterização, no qual foram compostas duas misturas de minérios com características mineralógicas bem distintas, especialmente no que se refere à sua constituição mineral e tamanho de cristal. Por peneiramento, foram compostas seis amostras de cada tipo de mistura com diferentes distribuições granulométricas e avaliado seu desempenho em sinterização. Foi verificado que os indicadores operacionais foram mais fortemente afetados pelo afinamento de misturas com o predomínio de minérios mais densos e de maior tamanho médio de cristal. E que a diferença de desempenho entre os tipos de misturas foi tanto maior quanto maior o afinamento dos minérios.

**Palavras-chave:** Minério de ferro; Sinterização; Características mineralógicas.

## EVALUATION OF THE SINTERING OPERATIONAL INDICES' SENSIBILITY ON THINNING ORES FROM DIFFERENT MINERALOGIES

### Abstract

Most iron ore mines located in the Minas Gerais Province are increasing the production of finer sinter feeds because they have to mine more and more itabirites, due to the depletion of rich ores. It is well known that the finer the sinter feed, the worse is the sintering plant performance. However it is important to evaluate how this performance is affected when a plant is fed with fine sinter feeds with different mineralogies. Aiming to contribute to this understanding, a sintering study was carried out at Vale Research Center in which two samples of sinter feeds with very distinct mineralogies, one named S - mean crystal size of 25  $\mu\text{m}$  and 20% porosity, and other named M - mean crystal size of 70  $\mu\text{m}$  and 7% porosity, were sieved and then recomposed to produce six subsamples of S and M with the mean size of their distributions decreasing from 3,11 mm to 1,67 mm. These subsamples were sintered in pilot plant. It was verified that the productivity and fuel consumption were more affected by the variation of the size distribution of M than of S iron ore. In absolute terms, the performance of S was similar to M in the range of coarser size distributions and better in the range of finer distribution.

**Key words:** Iron ores; Sintering; Mineralogy.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Metallurgical Engineer, Fundamentum P&D, ABM Member, Belo Horizonte, MG, Brazil.

<sup>3</sup> Metallurgical Engineer, Dr., Vale, Technical Assistance, Singapore.

<sup>4</sup> Geologist, Vale, Ferrous Technology Center, ABM Member, Nova Lima, MG, Brazil

<sup>5</sup> Metallurgical Engineer, M.Sc., Vale, Ferrous Technology Center, ABM Member, Nova Lima, MG, Brazil.

# 1 INTRODUÇÃO

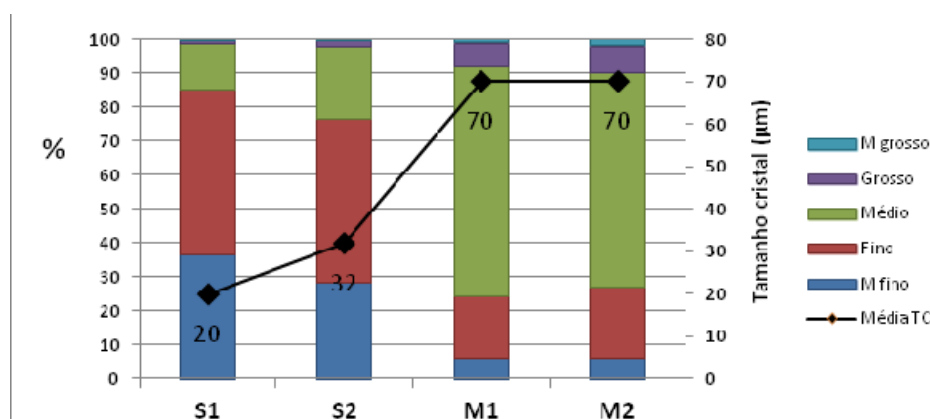
A indústria de minério de ferro do Brasil há alguns anos tem chamado atenção para a tendência de afinamento dos minérios explorados no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, devido ao avanço da exploração de minas com predomínio de itabiritos.<sup>(1)</sup> No caso dos minérios para sinterização, é de conhecimento amplo que quanto mais fina a mistura de minérios alimentada na máquina, menor tende a ser a produtividade do processo de sinterização. Naturalmente, isto tem levado as empresas siderúrgicas a uma lenta e contínua revisão de suas práticas operacionais visando minimizar os impactos deste afinamento no desempenho de seus processos. Todavia, sendo o Quadrilátero Ferrífero a província com maior diversidade mineralógica de minérios em nível mundial, torna-se fundamental avaliar em que grau os índices operacionais da sinterização são afetados pelo afinamento de minérios com diferentes características mineralógicas.

Como contribuição para esta avaliação, foi feito estudo no Centro de Tecnologia de Ferrosos – CTF, da Vale, no qual dois tipos de minérios de características mineralógicas bem distintas – um com tamanho médio de cristal entre 20 e 32 $\mu\text{m}$ , e outro de 70 $\mu\text{m}$ , - foram peneirados e cada um recomposto em seis subamostras com três níveis de partículas nucleantes, de 75%, 55% e 35%, e em cada nível variou-se de  $\pm 20\%$  os percentuais de partículas intermediárias e aderentes. A fim de avaliar o “efeito líquido” da mineralogia nos resultados, as subamostras de cada tipo foram preparadas nas mesmas bases granulométricas. Cada subamostra foi sinterizada em instalação piloto, nas mesmas condições, e então avaliada a sensibilidade dos índices de produtividade e consumo específico de combustível ao afinamento destes minérios. Os resultados desta avaliação são apresentados neste trabalho.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

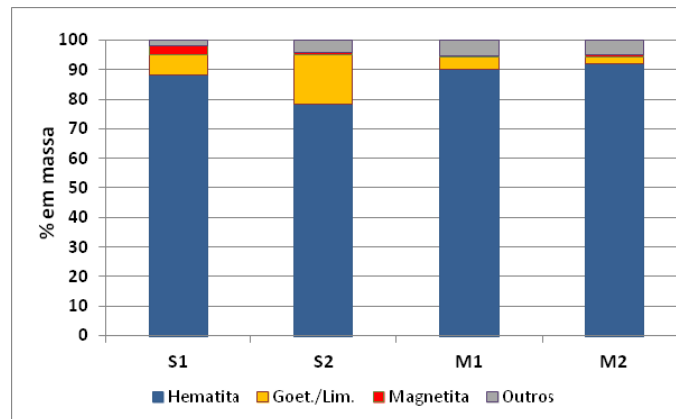
### 2.1. Composição Química e Mineralógica dos Minérios de Ferro

Inicialmente foram preparadas duas amostras de minérios de 1.300 kg cada, identificadas por S e M, com teores de sílica próximos, mas com características mineralógicas bem distintas. Para preparar a amostra S foram usados dois *sinter feeds* com tamanho médio de cristal na faixa de 20 a 32 $\mu\text{m}$  e para amostra M dois outros *sinter feeds*, com tamanho médio de cristal na faixa de 70 $\mu\text{m}$  (Figura 1).



**Figura 1:** Características dos tamanhos de cristal dos minérios utilizados para compor os tipos M e S. Tamanho médio de cristal: 28 $\mu\text{m}$  para amostra S e 70 $\mu\text{m}$  para amostra M.

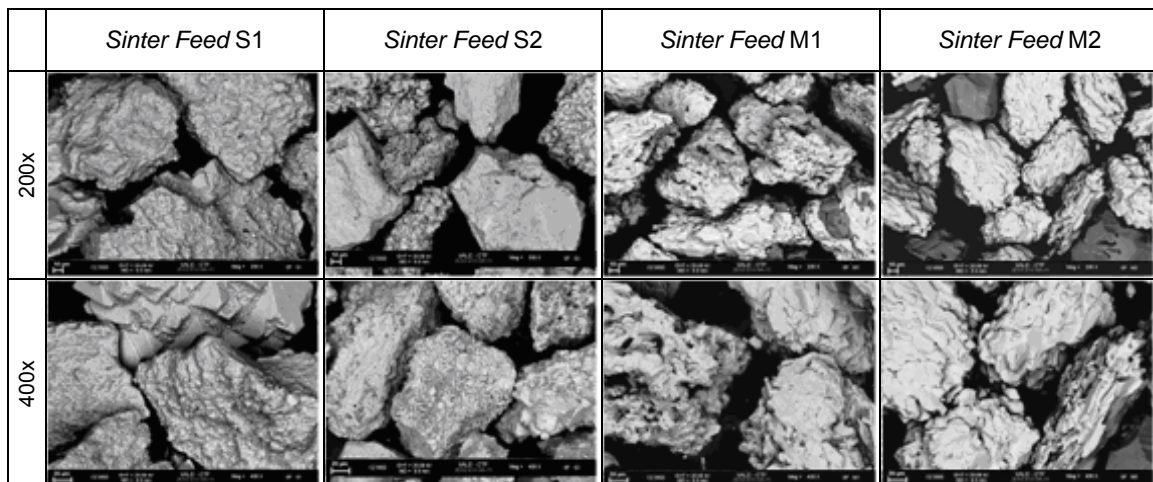
As características mineralógicas e as micrografias destes quatro *sinter feeds* são mostradas nas Figuras 2 e 3, respectivamente.



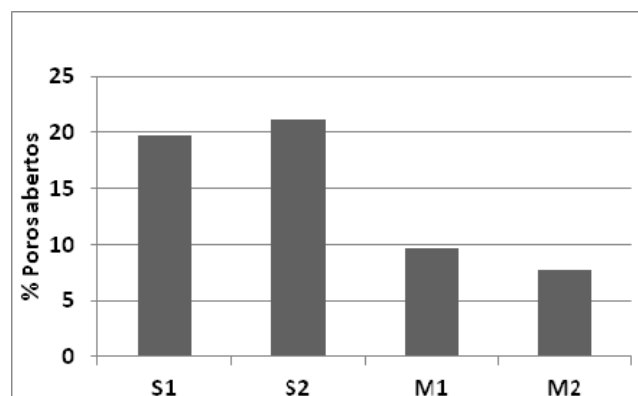
**Figura 2:** Características mineralógicas dos minérios utilizados para compor os tipos M e S.

O principal critério adotado para selecionar os dois tipos de *sinter feeds* foi o tamanho de cristal uma vez que apresenta uma forte inter-relação com as demais características mineralógicas, já que estas são determinadas pela gênese dos minérios.<sup>(2)</sup>

A exemplo disto, é possível notar a distinção destes dois grupos também com relação à porosidade das partículas (Figura 4).



**Figura 3:** Aspecto das partículas dos tipos de minérios utilizados (MEV/fração -0,500mm +0,250mm).



**Figura 4:** Porosidade aberta dos minérios que participaram da mistura (Porosimetria Hg)

O percentual de cada *sinter feed* na composição química das duas amostras foi calculado para que os teores de sílica de S e M ficassem próximos e na faixa de 3,30% a 3,70%. Os principais elementos químicos destas amostras são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição química das amostras S e M (%)

Amostra	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PPC
S	64,33	3,30	2,01	2,39
M	66,24	3,66	0,71	0,50

Cabe chamar a atenção para os percentuais de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e PPC, que tem importante influência nos índices operacionais da sinterização e na qualidade do sínter.<sup>(3-13)</sup> Esses dois compostos são bem menores na amostra M, o que é bem típico de minérios com tamanho de cristal igual ou maior que o de M.<sup>(2,8-10)</sup>

## 2.2 Composição Granulométrica das Subamostras

Para avaliar de que forma os índices operacionais da sinterização (produtividade e consumo de combustível) seriam afetados pelo afinamento de cada tipo de minério, foram produzidas seis subamostras de S, com afinamento de sua distribuição granulométrica e, da mesma forma, seis subamostras de M. Para isto, cada amostra foi peneirada separadamente a seco em 9,52mm, 6,35mm, 1,0mm e 0,15mm, para separação de suas partículas nucleantes (+1,00mm), intermediárias (-1,0 + 0,15mm) e aderentes (-0,15mm). Em seguida, foi feita a recomposição dessas frações para produzir as seis subamostras de S e, igualmente, as seis de M, da seguinte forma:

- todas as subamostras foram preparadas com 5% de material na faixa -9,52mm + 6,35mm.
- para compor as faixas granulométricas menores que 6,35mm, tomou-se como referência uma mistura de minérios teórica com 50% nucleantes, 25% intermediárias e 20% aderentes (que teria usualmente bom desempenho na sinterização) e variou-se de ±20% esses percentuais, sendo compostas conforme mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Distribuição granulométrica (%) e tamanho médio (TM) das subamostras de S e M

Subamostra	-9,52 +6,3mm	-6,3 +1,0mm	-1,0 +0,15mm	-0,15mm	TM (mm)
+N-A	5	70	25	0	3,11
+N-I	5	70	5	20	3,01
+I-A	5	50	45	0	2,49
+I-N	5	50	5	20	1,77
+A-I	5	30	45	20	2,29
+A-N	5	30	25	40	1,67

Para favorecer a percepção das diferenças nas distribuições granulométricas, adotou-se a denominação grossa, média e fina, com base no percentual de nucleantes, 75, 55 e 35%, respectivamente.

## 2.3 Composição Química das Subamostras

As composições químicas das subamostras de S e M são mostradas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

**Tabela 3:** Composição química das subamostras do minério S (%)

Subamostra	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	P	PPC
+N-A	64,61	3,09	1,89	0,16	0,059	2,31
+N-I	64,99	2,80	1,73	0,16	0,056	2,27
+I-A	64,05	3,51	2,13	0,18	0,062	2,48
+I-N	64,71	3,02	1,85	0,17	0,058	2,36
+A-I	63,67	3,80	2,29	0,18	0,065	2,51
+A-N	63,95	3,58	2,17	0,17	0,064	2,43

**Tabela 4:** Composição química das subamostras do minério M (%)

Subamostra	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	P	PPC
+N-A	66,42	3,54	0,64	0,21	0,019	0,49
+N-I	66,68	3,16	0,69	0,23	0,019	0,50
+I-A	65,98	4,04	0,65	0,22	0,019	0,50
+I-N	65,80	4,16	0,72	0,25	0,019	0,51
+A-I	66,50	3,28	0,76	0,26	0,019	0,51
+A-N	66,06	3,78	0,77	0,27	0,019	0,52

## 2.4 Metodologia dos Ensaios de Sinterização

Foram feitos ensaios de sinterização usando a metodologia de balanceamento de finos de retorno, cuja taxa foi de 27%. A altura do leito foi de 550mm e a depressão de 1500mm de coluna d'água. Foi usado fino de coque como combustível sólido. A composição química fixada para o sinter, em todos os experimentos, foi de 5,6% SiO<sub>2</sub>, 1,5% MgO e basicidade (CaO/SiO<sub>2</sub>) de 1,7. Para obter tal composição foram usados os seguintes aditivos: calcário, cal virgem (6,5 kg/t<sub>sinter</sub>, fixa em todos os experimentos), dunito e quartzito.

Os ensaios foram feitos em triplicata para cada subamostra. Foi avaliada a influência do afinamento e mineralogia dos minérios tanto nos índices de produtividade e de consumo específico de combustível (CEC), quanto na densidade a granel do leito, no rendimento da mistura total e na velocidade de sinterização, por serem estes os três fatores determinantes da produtividade.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios em sinterização piloto, para as subamostras de S e M, são mostrados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente, bem como nas Figuras 5 a 7. Esses resultados são a média dos ensaios em triplicata. As subamostras foram ordenadas em ordem decrescente de tamanho médio da sua distribuição granulométrica, a partir do topo da tabela.

**Tabela 5:** Resultados obtidos na sinterização das subamostras do minério tipo S

Subamostra	TM (mm)	Produtividade (t/m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Densid. (t/m <sup>3</sup> )	Velocidade (cm/min)	Rend. (%)	CEC (kg/t <sub>sinter</sub> )
(+N-A)	3,11	37,9	1,89	2,46	56,6	51,3
(+N-I)	3,01	41,7	1,93	2,62	57,2	51,6
(+I-A)	2,49	39,8	1,83	2,69	56,1	52,5
(+A-I)	2,29	38,4	1,95	2,44	56,2	53,8
(+I-N)	1,77	37,4	1,92	2,32	58,2	51,4
(+A-N)	1,67	37,4	1,93	2,45	58,2	54,4

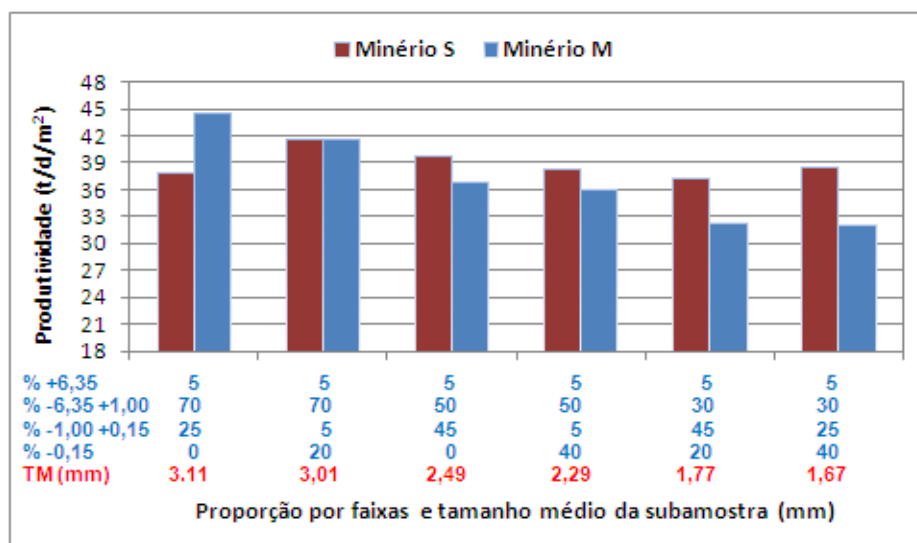
**Tabela 6:** Resultados obtidos na sinterização das subamostras do minério tipo M

Subamostra	TM (mm)	Produtividade (t/d/m <sup>2</sup> )	Densid. (t/m <sup>3</sup> )	Velocidade (cm/min)	Rend. (%)	CEC (kg/t <sub>sinter</sub> )
(+N-A)	3,11	44,6	2,07	2,54	59,0	48,4
(+N-I)	3,01	41,7	2,13	2,30	59,0	49,2
(+I-A)	2,49	36,9	2,10	2,10	58,0	52,0
(+A-I)	2,29	36,0	2,10	2,06	57,7	54,4
(+I-N)	1,77	32,4	2,10	1,86	57,6	56,4
(+A-N)	1,67	32,2	2,14	1,82	57,3	59,0

### 3.1 Produtividade de Sinterização

A variação da produtividade com a diminuição do tamanho médio de S e M é mostrada na Figura 5.

Verifica-se que a produtividade diminuiu bem mais acentuadamente com o afinamento do minério M do que com o minério S. Fazendo a avaliação levando em conta os três níveis de distribuições granulométricas (75%, 55% e 35% de nucleantes), nota-se que nos dois níveis da distribuição com 75% de nucleantes a produtividade obtida com o minério M tendeu a ser mais elevada que a obtida com S (não ficou clara a razão da menor produtividade do tipo S no caso da subamostra com tamanho médio de 3,11). Já nas distribuições com 55% e com 35% de nucleantes a produtividade obtida com as subamostras de S foi superior à de M.

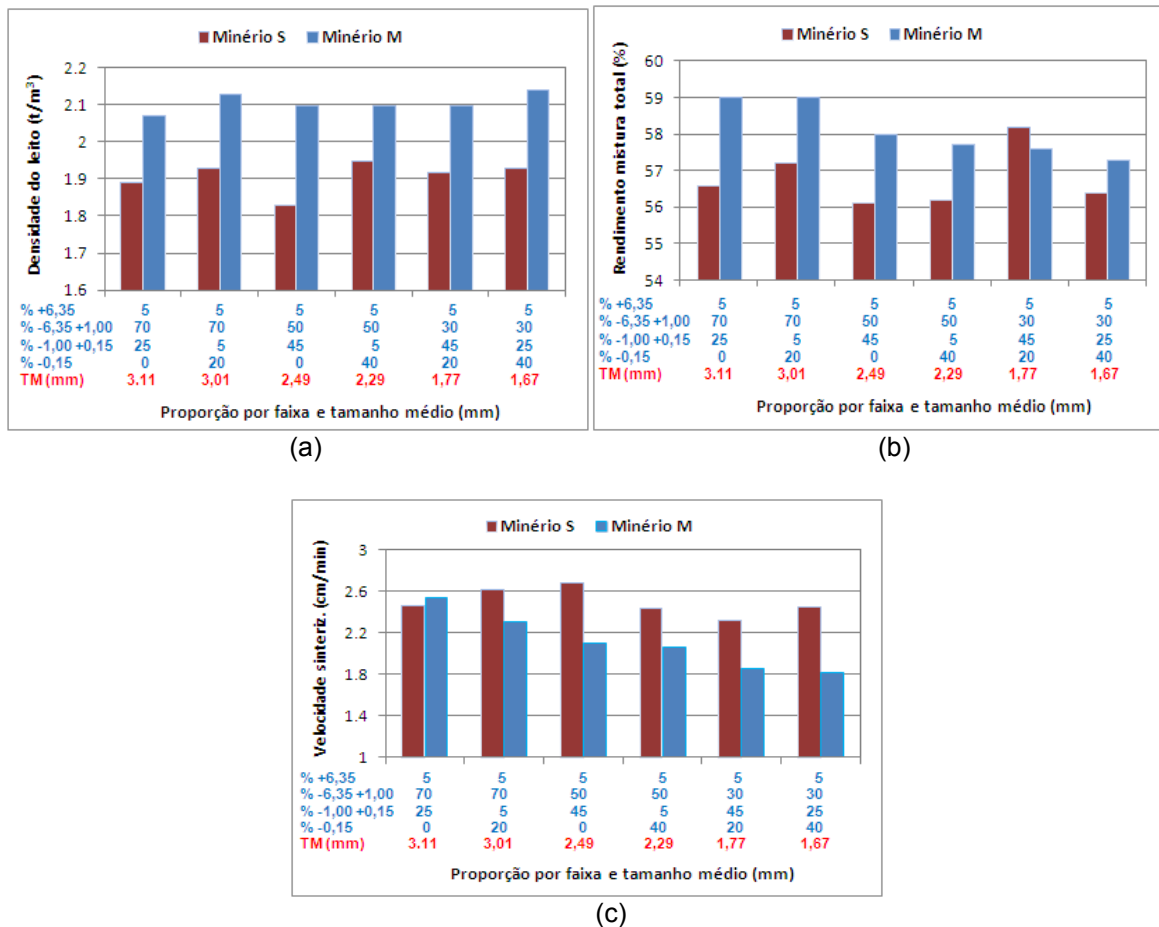


**Figura 5:** Produtividade na sinterização com a diminuição do tamanho médio das subamostras S e M.

Importante também observar que no caso do minério M (em que a produtividade variou mais acentuadamente com o afinamento) dentro do nível de 75% de nucleantes, a produtividade foi maior na sinterização da subamostra preparada com menor percentual de aderentes do que de intermediárias. Já nos níveis de 55% e 35% de nucleantes não houve diferença significativa na produtividade quando se aumentou o percentual de intermediárias em detrimento da diminuição de aderentes ou vice-versa. Em resumo, a variação de  $\pm 20\%$  no percentual de nucleantes influenciou mais os índices de produtividade nos seis experimentos do que igual variação nas intermediárias e aderentes.

Adicionalmente, foi feita uma comparação dos três fatores determinantes da produtividade (Figura 6), dada pela equação:  $P = d \cdot r \cdot v$ , onde  $P$  é a produtividade,  $d$  é

a densidade do leito,  $\underline{r}$  é o rendimento da mistura e  $\underline{v}$  a velocidade da frente de queima.



**Figura 6:** (a) Densidade do leito, (b) rendimento da mistura e (c) velocidade de sinterização das subamostras dos minérios S e M.

Observa-se que as misturas de sinterização produzidas com o minério M apresentaram tanto maior densidade do leito (a), quanto maior rendimento (b), o que favorece a produtividade. Por outro lado, na sinterização das misturas feitas com o minério S a velocidade de sinterização (c) foi maior em cinco dos seis resultados. Comparando-se o perfil destes três gráficos com o da produtividade (Figura 5), observa-se que, dentre esses três fatores, a velocidade de sinterização foi a que apresentou maior correlação com a produtividade. Tendo as subamostras de cada tipo sido preparadas nas mesmas bases granulométricas, e sinterizadas nas mesmas condições, tais perfis de resultados não podem ser atribuídos às distribuições granulométricas, mas sim às mineralogias dos tipos S e M.

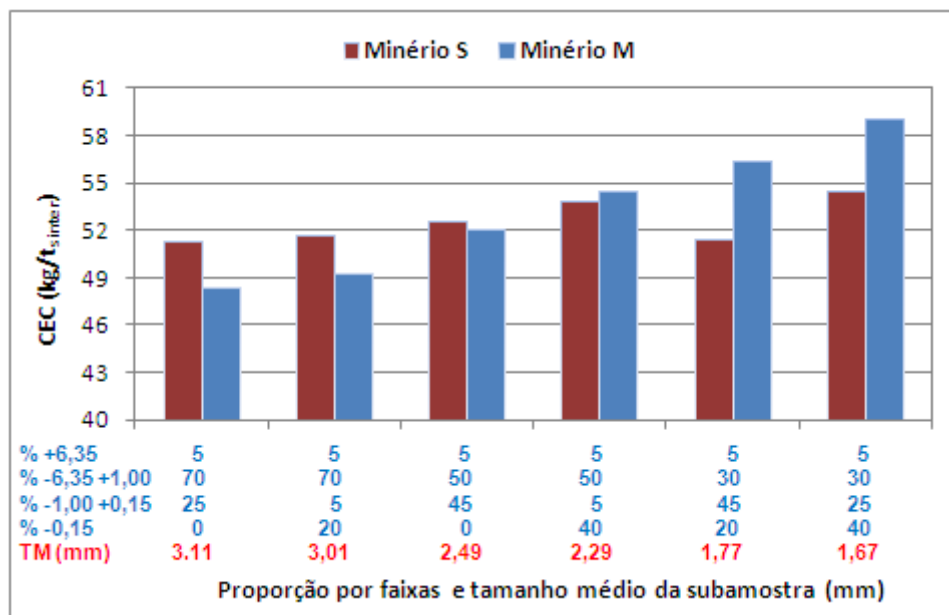
Conforme apresentado na Figura 1, o minério tipo S tem suas partículas constituídas de cristais bem menores que o tipo M, e por isto as partículas de S são mais porosas, de superfícies mais rugosas, e com maior superfície específica do que as partículas do tipo M. Esta maior superfície favorece sobremaneira a absorção de água e a formação de micropelotas (micropelotização) na etapa de mistura. Quanto mais micropelotizada a mistura carregada na máquina de sinterização, maior a permeabilidade do leito à passagem da frente de queima e, portanto, maior a velocidade de sinterização. Por outro lado, as partículas do minério M sendo mais densas (ou menos porosas), com superfícies mais lisas e com baixo PPC, tendem a

produzir leitos menos micropelotizados, mais densos (ou menos permeáveis) e com maior rendimento de sinter. No caso das subamostras de M com 75% de nucleantes, foram produzidos leitos de alta permeabilidade devido muito mais à boa distribuição granulométrica (75% > 1,0 mm) das misturas do que à sua capacidade de micropelotização.

Cabe ressaltar que no presente estudo foi propositalmente usado baixo percentual de cal virgem na mistura, a fim de se poder avaliar mais claramente a influência do afinamento dos minérios. Caso as misturas de sinterização fossem produzidas com maior percentual de cal, a diferença entre as produtividades dos dois tipos de minérios tenderiam a ser menores. Há ainda que ressaltar que, apesar de não estimados nesse estudo, baseado em experiências anteriores,<sup>(2)</sup> a expectativa seria de que os sinteres produzidos com o minério M tivessem melhores resultados de resistência e RDI e, por outro lado, menor redutibilidade do que os feitos com S.

### 3.2 Consumo Específico de Combustível (CEC)

A variação do CEC com a diminuição do tamanho médio de S e M é mostrada na Figura 7.



**Figura 7:** Consumo específico de combustível na sinterização com a diminuição do tamanho médio das subamostras S e M.

Observa-se que o consumo de combustível aumentou com o afinamento tanto do minério M quanto do S, mas a variação foi mais acentuada no caso de M. Fazendo a avaliação com base nos três níveis de distribuição granulométrica, verifica-se que na sinterização das subamostras com 75% de nucleantes o consumo de combustível no caso do minério M foi menor que do minério S, enquanto nas subamostras com 55% de nucleantes foi similar. Já nas subamostras com 35% de nucleantes o consumo na sinterização do minério M foi maior que de S, certamente porque nestes experimentos a qualidade da queima foi prejudicada pela baixa permeabilidade das misturas com minério M. Deve-se, no entanto, levar em conta que em condições normais as usinas siderúrgicas não operam seus processos de sinterização com minérios com apenas 30% > 1,0mm. Estas subamostras foram preparadas tão finas somente para realçar o efeito do afinamento dos minérios na sinterização.



Por fim, no que se refere à influência das partículas intermediárias e aderentes em todos os três níveis de 75%, 55% e 35% de nucleantes, o consumo de combustível foi maior quando se aumentou de 20% o percentual de partículas aderentes em detrimento de igual redução no percentual de intermediárias, para os dois tipos de minérios.

## **4 CONCLUSÕES**

### **4.1 Produtividade**

Os índices de produtividade na sinterização diminuíram mais acentuadamente com o afinamento das subamostras produzidas com o minério M (tamanho médio de cristal de 70  $\mu\text{m}$ ) do que com o minério S (tamanho médio de cristal de 28  $\mu\text{m}$ ).

Na avaliação dos três fatores que determinam a produtividade, foi obtida maior velocidade de sinterização com o minério S e, por outro lado, maior densidade do leito e maior rendimento da mistura com o minério M. Todavia, a velocidade de sinterização foi dentre estes três fatores o que mais impactou a produtividade.

A produtividade na sinterização das subamostras de M foi maior que de S nos níveis mais grossos da distribuição granulométrica desses minérios (75% de nucleantes) e, por outro lado, foi menor tanto nos níveis médios (55% de nucleantes), quanto nos mais finos (35% de nucleantes) da distribuição.

No que se refere à influência da variação de  $\pm 20\%$  no percentual de partículas nucleantes, intermediárias e aderentes na sinterização das subamostras do minério M (cuja produtividade variou mais acentuadamente com o afinamento), verificou-se que a variação de  $\pm 20\%$  no percentual de nucleantes influenciou bem mais a produtividade do que idêntica variação no percentual de intermediárias e aderentes.

### **4.2 Consumo de Combustível**

Os índices do consumo de combustível variaram mais acentuadamente com o afinamento das subamostras produzidas com o minério M do que com o minério S.

O consumo de combustível na sinterização das subamostras de M foi menor que de S nos níveis mais grossos da distribuição granulométrica (75% de nucleantes), similar nos níveis médios (55% de nucleantes) e maior nos mais finos (35% de nucleantes).

No que se refere à influência da variação do percentual das partículas intermediárias e aderentes, o consumo de combustível foi maior quando se aumentou de 20% o percentual de partículas aderentes em detrimento de igual redução no percentual de intermediárias, em todos os três níveis de distribuição granulométrica dos dois tipos de minérios.

## REFERÊNCIAS

- 1 LOYOLA, V. In. 13<sup>th</sup> ABM Iron Ore Symposium, Brazil, 2012.
- 2 SOUZA NETO et al. In. XXXII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, Brasil, 2002.
- 3 SHIGAKI, I.; SAWADA, M.; MAEKAWA, M.; NARITA, K. In. Trans. Iron Steel Inst. Japan, 1982, 22, 838.
- 4 SHIGAKI, I.; SAWADA, M.; GENNAI, N. In. Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 1986, 26, 503.
- 5 MATSUNO, F.; NISHIKIDA, S.; IKESAKI, H. In. Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 1984, 24, 1040.
- 6 MATSUNO, F.; NISHIKIDA, S.; IKESAKI, H. In. Trans. Iron Steel Inst. Japan, 1985, 25, 953.
- 7 PIMENTA, H.P; SESHADRI, V. In. Ironmaking Steelmaking, 2002, 29, 175.
- 8 MATSUO, T.; YABATA, T.; OOSUZU, K.; HOSHINO, K.; KAWAMOTO, K.; NODA, T. In. CAMP-ISIJ, 1993, 6, 64.
- 9 KASAI, E. In. CAMP-ISIJ, 1995, 8, 841.
- 10 YAMAMOTO, T.; HIDA, Y. In. CAMP-ISIJ, 1990, 3, 1054.
- 11 CORES, A.; BABICH, A.; MUÑIZ, M.; ISIDRO, A.; FERREIRA, S.; MARTÍN, R. In. Ironmaking Steelmaking, 2007, 34, 231
- 12 BRISTOW, N.J.; WATERS, A.G. In. Trans. Inst. Min. Metall., 1991, 100, C1.
- 13 BRISTOW, N.J.; GOSS, J.; WATERS, A.G. Iron Steelmaker, v.18, No.9, 61., 1991.