

## Efeitos das características granulométricas e mineralógicas da sílica contida no itabirito compacto adicionada em um *sinter feed* hematítico para sinterização

*Effects of compact itabirite grain size distribution and the mineralogical aspects when added to a hematite sinter feed for sintering*

### Victor Pereira Padula

Engenheiro na Vale, com Mestrado em Engenharia de Minas pela UFOP  
[victor.padula@vale.com](mailto:victor.padula@vale.com)

### Carlos Alberto Pereira

Professor na UFOP, com Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG  
[pereira@demin.ufop.br](mailto:pereira@demin.ufop.br)

### Cláudio Batista Vieira

Professor na UFOP, com Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG  
[geometalurgia@yahoo.com.br](mailto:geometalurgia@yahoo.com.br)

### Hamilton Porto Pimenta

Gerente da área de pesquisa em processo de aglomeração e redução na Vale, com Mestrado em Engenharia Metalúrgica pela UFMG  
[hamilton.pimenta@vale.com](mailto:hamilton.pimenta@vale.com)

### Maria Beatriz Vieira

Geóloga na Vale e formada em Geologia pela UFMG, especialista em caracterização mineralógica e de materiais  
[maria.beatriz.vieira@vale.com](mailto:maria.beatriz.vieira@vale.com)

### Resumo

A maior participação de minérios contendo uma maior quantidade de sílica de diferentes origens no beneficiamento e, por sua vez, no processo de sinterização é uma tendência natural, conseqüência da mudança no perfil do *run-of-mine*. No *sinter*, a sílica tem o papel importante de garantir um volume adequado de escória e propiciar uma resistência mecânica satisfatória para as operações de manuseio, transporte e para seu uso nos altos-fornos. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi caracterizar uma fonte de sílica (itabirito compacto) avaliando sua influência nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes de um *sinter feed* hematítico anidro sobre as propriedades físicas e metalúrgicas do *sinter* produzido em escala-piloto, além da produtividade e do consumo de combustível na sinterização piloto.

**Palavras-chave:** Influência, sílica, frações, sinterização.

### Abstract

*In the hematite/itabirite relationship the silica proportion is increasing, changing the run-of-mine profile. Although process routes are being adequated because of this change, this is occurring without the profound knowledge required with regard to the quality impact of the silica in the sinter feed within the sintering process parameters and the physical and metallurgical quality of the sinter product. The objective of this study is to characterize a hematite sinter feed containing silica (compact itabirite) with the following grain size distribution: adherent, intermediate and nucleant, evaluating the influence of this source of silica in the sinter characteristics and in the sintering process.*

**Keywords:** Influence, silica, iron ore, sintering.

## 1. Introdução

No Quadrilátero Ferrífero, estão localizadas importantes reservas de

minério de ferro. Estes podem ser classificados em dois grupos principais: os

itabiríticos, mais heterogêneos e contendo óxidos e hidróxidos de ferro, e os

hematíticos de alto teor, quimicamente mais homogêneos e ricos em óxidos de ferro (Rosière, 1983; Rosière et alii, 1993).

A inversão da relação hematita/itabirito (HE/IT) é uma tendência natural das reservas ou jazidas nessa região. Com a evolução da lavra e com o aumento da participação de itabiritos na matriz de minérios, que são alimentados nas usinas de beneficiamento (*run-of-mine*), tornam-se cada vez mais importantes investimentos na concen-

tração do minério de ferro *sinter feed*.

O teor de sílica no *sinter feed*, que tem relação direta com esse perfil de alimentação mais itabirítico das usinas de beneficiamento, é controlado pelos metalurgistas, como uma das alternativas, para garantir a produção de um sinter-produto contendo um volume suficiente de escória, de modo a propiciar uma resistência mecânica satisfatória para as operações de manuseio, transporte e para seu uso nos altos-fornos.

A resistência mecânica do sinter-

produto é um ponto crítico do processo industrial de sinterização de minérios de ferro (Vieira et al., 2003; Coelho, 2002). Assim, em função dessas fortes alterações do perfil de alimentação, torna-se a cada dia mais necessário um entendimento de quais parâmetros intrínsecos (sejam eles, químicos, físicos, mineralógicos e/ou microestruturais) dos *sinter feeds* podem interferir no desempenho do processo industrial de sinterização e na qualidade física e metalúrgica do sinter-produto.

## 2. Objetivo

Esse trabalho busca avaliar a influência da distribuição da sílica adicionada através do itabirito compacto nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes em

um *sinter feed* hematítico anidro, sobre as propriedades físicas e metalúrgicas do sinter produzido em escala-piloto, assim como sobre a produtividade e o consumo

de combustível de uma sinterização-piloto de minérios de ferro.

## 3. Materiais e métodos

As amostras *sinter feed* sul (SFS) e a fonte de sílica, classificada inicialmente como sílica mista (SM), foram geradas no Complexo Itabira, que está localizado na região do Quadrilátero Ferrífero. A amostra *sinter feed* sul foi gerada a partir de um granulado de hematita de baixo teor de contaminantes utilizando a seguinte rota de processo: britagem em 8mm; peneiramento (+8mm e +1mm) e classificação em espiral (-1mm +0,25mm) e (-0,25mm). O

itabirito compacto, utilizado como fonte de sílica, da mesma forma não sofreu qualquer concentração, sendo apenas britado e classificado.

O itabirito compacto foi adicionado nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes no *sinter feed* base (*sinter feed* sul - SFS) de baixo teor de sílica e alumina. As amostras foram adequadas de forma a permitir que essa mistura de minérios apresentasse uma distribuição granulométrica próxima à de um *sinter*

*feed* típico segundo Astier.

Para caracterização do *sinter feed* base e da fonte de sílica, foram feitas análises químicas, granulométricas, mineralógicas e microestruturais através das seguintes técnicas: fluorescência de raios X, via úmida, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios X.

Para caracterização e identificação das principais diferenças mineralógicas e microestruturais entre as frações granu-

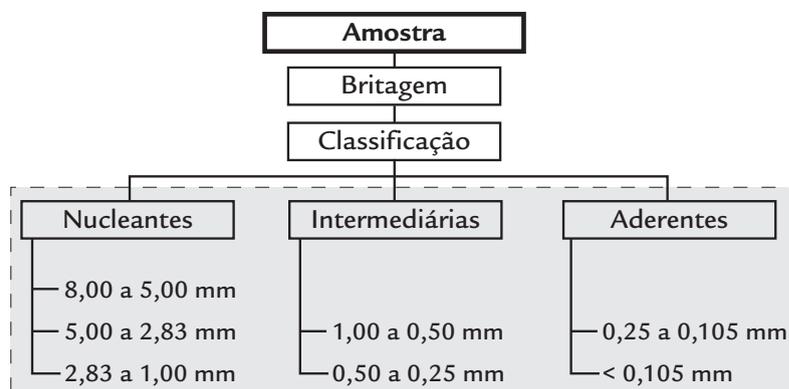


Figura 1 Fluxo de preparação das matérias-primas em faixas granulométricas.

Parâmetro	Referência
Basicidade (CaO/SiO <sub>2</sub> ) do sinter-produto	1,75
SiO <sub>2</sub> do sinter-produto	4,50 %
MgO do sinter-produto	1,45%
Fonte de MgO	Dolomita
Cal hidratada na mistura a sinterizar	1,00%
Coque na mistura a sinterizar	Retorno balanceado
Umidade da mistura	Ótima (medida experimental)
Altura da camada da máquina de sinter	500mm
Depressão	600mm H <sub>2</sub> O (ignição)
Finos de retorno (sinter de retorno)	30% (referência industrial)

Tabela 1 Características químicas do sinter e principais parâmetros de processo.

Tabela 2  
Planejamento dos ensaios na planta-piloto e balanço de massa de cada mistura a sinterizar (porcentagem em peso).

Mistura	M1	M2	M3
SFS (Sinter Feed Sul)	50,93	54,16	54,36
SM (Nucleantes)	4,82		
SM (Intermed.)		1,55	
SM (Aderente)			1,36
Calcário	9,41	9,40	9,39
Cal virgem	0,99	0,99	0,99
Coque/Antracito (CST)	3,85	3,90	3,90
Retorno de sinterização	30,00	30,00	30,00

lométricas do sinter feed sul (SFS) e da fonte de sílica, analisaram-se a composição mineralógica por faixa granulométrica, o grau de liberação das partículas e o seu tipo (liberada monocristalina, liberada policristalina e mista).

Foram feitas 3 misturas para os ensaios em triplicata na sinterização-piloto, sendo os itabirito adicionados da seguinte forma: um na fração -8+1mm (nucleante), outro na fração -1+0,25mm (intermediária) e, por último, outro na fração -0,25mm (aderente).

As demais matérias-primas tiveram suas distribuições granulométricas definidas da seguinte maneira:

- Cal: 100% abaixo de 3,0mm
- Dolomita: 100% abaixo de 3,0mm
- Coque:
  - < 1,0 mm = max 35,0%
  - > 3,36 mm = max 5,0%
  - < 0,150 mm = max 5,0%
  - 3,36mm e +1,0mm = mín 55%

O critério para definição do consumo de combustível foi a metodologia Francesa “Retorno Fechado”, onde o consumo de combustível é determinado pela necessidade de se atingir em todos os testes, o mesmo nível de retorno que, nesse caso, foi de 30%.

Após os testes na sinterização-pi-

loto, foram determinados o consumo de combustível e a produtividade. Após as queimas, foram feitas análises químicas, físicas, metalúrgicas e mineralógicas dos sínteres produzidos.

Definiram-se as faixas granulométricas para as amostras componentes das misturas em função de sua relevância para o processo de sinterização. A Figura 1 mostra o fluxo de preparação dessas matérias-primas.

No planejamento experimental desse estudo, foram definidas 3 condições de teste, sendo considerados, para carregamento da sinterização, os procedimentos sem segregação granulométrica.

Na Tabela 1, está apresentada a qualidade química objetivada para o sinter-produto e demais parâmetros para o teste na sinterização-piloto.

Para realização dos testes-piloto, algumas matérias-primas desse estudo foram submetidas a uma preparação adicional para ajuste de suas distribuições granulométricas, definindo, inclusive, a massa de cada material visada para cada faixa granulométrica.

Na Tabela 2, está apresentado o planejamento experimental das queimas com a porcentagem de cada matéria-prima que compôs cada uma das 3 misturas

preparadas.

Foram utilizados coque e antracito (70% de coque + 30% de antracito). O percentual de sílica adicionada nas misturas M1, M2 e M3 foi definido de maneira a manter um mesmo patamar de SiO<sub>2</sub> no sinter-produto.

Na Tabela 3, está apresentada a técnica experimental empregada na caracterização do sinter *feed*.

Através dessa técnica (MO), objetivou-se realizar análise metalográfica dos sínteres para se conhecerem as relações e as proporções entre os seus principais constituintes minerais.

Para cada amostra, foram feitas lâminas delgadas polidas de grãos em diversas frações obtidas por peneiramento a úmido a partir das amostras originais. Para a confecção das seções polidas, utilizou-se o sistema de preparação semi-automático.

Para avaliação do sinter-produto foi realizado teste físico com o objetivo de medir a resistência do sinter. Para essa avaliação, utilizou-se o teste de tamboramento (*Tumbler Test*), adotando-se a norma ISO 3271.

Para a análise da redutibilidade dos sínteres produzidos, foi realizado ensaio metalúrgico segundo a norma IR 7215.

Tabela 3  
Técnica experimental empregada na caracterização mineralógica do sinter *feed*.

Método	Faixa	Frações	Preparação	Informações
MO - LCM (Microscopia óptica)	Global	Global	Peneiramento seco 80%<0,500mm 200g cada fração	Identificação das fases Quantificação das fases Descrição e interpretação da microestrutura
	+1mm	+1mm		
	-1+0,25mm	-1+0,25mm		
	-0,25mm	-0,25mm		

#### 4. Resultados e discussão

Na Tabela 4, estão apresentados os resultados das análises químicas e granulométricas do *sinter feed* base (SFS).

O *sinter feed* base utilizado na mistura apresentou os seus maiores teores de

sílica na fração aderente, no entanto esta representou 31,01% do total em massa. Esse *sinter feed* hematítico apresentou, no resultado de análise global, baixos níveis de contaminantes, como, por exemplo, uma

alumina de 0,83%. Sua fração nucleante apresentou um resultado de 54,95% da massa total.

Os resultados da caracterização mineralógica e microestrutural (Figura 2) de-

Tabela 4  
Resultados de análise química e granulométrica do *sinter feed* base.

Parâmetro	% por fração	Fet	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	Fech.
Química Global	100,00	66,98	2,51	0,83	0,017	0,077	0,080	0,040	0,038	0,590	99,99
-6,3 + 1,0mm	54,95	68,81	0,64	0,46	0,019	0,042	0,015	0,045	0,034	0,350	100,01
-1,0 + 0,25mm	14,04	67,08	2,26	0,82	0,020	0,112	0,080	0,060	0,043	0,610	99,97
-0,25mm	31,01	64,50	5,89	0,83	0,020	0,123	0,100	0,060	0,055	0,720	100,08

monstram que sua fração nucleante possui 25% de quartzo e 75% de hematita, sendo que 21% do quartzo era do tipo monocristalino e 79% era do tipo policristalino, com um grau de liberação de 38% e um tamanho de cristal de, aproximadamente, 0,43mm. Na fração intermediária, obteve-se um resultado de 56% de quartzo e 44% de hematita, com 63% de quartzo do tipo mono-

cristalino e 37% do tipo policristalino, com grau de liberação de 70%, tamanho médio de cristal do quartzo igual a 0,30 mm.

Na fração aderente, obteve-se um valor de 80% de quartzo e obteve-se um valor 20% de hematita, com 100% do quartzo do tipo monocristalino, com grau de liberação de 91% e com tamanho médio de cristal do quartzo de 0,07 mm.

Observa-se, na Figura 2, que há uma redução do tamanho de cristal da fração nucleante para a fração aderente. Da mesma forma, há também uma tendência de as partículas se tornarem mais monocristalinas nas frações aderentes.

A fração aderente é também a que apresenta o maior grau de liberação. As tendências observadas podem ser resultado da

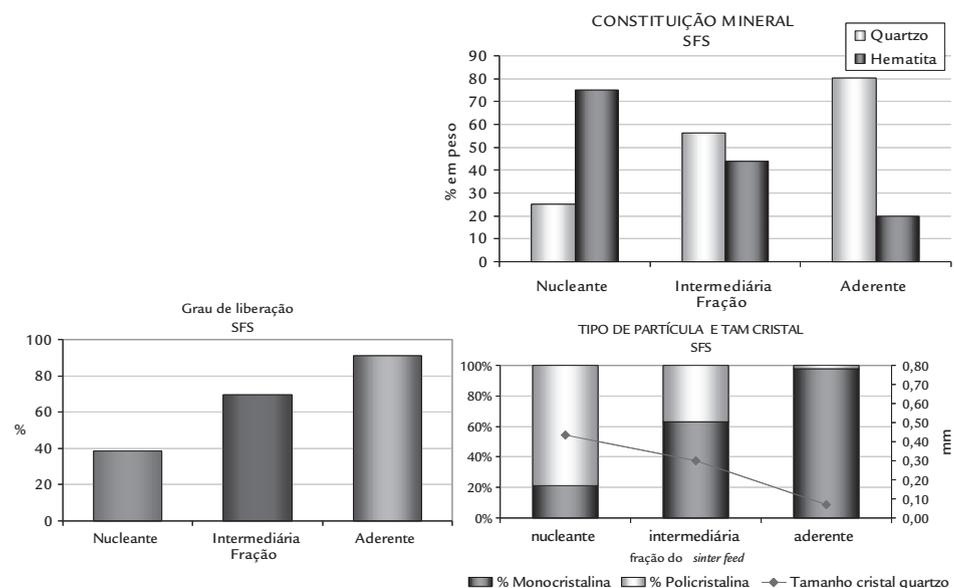


Figura 2 Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural do sinter feed sul.

degradação/cominuição fruto do manuseio do minério.

Na Tabela 5, está apresentado o resultado das análises químicas da fonte de sílica itabirito compacto adicionada em cada uma das frações granulométricas.

Na Tabela 6, estão apresentados, de forma consolidada, os principais resultados da caracterização mineralógica e microes-

trutural do itabirito compacto (SM).

Através da Tabela 6, nota-se que as partículas tendem a se tornarem do tipo monocristalinas com a redução de tamanho da fração granulométrica (nucleante para aderente). O mesmo ocorre para o tamanho de cristal, que é sempre menor nas frações aderentes. Com relação ao grau de liberação este aumenta devido, provavelmente, à de-

gradação ou cominuição.

Na Tabela 7, estão apresentados os resultados das análises químicas e granulométricas de cada sinter-produto gerado em cada um dos três testes realizados na sinterização-piloto.

O sinter produzido apresentou, nos seus resultados, uma variação no teor de sílica de 4,20% a 4,45% e uma basicidade

Fontes de sílica	Tipos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Mn	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P	PF
Itabirito compacto	SM Nucleante	80,65	17,03	1,00	0,04	0,29	0,03	0,06	0,064	0,022	0,77
	SM Intermediária	50,15	47,27	1,17	0,06	0,41	0,09	0,04	0,072	0,020	0,91
	SM Aderente	43,54	53,63	1,59	0,04	0,19	0,04	0,04	0,082	0,015	0,76

Tabela 5 Resultado da análise química da fonte de sílica itabirito compacto.

Fonte de sílica adicionada	Fração granulométrica	Quartzo (%)	Hematita / outros (%)	% de partículas policristalina	% de partículas monocristalina (%)	Grau de liberação (%)	Tamanho médio de cristal (mm)	Classificação das fontes com base nos resultados da caracterização
Itabirito compacto	Nucleante (-8 + 1mm)	31	69	89	11	25	0,29	Sílica mista
	Intermediária (-1 + 0,25mm)	30	70	38	62	89	0,34	Sílica liberada monocristalina (SLM)
	Aderente (-0,25mm)	46	54	4	96	80	0,10	

Tabela 6 Resultados consolidados das análises mineralógicas e microestruturais do itabirito compacto.

de 1,72 a 1,74. Os resultados de granulometria apresentados mostraram um tamanho médio de partículas variando de 24,35mm a 25,99mm. Essas variações foram consideradas aceitáveis, fato que demonstra que não houve influência da adição da fonte de sílica nas três frações granulométricas, nas características químicas e nas granulométricas dos sínteres.

A Figura 3, que apresenta o resultado da análise mineralógica dos sínteres, demonstra a homogeneidade entre os três produtos gerados na sinterização-piloto. Observa-se uma pequena redução na hematita total na fração aderente, com aumento nos ferritos. Uma possibilidade para esse fato é a

maior presença de quartzo nessa fração granulométrica (aderente), tanto no sinter feed base, quanto na fonte de sílica adicionada, além do elevado grau de liberação das partículas nessa faixa granulométrica.

Na Figura 4, estão apresentados os resultados do ensaio de tamboramento realizado para cada mistura, onde se percebe

Tabela 7  
Qualidade química e granulométrica de cada sínter.

Análise química (%)	M1	M2	M3
Fe Total	59,73	59,67	59,68
FeO	5,00	5,00	5,00
SiO <sub>2</sub>	4,20	4,45	4,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,01	1,01	1,04
CaO	7,25	7,76	7,71
MgO	1,77	1,76	1,69
Mn	0,08	0,08	0,08
P	0,02	0,02	0,02
Fechamento	99,45	100,12	100,04
Basicidade	M1	M2	M3
Binária	1,72	1,74	1,73
Granulometria	M1	M2	M3
50,0 mm	14,33	13,10	15,37
35,5 mm	30,29	27,02	28,59
25,0 mm	41,58	39,91	38,13
10,0 mm	67,76	63,29	61,71
5,0 mm	96,15	93,50	92,73
-5,0 mm	3,85	6,50	7,27
Tamanho médio (mm)	25,99	24,35	24,65

que a fração aderente contribuiu para uma melhor resistência do sínter.

Essa tendência, dentro das condições estudadas, pode estar relacionada com o menor tamanho de cristal na fração aderente e, ainda, com fato de, nessa fração, o tipo de partícula apresentar-se majoritariamente monocristalina..

Outro ponto importante é que na fração aderente, a mineralogia das matérias-primas demonstrou que esta é a fração de maior quantidade de quartzo, podendo favorecer a resistência do sínter.

Na Figura 5, estão apresentados os

resultados dos ensaios para avaliação da qualidade metalúrgica do sínter. Observa-se que, para a redutibilidade, a variação foi de 71,9% a 69,2% entre os sínteres produzidos na sinterização-piloto. Para o RDI, a variação foi de 30,4% a 29,3%. É observada uma leve tendência de resultados mais baixos das frações nucleantes, para as aderentes, para os dois parâmetros avaliados. O número de ensaios realizados não permitiu se chegar a conclusões claras em torno desses dois parâmetros, em função da pequena diferença nos resultados, provavelmente consequência da homogeneidade dos sínteres produzidos

do ponto de vista químico, granulométrico e mineralógico.

Na Figura 6, estão apresentados os resultados dos parâmetros da sinterização-piloto, do consumo de combustível e da produtividade. Os resultados dos índices operacionais em questão apontam para uma significativa influência da fonte de sílica adicionada e de sua fração granulométrica, no consumo de combustível e na produtividade.

Na Figura 6, nota-se que existe uma forte tendência da sílica, na fração nucleante, contribuir para melhores níveis de pro-

Figura 3  
Resultado da quantificação de fases do sínter.

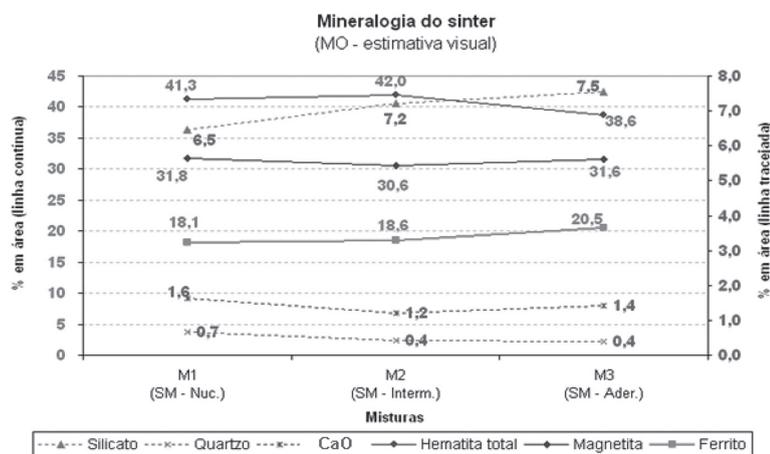
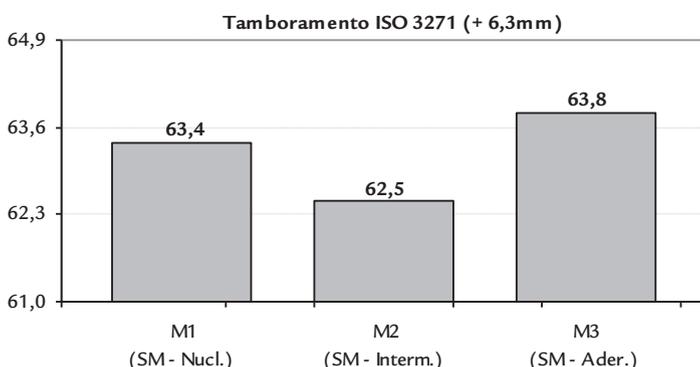


Figura 4  
Resultado do ensaio de tamboramento para cada sínter gerado.



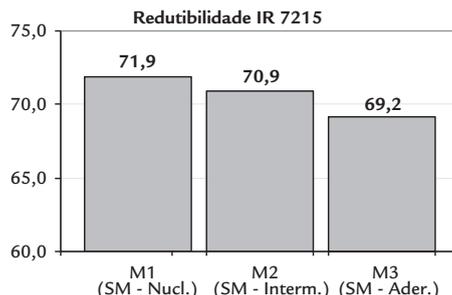
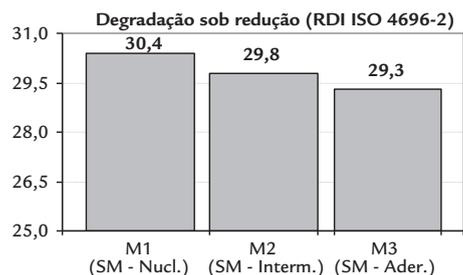
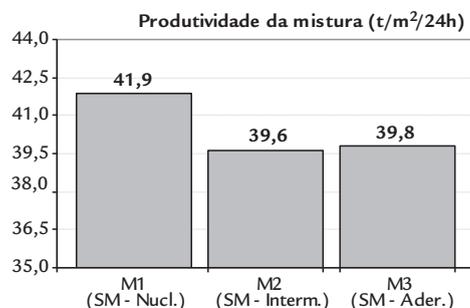


Figura 5  
Resultado do ensaio para avaliação do grau de redução e redutibilidade.

atividade na sinterização (41,9%) quando comparada com a sílica nas outras frações. Esse fato pode ser explicado pelo favorecimento da permeabilidade do leito com as frações nucleantes (-8 + 1mm).

Uma segunda e possível explicação para esse fato pode ser ao grau de liberação dessa fonte de sílica na fração nucleante



(menor patamar), que, associado à sua mineralogia com elevado nível de hematita e baixo percentual de quartzo, sugere uma melhor distribuição da sílica favorecendo o processo de sinterização, através da reação da sílica com o calcário.

O resultado do consumo de combustível atingiu os seus mais baixos níveis na fra-

ção nucleante, conforme Figura 6. A explicação para esse fato, no caso deste estudo, é, provavelmente, a mesma apresentada para a produtividade, já que, na fração aderente, as partículas encontram-se liberadas e, praticamente, na forma de quartzo, inibindo as reações necessárias para um bom desempenho da sinterização-piloto.

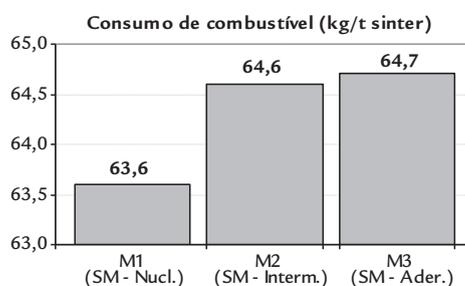


Figura 6  
Resultado do consumo de combustível e da produtividade da sinterização-piloto.

## 5. Conclusão

Os resultados da qualidade física e metalúrgica dos sínteres, em pequena intensidade, se mostraram influenciáveis pelas diferentes características intrínsecas da sílica e/ou pela sua distribuição nas diferentes frações granulométricas do sinter feed.

A produtividade e o consumo de combustível da sinterização em escala-

piloto, para as condições desse estudo, foram fortemente influenciados pelas diferentes características intrínsecas da sílica nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes e/ou pela sua distribuição nas diferentes frações do sinter feed.

Os resultados obtidos, nesse trabalho, permitiram concluir que o conhecimento prévio dos atributos intrínsecos da

sílica da mistura de minérios a sinterizar, que são definidos a partir do ROM e das rotas de processo estabelecidas no beneficiamento do sinter feed, pode contribuir para um melhor aproveitamento dos recursos minerais, através da otimização dos parâmetros de processo da sinterização e de ganhos nas propriedades físicas e metalúrgicas do sinter produzido.

## 6. Referências bibliográficas

- COELHO, L. H. *Rendimento na sinterização em função da mineralogia do sinter feed*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, 2002. 154p. (Dissertação de Mestrado).
- ROSIÈRE, C. A. A recristalização do minério de ferro da jazida do Pico do Itabirito no Quadrilátero Ferrífero e suas implicações genéticas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2. *Proceedings...* Belo Horizonte: Boletim da SBG - Núcleo Minas Gerais, 1983. v. 3, p. 173-186.
- ROSIÈRE, C. A., CHEMALE Jr. F., QUADE, H.; SIEMES, H., FISCHER, D. P., SOUZA, E. M. R. Análise microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero - texturas desenvolvidas e um modelo para sua origem. In: WORKSHOP GEOLOGIA ESTRUTURAL DOS MINÉRIOS DE FERRO. *Proceedings...* Belo Horizonte: Boletim SBG Núcleo Minas Gerais, 1993. v. 12, p. 362-366.
- VIEIRA, C. B., ROSIÈRE, C. A., PENA, Q. E., SESHADRI, V., ASSIS, P. A. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. *REM - Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 56, n.2, p. 97-102, Abril-jun. 2003.