

ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA A REDUÇÃO DE RDI EM SÍNTER COM BAIXO VOLUME DE ESCÓRIA ¹

Flávio de Castro Dutra ²
Alex André de Castro ²
Guilherme Antônio Defendi ²
Keiner Duarte Alvarenga ³
Luiz Eduardo Reis da Cruz ⁴

Resumo

Estudo com misturas de sinterização com elevadas participações de *sinter feed* de baixa sílica foi realizado com o objetivo principal de ajustar a degradação do sinter sob redução (RDI) a níveis adequados para uso nos altos-fornos. Alternativas para otimização da qualidade do sinter foram avaliadas, utilizando os recursos de simulação física disponíveis no Departamento de Marketing e Pesquisa & Desenvolvimento (DITM) da Vale. As alternativas tecnológicas contempladas para a otimização do RDI foram: aumentar o nível de MgO no sinter (i); reduzir a altura da camada a sinterizar (ii) e aumentar o volume de escorificáveis do sinter (iii). Das ações adotadas, os aumentos nos teores de MgO e SiO₂ apresentaram melhor eficácia. Estas ações refletiram em redução significativa no RDI (em até 25%). Esse trabalho visa suportar os futuros projetos siderúrgicos da Vale no Brasil.

Palavras-chave: Sinterização; RDI; Otimização.

ALTERNATIVE TECHNOLOGY FOR SINTER RDI REDUCTION WITH LOW SLAG VOLUME

Abstract

Study with sintering blends of high amount of low-silica sinter feed was done aiming to reduce the reduction degradation index (RDI) of sinter. Alternatives for sinter quality optimization were evaluated using the physical simulation facilities available at Vale's Marketing and Research & Development Department. The technological alternatives considered to optimize sinter RDI were: increasing of sinter MgO content, reduction of sintering bed height and increasing of sinter slag volume. The most efficient alternatives were associated to SiO₂ and MgO contents modifications. These actions reflected in a significant reduction in RDI (up to 25%). This study aims to support the futures Vale's steel mill projects in Brazil.

Key-words: sintering, RDI, optimization

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc (Centro de Tecnologia de Ferrosos, Vale)

³ Analista de Sistemas, (Centro de Tecnologia de Ferrosos, Vale)

⁴ Coordenador, (Departamento de Participações Siderúrgicas, Vale)

1 INTRODUÇÃO

A Vale está desenvolvendo alguns projetos siderúrgicos para implantação nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, aproveitando-se das vantagens logísticas e de disponibilidade de minério de ferro de alta qualidade.

Os minérios de ferro produzidos na região Norte serão a base desses projetos e têm por característica principal teores muito baixos de ganga, permitindo desenvolver cargas metálicas para os altos-fornos que resultem em baixo volume de escória e baixo consumo específico de combustível.

Estudo desenvolvido no Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF), em suporte a um dos projetos da Empresa, avaliou os desempenhos de cargas metálicas produzidas basicamente a partir de um único minério, tanto no processo de sinterização quanto nos altos-fornos. Apesar dos inúmeros benefícios decorrentes dessa prática, os resultados do estudo demonstraram a necessidade de cuidados especiais no estabelecimento dos limites mínimos para compostos escorificáveis (SiO_2 , CaO e MgO) no sinter, para a garantia de níveis adequados de resistência mecânica e desintegração do aglomerado sob redução (RDI).

Neste trabalho, ênfase é dada às ações adotadas para a otimização da qualidade do sinter produzido com elevada participação de minério do Norte e com baixos níveis de ganga. Dentre as ações avaliadas destacam-se a elevação dos teores de SiO_2 e de MgO no sinter.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de minérios de ferro utilizadas neste estudo representam produtos comerciais da Vale (portfólio 2009). O *sinter feed* da região Norte (SFN) foi adotado como o minério base da mistura. Como corretivo de sílica do sinter foram consideradas duas alternativas distintas: um *sinter feed* de alta sílica do quadrilátero ferrífero (SFS) e quartzito (areia). Como, na ocasião desse estudo, ainda não existia a definição dos fornecedores de fundentes e combustíveis sólidos para o projeto, foram utilizados materiais com disponibilidade na região do empreendimento.

As composições químicas dos minérios utilizados no estudo são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química de minérios

Sinter Feed	%Fe	SiO_2	$\%\text{Al}_2\text{O}_3$	%CaO	%MgO	%P	%Mn	%PPC
SFN	66,30	1,10	1,04	0,014	0,051	0,021	0,66	1,87
SFS	60,62	11,15	0,94	0,022	0,021	0,024	0,15	0,88

O estudo foi realizado em duas etapas:

2.1 Etapa 1: Avaliação de Desempenho de Misturas Potenciais

Inicialmente, simulações numéricas foram realizadas utilizando o Modelo de Otimização de Misturas (MSID) por Rede Neural, de propriedade da Vale. O objetivo foi selecionar, dentre diversas alternativas, aquelas misturas de minérios de ferro e aditivos que resultassem em sínteres tecnicamente promissores para atendimento das necessidades do projeto e, portanto, avaliação em escala piloto. Para tanto, o modelo MSID considera os parâmetros de qualidade química dos minérios e aditivos,

além da distribuição granulométrica e aspectos mineralógicos e micro-estruturais dos *sinter feeds* disponíveis ao projeto.

A principal diretriz nestas simulações foi a maximização do consumo de *sinter feed* da região Norte na mistura de minérios. A partir desta premissa, a composição química do sinter foi ajustada buscando balancear os parâmetros de qualidade física e metalúrgica do sinter, consumos específicos de matéria-prima e parâmetros de qualidade da escória do alto-forno.

Para o alto-forno, as premissas de processo e qualidade de escória foram definidas pela área responsável pelo projeto, sendo algumas mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Premissas de projeto consideradas na simulação

Parâmetro operacional	Limite inferior	Limite superior
Teor de MgO na escória	6.5%	10%
Basicidade Binária	1,20	1,24
Consumo de Coque	340 kg / t gusa	
PCI	150 kg / t gusa	

Quanto à carga metálica do alto-forno, duas práticas operacionais distintas foram avaliadas:

- carga composta por 100% de sinter; e
- carga composta por sinter e pelotas Vale, cujas partições foram definidas pela minimização do volume de escória.

A Figura 1 apresenta as alternativas de carga metálica para o Alto-Forno.

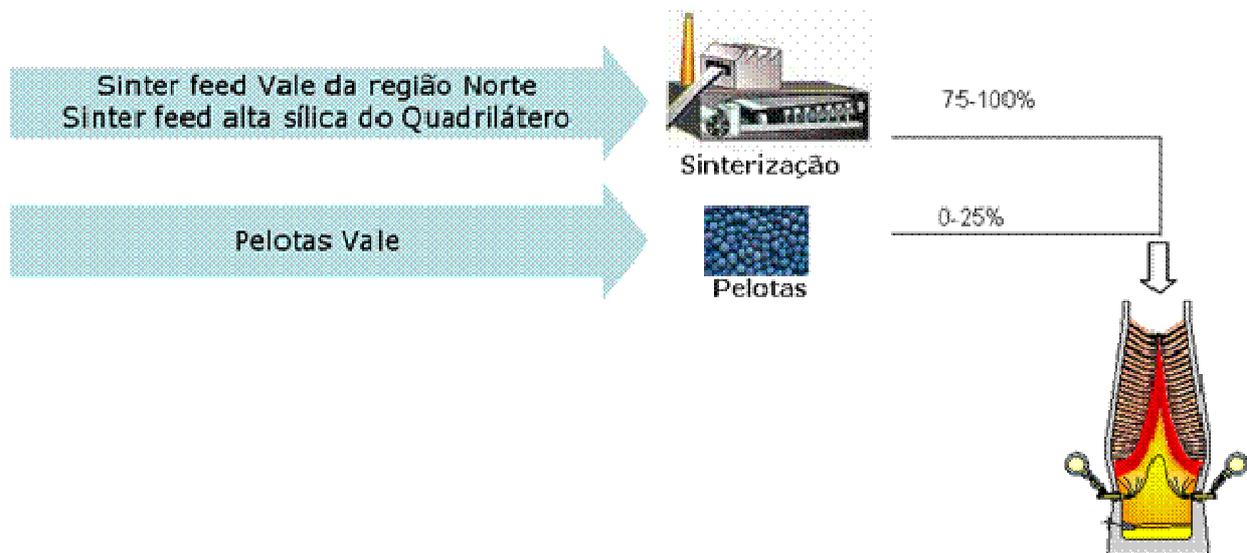


Figura 1. Alternativas de carga metálica para o Alto-Forno.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados das simulações das misturas consideradas mais promissoras para o projeto.

Tabela 3. Resultados das simulações numéricas para uma carga metálica do alto-forno com 100% sinter

		Simulação - Misturas							
		1	2	3	4	5	6	7	
Sinterização	SFS	22	28	27	33	0	33	0	
	SFN	78	72	73	67	100	67	100	
	Cons, específico (kg/t MT)								
	Quartzito	0	0	0	0	32	0	31	
	Calc, calcítico	39	52	74	57	56	88	87	
	Calc, dolomítico	54	60	69	62	63	74	75	
	Química do sinter (%)								
	Fe	61,2	60,2	59,1	59,7	59,5	58,1	57,9	
	SiO ₂	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0	
	MgO	0,95	1,05	1,23	1,09	1,1	1,34	1,35	
Al ₂ O ₃	1,38	1,36	1,36	1,33	1,46	1,34	1,47		
Mn	0,52	0,49	0,49	0,47	0,58	0,46	0,57		
Basicidade binária	1,45	1,48	1,8	1,4	1,4	1,8	1,8		
Escorificáveis	12,1	13,6	15,2	14,4	14,6	16,7	16,8		
Alto-Forno	Carga metálica (%)								
	sinter	100	100	100	100	100	100	100	
	Pelota	0	0	0	0	0	0	0	
	Consumo específico (kg/t gusa)								
	Quartzo	0	3	23	0	0	27	27	
	Coke Rate	333	339	348	341	342	355	356	
	Escória								
	CaO/SiO ₂	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
	SiO ₂ (%)	33,8	34,8	35,7	35,2	34,8	36,3	36	
	Al ₂ O ₃ (%)	16,3	14,5	12,5	13,8	14,4	11,4	11,9	
	MgO (%)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	
	Slag rate (kg/t gusa)	228	258	306	270	273	340	343	
	Gusa (%)								
P	0,074	0,075	0,077	0,075	0,078	0,078	0,081		
Si	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		
Mn	0,63	0,61	0,61	0,58	0,73	0,58	0,73		

Tabela 4. Resultados das simulações numéricas para cargas metálicas do alto-forno com sinter e pelota

		Simulação - Misturas			
		8	9	10	11
Sinterização	SFS	27	0	34	33
	SFN	73	100	66	67
	Cons, específico (kg/t MT)				
	Quartzito	0	31	0	0
	Calc, calcítico	76	90	66	82
	Calc, dolomítico	65	70	73	82
	Química do sinter (%)				
	Fe	59,2	57,9	58,9	58
	SiO ₂	4,5	5,0	5,0	5,0
	MgO	1,18	1,29	1,28	1,45
Al ₂ O ₃	1,36	1,47	1,33	1,34	
Mn	0,49	0,57	0,46	0,46	
Basicidade binária	1,8	1,8	1,54	1,8	
Escorificáveis	15,1	16,8	15,6	16,8	
Alto-Forno	Carga metálica (%)				
	sinter	78	75	80	75
	Pelota	22	25	20	25
	Consumo específico (kg/t gusa)				
	Quartzo	0	0	4	15
	Coke Rate	337	341	338	342
	Escória				
	CaO/SiO ₂	1,21	1,21	1,21	1,21
	SiO ₂ (%)	34,9	35,2	34,8	35,1
	Al ₂ O ₃ (%)	14	13,5	14,5	13,7
	MgO (%)	6,5	6,5	6,5	6,5
	Slag rate (kg/t gusa)	252	270	256	275
	Gusa (%)				
P	0,07	0,072	0,076	0,077	
Si	0,3	0,3	0,3	0,3	
Mn	0,51	0,59	0,59	0,59	

Das 11 condições simuladas, apenas as oito mais promissoras foram avaliadas em sinterização piloto.

Os ensaios foram executados de acordo com os procedimentos padrão do Laboratório de Sinterização Piloto do CTF. Semelhante ao que ocorre na sinterização industrial, o processo em escala piloto compreende quatro etapas: (i) preparação da mistura; (ii) tratamento térmico (ou queima) da mistura; (iii) desagregação do bolo, para a produção do sinter e retorno; (iv) avaliação de qualidade do sinter. As misturas de minérios e qualidades do sinter estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5. Misturas de minérios avaliadas em escala piloto

Minérios	Misturas de minérios avaliadas em sinter pot (% em peso)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
SFN	69	65	64	65	70	74	100	100
SFS	31	35	36	35	30	26	-	-
Carga metálica do alto-forno (%)								
Sínter	78	75	80	100	100	100	100	75
Pelota A	0	25	20	0	0	0	0	25
Pelota B	22	0						

Tabela 6. Composições químicas dos sínteres avaliados

%	Menor volume de escória no sinter				Maior volume de escória no sinter			
	M6	M5	M4	M7	M1	M3	M2	M8
CaO	5,95	6,41	6,82	7,00	8,11	7,95	8,77	9,00
SiO₂	4,00	4,50	5,00	5,00	4,50	5,00	5,00	5,00
Al₂O₃	1,25	1,25	1,25	1,15	1,25	1,25	1,25	1,15
MgO	0,90	1,00	1,00	1,10	1,20	1,30	1,30	1,30
Fe	60,6	59,9	59,5	59,0	58,6	58,5	57,9	57,5
P	0,032	0,032	0,035	0,025	0,036	0,035	0,037	0,026
Mn	0,46	0,44	0,43	0,59	0,44	0,42	0,42	0,58
B₂	1,45	1,45	1,40	1,40	1,80	1,60	1,80	1,80
V esc.	12,0	13,0	13,9	14,3	15,0	15,5	16,0	16,5

2.2 Etapa 2: Otimização das Misturas de Melhor Desempenho

Uma etapa de otimização das misturas de melhor desempenho foi necessária devido aos elevados índices de degradação sob redução (RDI) de alguns sínteres. Dentre as possíveis alternativas tecnológicas com potencial de redução do RDI, foram escolhidas para serem avaliadas nesse estudo:

- i) aumentar o nível de MgO no sinter;
- ii) reduzir a altura da camada a sinterizar;
- iii) aumentar o volume de escorificáveis do sinter.

Nas alternativas (i) e (iii) procurou-se atender as premissas de projeto da qualidade química da escória do forno.

De acordo com Shen et al.⁽¹⁾ a adição de MgO na mistura a sinterizar tende a reduzir o RDI, visto que a maioria das partículas de MgO reage com o óxido de ferro e formam uma solução sólida, e depois se dispersam no sinter. Assim, pode-se deduzir que as partículas de MgO difundidas no óxido de ferro podem evitar a formação de hematita secundária quando o sinter está sendo resfriado, ou seja, evitar a oxidação da magnetita.

Panigrahy et al.⁽²⁾ reportam que a adição de MgO também favorece a formação de silicatos com precipitações de olivinas e ou piroxênios, promovendo um efeito benéfico na resistência desta fase.

De acordo com vários pesquisadores, existe uma correlação positiva entre o volume de escória e a resistência a degradação do sinter.⁽³⁻⁶⁾ O aumento no volume de

escória atua na ligação das partículas de minério de ferro, contribuindo assim, para a resistência do aglomerado.

Outros pesquisadores indicaram a deterioração da resistência do sinter à degradação com a elevação do teor de Al_2O_3 .⁽⁷⁻⁹⁾ Ostwald e Pepper⁽¹⁰⁾ constataram que a alumina apresenta comportamentos distintos no sinter dependendo de sua forma, kaolinita ou gibbsita.

3 RESULTADOS

3.1 Avaliação de Desempenho de Misturas Potenciais

A performance da sinterização e a qualidade do sinter produzido foram avaliadas considerando-se a estabilidade operacional da planta piloto e os parâmetros: produtividade, coke rate, resistência física (índices de abrasão e queda), RDI, Redutibilidade e propriedades em altas temperaturas da carga metálica. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de processo e qualidades físicas e metalúrgicas dos sínteres

PARÂMETROS	CONDIÇÕES							
	M6	M5	M4	M7	M1	M3	M2	M8
Processo								
Produtividade (t/d.m ²)	31,0	28,5	31,1	27,3	30,4	29,8	29,6	26,3
Coke rate (kg/t. sinter)	65,9	65,0	62,3	67,5	62,8	62,3	63,1	68,6
Resistência Física (%)								
TI (+6,30mm)	56,9	59,7	57,0	58,6	64,7	62,8	67,6	67,2
SI (+ 9,52mm)	84,4	84,5	84,3	84,4	85,2	85,1	87,4	90,5
Propriedades Metalúrgicas (%)								
RDI (- 2,83mm)	51,0	46,2	42,6	39,3	45,8	36,1	40,1	34,3
Redutibilidade ISO 7215	67,8	73,1	80,6	72,3	71,2	72,4	67,8	72,8

O estudo indica que as misturas com maior volume de escória e a utilização de *sinter feed* de alta sílica como fonte de SiO_2 (misturas M1, M2 e M3) apresentaram performances de processo e qualidade de sinter superiores às demais. As misturas constituídas apenas com *sinter feed* do Norte e tendo areia como fonte de SiO_2 (misturas M7 e M8) resultaram num maior consumo específico de combustível e menor produtividade do processo de sinterização. A diferença de produtividade em favor das misturas com participações do *sinter feed* de alta sílica é da ordem de 10% a 15% em relação às misturas corrigidas com areia.

No que se refere à resistência mecânica dos sínteres, medidos por índices de tamboramento e queda, os de maior volume de escória, principalmente aqueles das misturas M2 e M8, apresentaram valores mais elevados. É importante destacar que, em escala industrial, podem-se esperar índices de resistência mais elevados, uma vez que os índices encontrados em escala piloto são, em média, inferiores aos verificados industrialmente.

Os sínteres produzidos com elevadas participações de *sinter feed* do Norte na mistura e baixos volumes de compostos escorificáveis (CaO , SiO_2 e MgO), apresentaram mais altos valores de RDI.

Por outro lado, como ponto altamente positivo tem-se os elevados níveis de redução dos sínteres produzidos com altas participações de *sinter feed* do Norte.

3.2 Otimizações das Misturas de Melhor Desempenho

Um estudo de otimização foi realizado com as misturas que apresentaram melhor desempenho na planta piloto de sinterização (misturas M2 e M8) com o objetivo principal de melhorar o RDI do sínter. As variáveis consideradas para a otimização foram os teores de MgO e SiO₂ do sínter e a altura de camada do leito de sinterização. As especificações dos sínteres avaliados nesta fase de otimização estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Especificações químicas dos sínteres otimizados

%	Misturas		
	M2A	M8A	M8B
CaO	8,92	9,00	8,40
SiO ₂	5,00	5,00	5,80
Al ₂ O ₃	1,10	1,15	1,15
MgO	1,80	1,80	1,80
Fe	57,5	57,2	57,0
Mn	0,45	0,60	0,57
B ₂	1,80	1,80	1,45
V esc.	16,8	17,0	17,0

Os resultados obtidos com as ações de otimização estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros de processo e qualidades físicas e metalúrgicas dos sínteres

Parâmetros	Misturas				
	M2A 700mm	M2A 600mm	M8A 700mm	M8A 600mm	M8B 700mm
Processo					
Produtividade (t/dia/m ²)	27,0	29,8	27,9	27,8	26,8
Tempo de sinterização (min)	41,2	32,0	38,8	32,9	40,8
Coke rate (kg/t. sínter)	70,0	70,0	69,6	68,5	71,0
Resistência Física (%)					
Tumbler ISO 3271, T1 (+6,30 mm)	66,3	65,4	66,0	63,2	62,1
Tumbler ISO 3271, A1 (- 0,500 mm)	4,1	6,8	4,1	7,8	8,3
Shatter JIS M8711, (+ 9,52 mm)	85,2	84,3	85,1	83,8	84,3
Prop. Metalúrgicas (%)					
RDI ISO 4696-2 (- 2,83mm)	31,1	32,9	32,3	28,7	25,6
Redutibilidade ISO 7215 – DR	73,5	71,7	71,3	68,3	76,1

A Figura 2 apresenta os valores de desintegração sob redução (RDI) dos sínteres avaliados, antes e após as ações de otimização.

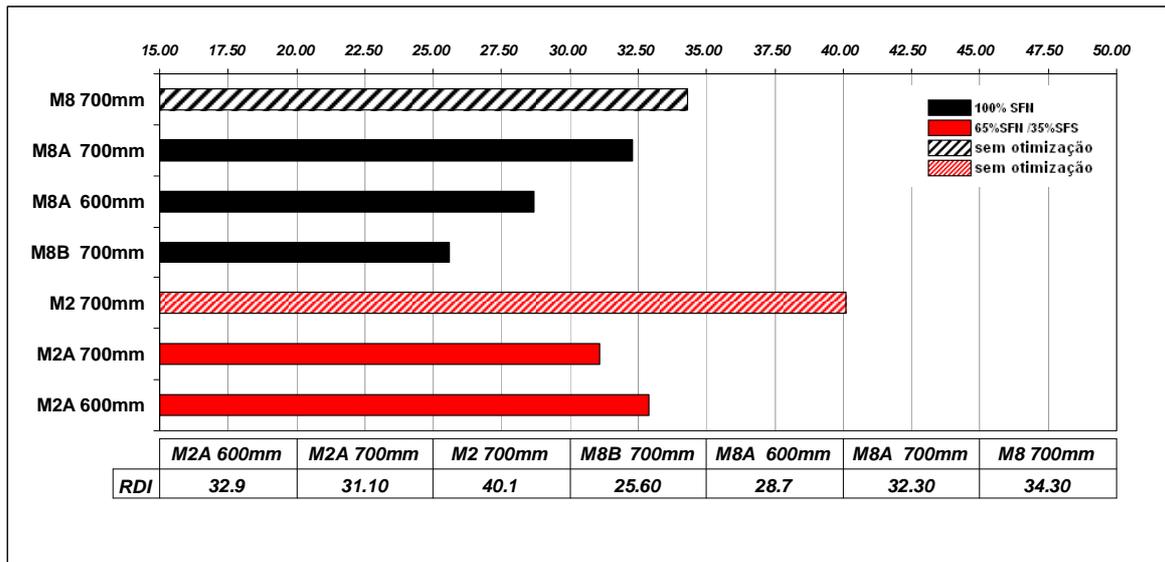


Figura 2. RDI dos sínteres após as ações de otimização.

Observa-se que as ações de melhor resultado na otimização do RDI do sinter foram as elevações nos teores de MgO e SiO₂ do sinter. Em comparação às misturas anteriores (M2 e M8), essas ações refletiram em redução significativa no RDI (aproximadamente 25%). A redução da basicidade binária normalmente está associada a um aumento de RDI no sinter. Porém, devido ao aumento do teor de SiO₂, o volume de escória do sinter manteve-se em patamares elevados (17%) contribuindo para a melhoria do RDI. Informações encontradas na literatura são bastante conflitantes. Kodama e colaboradores⁽³⁾ afirmam não existir correlação entre a basicidade e a intensidade de degradação do sinter. Furai e colaboradores mostraram existir correlação direta,⁽⁵⁾ enquanto outros apresentaram correlações inversas.^(11,12)

A redução da altura da camada de 700 mm para 600 mm não apresentou redução de RDI para a mistura M2. Em se tratando da mistura M8 a redução da camada refletiu em uma queda de RDI de aproximadamente 10%.

4 CONCLUSÕES

É possível produzir sínteres de qualidades químicas, físicas e metalúrgicas adequadas para consumo em grandes altos-fornos a partir de misturas de sinterização com 100% de *sinter feed* do Norte, de alto teor de ferro.

Em função das características intrínsecas deste minério, o sinter produzido apresenta elevadas capacidades de redução (Redutibilidade), mas exige uma composição química adequada para a obtenção de bons níveis de resistência mecânica e desintegração sob redução (RDI).

Teores de SiO₂ e MgO mais elevados garantem um efetivo controle da desintegração sob redução do sinter em níveis adequados.

A elevação do teor de sílica do sinter pode ser feita tanto via o uso de quartzito (areia) quanto pela utilização de um minério de alta sílica (melhor opção técnica).

Agradecimentos

Agradecemos a toda equipe da Gerência de Laboratórios do Centro de Tecnologia de Ferrosos, responsável pela realização dos ensaios laboratoriais deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SHEN, F; JIANG, X; WU, G; WEI, G; LI, X; SHEN, Y.: Proper MgO Addition in Blast Furnace Operation. ISIJ International, v. 46, n.1, p. 65-69, 2006.
- 2 PANIGRAHY, S. C; RIGAUD, M; DILEWIJNS, J. Effects of replacement of limestone by dolomite and other MgO – bearing materials on production rate of iron ore sinter. Iron Steel Int., v.11, n.5, p. 250-251, 1984.
- 3 KODAMA, K. et alii. On degradation of sinter during chemical reduction. Transactions ISIJ, v.6: p. 111-118, 1966.
- 4 OTABE, S. et alii. Stabilization of furnace conditions in high-production blast furnace operations. Suppl. Trans. ISIJ, v.11, p. 163-166, 1971.
- 5 FURUI, T; SAMAMURA, Y. Mechanism of degradation of ore sinter during reduction. Nippon Steel Technical Report Overseas. v.1, p.1-7, 1972.
- 6 TANIGUCHI, R; MITSUOKA, M. Ironmaking Plant Operation at Mizushima Works. Proc. ICSTIS. Suppl. Trans. ISIJ, v. 11, p. 159-163, 1971.
- 7 LU, L; HOLMES, R. J; MANUEL, J. R. Effects of Alumina on Sintering Performance of Hematite Iron Ores. ISIJ International, v. 47, n. 3, pp. 349–358, 2007.
- 8 UMADEVI, T. et alii. Influence of Alumina on Iron Ore Sinter Properties and Productivity in the Conventional and Selective Granulation Sintering Process. steel research international. v. 80, Issue 9, p. 686–692, September, 2009.
- 9 HENG, H.L. Effect of Raw Material Composition on the Sintering Properties. ISIJ Int (Iron Steel Inst Jpn). v.45; n.4; p.551-559, 2005.
- 10 OSTWALD, J; PEPPER, M.D. Effect of distribution of alumina on sinter properties. BHP Technical Bulletin, 26(1), 1982.
- 11 LECOMTE, P; VIDAL, R. The porosity of iron ores and sinters. C.N.R.M, 23: 3-10, jun. 1970.
- 12 DANLOY, G; VIDAL, R. Reduction strength of iron sinters. C.R.M, 48, sept. 1976.