

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE PELLET FEED USANDO MISTURAMENTO INTENSIVO EM SINTERIZAÇÃO PILOTO¹

Thiago Pinto Silva²
Edilson Pinto Honorato³

Resumo

A adição de *pellet feed* nas sinterizações convencionais pode se tornar uma prática comum devido ao aumento do teor de sílica dos *sinter feeds*, sendo necessárias adaptações nas rotas de processo. Com a aquisição do misturador intensivo, a Usiminas adicionou um minério similar ao *pellet feed*, chamado de *pellet coarse* em seu processo industrial. Neste contexto, foi avaliado o efeito da substituição daquele minério por *pellet feed* e similar no processo de sinterização piloto, utilizando o misturador intensivo em ambas as situações. Os resultados indicaram variação na produtividade, no rendimento do sinter e na sua resistência mecânica, conforme apresentado no presente estudo.

Palavras-chave: Sinterização; Misturador intensivo; Concentrado; *Pellet feed*.

EVALUATION CONCENTRATE ADDITION EFFECT USING INTENSIVE MIXING AT PILOT SINTERING

Abstract

The pellet feed addition in conventional sinter plant can become a common practice due to the sinter feed silica content increasing, being necessary adjustments in the process route. The acquisition of intensive mixer allowed Usiminas add a different kind of pellet feed, called pellet coarse in its manufacturing process. In this context, it was evaluated the substitution's effect of pellet coarse by pellet feed and similar in the pilot sintering process, using the intensive mixer in both situations. The results indicated variation in productivity, sinter's yield and its mechanical strength as shown in this paper.

Key words: Sintering; Intensive mixer; Concentrate; Pellet feed.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Seminário 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.

² Engenheiro metalurgista. Pesquisador. Membro da ABM. Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro metalurgista M.Sc. Membro da ABM. Gerente. Gerência de Gestão de Matérias-primas. Usiminas. Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Com a redução dos principais corpos de hematita, os itabiritos ganham espaço nas operações de lavra das mineradoras. Com isso a qualidade química (sílica) do *sinter feed* é afetada drasticamente de maneira negativa. Logo, as siderúrgicas são obrigadas a consumir este minério e absorver as elevações de custo de produção. No caso das mineradoras se torna um caso paradoxal, já que para melhorar a composição química do minério é necessária a redução de sua granulometria, visto que a liberação do quartzo da partícula de hematita no itabirito ocorre numa faixa granulométrica menor que a do *sinter feed*.

A piora da qualidade química dos minérios de ferro pode ser evidenciada por meio da Figura 1 que mostra a evolução do teor de sílica no sinter da Usiminas – Usina de Ipatinga nos últimos anos.

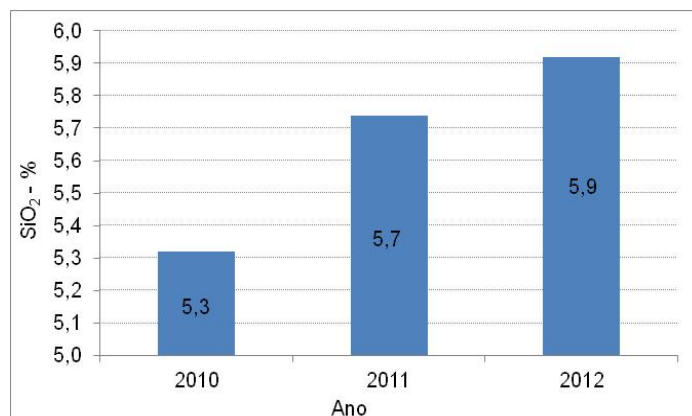


Figura 1. Comportamento da sílica no sinter da Usiminas – Usina de Ipatinga.

Para reduzir o efeito da menor granulometria do minério no sinter foi introduzido o misturador intensivo na Sinterização da Usiminas - Usinas de Ipatinga e Cubatão, visando o uso de *pellet feed*. O misturador intensivo foi implementado em Dezembro de 2011 na Planta de Ipatinga e desde então não foi possível usar *pellet feed* adequado ao processo devido à sua indisponibilidade no mercado e na Mineração da Usiminas (MUSA). Devido a esta condição, tem sido usado o minério de ferro do tipo *pellet coarse*, caracterizado como um produto intermediário entre o *sinter feed* e o *pellet feed*. Na Figura 2 é mostrado o novo *layout* da Planta de Sinterização 1 e 2 da Usiminas – Usina de Ipatinga com a adição do misturador intensivo.

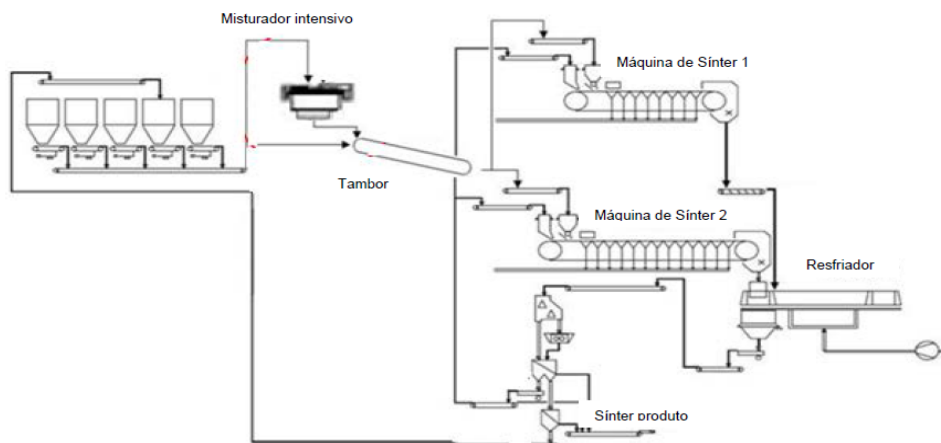


Figura 2. Layout da Sinterização 1 e 2 da Usiminas - Usina de Ipatinga.

Testes de sinterização com diversos tipos de *pellet feed* e similares foram conduzidos em escala piloto no Centro de Tecnologia da Usiminas, visando avaliar o seu comportamento no processo de sinterização, considerando o misturador intensivo.

No presente trabalho são apresentados dois casos. No primeiro caso é mostrado o comportamento de uma mistura com concentrado em relação à mistura com *pellet coarse* (Caso A). No segundo caso é mostrado o comportamento de duas misturas com *pellet feed* em relação à mistura com *pellet coarse* (Caso B). Ambos os casos foram avaliados em escala piloto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Testes na máquina piloto de sinterização da Usiminas foram realizados para avaliar o efeito de mistura com minério ultrafino no processo. As características da panela e do processo são apresentadas na Tabela 1. O processo foi iniciado pela homogeneização da mistura no misturador intensivo, com posterior aglomeração no tambor e, finalmente, carregamento na panela piloto de sinterização. O sínter produzido foi submetido ao impacto por meio de duas quedas de uma altura de 2 m e a abrasão com 5 voltas em um tambor, visando simular a degradação do sínter industrial da Usina de Ipatinga. O sínter degradado foi classificado em peneiras (5 mm e 10 mm), sendo a faixa maior que 5 mm considerada o sínter produto.

Tabela 1. Parâmetros da panela e do processo de sinterização piloto

Parâmetros	Caso A	Caso B
Altura da camada	500 mm	
Diâmetro da panela	300 mm	
Relação ar/COG (<i>Coke Oven Gas</i>)	5,2	
Altura do <i>bedding</i>	30 mm	
Massa do <i>bedding</i>	3 kg	
Tempo de ignição	1 min	
Depressão durante ignição	600 mmH ₂ O	
Depressão durante a queima	1600 mmH ₂ O	1100 mmH ₂ O
Tempo de residência (misturador intensivo)	1,4 min	1,0 min
Rotação do agitador (misturador intensivo)	180 RPM	390 RPM
Diâmetro do agitador (misturador intensivo)	350 mm	350 mm
Velocidade tangencial na ponta do agitador (misturador intensivo)	3,3 m/s	7,2 m/s
Tempo de residência (tambor)	8 min	8 min
Rotação do tambor	14 RPM	14 RPM
Adição da água	100% no misturador intensivo	80% no misturador intensivo e 20% no tambor
Umidade ótima	8,0%*	8,0%, 7,5% e 6,5%**

*(misturas A-I e A-II); **(misturas B-I, B-II e B-III, respectivamente).

Uma mistura com 80 kg de matérias-primas, cuja proporção e tipo são apresentados nas Tabelas 2 e 3, foi utilizada para fabricar os sínteres.

Tabela 2. Caso A. Proporção de matérias-primas

Matérias-primas	Proporção (%)			
	Sínter A-I (referência)		Sínter A-II	
	Minério de ferro	Mistura total	Minério de ferro	Mistura total
<i>Sinter feed A</i>	75	33,59	75	33,02
<i>Pellet coarse</i>	25	11,20	-	-
Concentrado	-	-	25	11,02
Calcário	-	2,37	-	3,20
Dolomita	-	5,00	-	4,98
Cal	-	2,83	-	2,83
Minério de manganês	-	2,37	-	2,31
Pó do alto-forno	-	0,99	-	0,99
Rejeito industrial	-	0,99	-	0,99
Degradado (sínter <5 mm)	-	9,90	-	9,90
Carepa	-	0,71	-	0,71
Pó da sinterização	-	0,85	-	0,85
Coque	-	1,35	-	1,35
Antracito	-	1,35	-	1,35
Retorno (sínter <5 mm)	-	26,50	-	26,50
Total	100	100	100	100

Tabela 3. Caso B. Proporção de matérias-primas

Matérias-primas	Proporção (%)					
	Sínter B-I (referência)		Sínter B-II		Sínter B-III	
	Minério de ferro	Mistura total	Minério de ferro	Mistura total	Minério de ferro	Mistura total
<i>Sinter feed A</i>	25	12,00	25	12,02	25	12,08
<i>Sinter feed B</i>	45	21,59	45	21,64	45	21,74
<i>Sinter feed C</i>	5	2,40	5	2,40	5	2,42
<i>Pellet coarse</i>	25	12,00	-	-	-	-
<i>Pellet feed A</i>	-	-	25	12,02	-	-
<i>Pellet feed B</i>	-	-	-	-	25	12,08
Calcário	-	3,68	-	3,58	-	3,31
Dolomita	-	4,22	-	4,23	-	4,28
Cal	-	1,88	-	1,88	-	1,88
Minério de manganês	-	2,09	-	2,09	-	2,08
Pó do alto-forno	-	1,13	-	1,13	-	1,13
Rejeito industrial	-	0,90	-	0,90	-	0,90
Degradado (sínter <5 mm)	-	9,04	-	9,04	-	9,04
Carepa	-	1,36	-	1,36	-	1,36
Pó da sinterização	-	3,01	-	3,01	-	3,01
Coque	-	1,35	-	1,35	-	1,35
Antracito	-	1,35	-	1,35	-	1,35
Retorno (sínter <5 mm)	-	22,00	-	22,00	-	22,00
Total	100	100	100	100	100	100

No Caso A, o primeiro sínter (considerado como referência - Sínter A-I) foi fabricado com mistura contendo *pellet coarse* e o segundo sínter (Sínter A-II) com a mistura

contendo concentrado. Neste sinter referência foi adicionado 2,7% de combustível da mistura parcial para atingir o rendimento de 73,5% (26,5% de retorno), sendo este valor de combustível mantido para o Sinter A-II.

No Caso B, o primeiro sinter (considerado como referência - Sinter B-I) foi fabricado com mistura contendo *pellet coarse* e o segundo e terceiro sínteres (Sinter B-II e B-III) foram fabricados com substituição do *pellet coarse* pelo *pellet feed*. Neste sinter referência foi adicionado 2,7% de combustível da mistura parcial para atingir o rendimento de 78% (22% de retorno), sendo este valor de combustível mantido para os Sínteres B-II e B-III.

Para auxílio no entendimento, na Tabela 4 são apresentadas as diferenças entre as cargas de minérios.

Tabela 4. Diferenças entre as cargas de minérios

Caso	Sínter	Carga de minérios
A	A-I (referência)	PC + SF A
	A-II	Concentrado + SF A
B	B-I (referência)	PC + SF A + SF B + SF C
	B-II	PF A + SF A + SF B + SF C
	B-III	PF B + SF A + SF B + SF C

As composições granulométricas e químicas dos *sinter feeds* A, B e C, *pellet feeds* A e B e do concentrado são apresentadas nas Tabelas 5 a 7. O peneiramento foi realizado a seco. As técnicas para análise química foram via úmida (Fe_T e FeO), espectrometria de fluorescência de raio-x (SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, MnO, TiO₂, CaO e MgO) e gravimetria por calcinação (PPC - Perda Por Calcinação).

Tabela 5. Distribuição granulométrica dos minérios de ferro

Faixa (mm)	<i>Sinter feed A</i>		<i>Sinter feed B</i>		<i>Sinter feed C</i>	
	Retido (%)					
	Simples	Acumulado	Simples	Acumulado	Simples	Acumulado
>6,35	5,16	5,16	12,61	12,61	6,06	6,06
3,36	16,60	21,76	9,15	21,76	9,44	15,50
1,00	26,37	48,13	32,66	54,42	26,36	41,86
0,710	6,57	54,70	4,60	59,02	18,84	60,70
0,500	5,67	60,37	3,15	62,17	14,57	75,27
0,300	9,78	70,15	5,55	67,72	13,61	88,88
0,250	7,18	77,33	3,42	71,14	4,74	93,62
0,150	12,42	89,75	6,58	77,72	2,93	96,55
0,104	2,54	92,29	4,14	81,86	1,19	97,74
0,074	3,01	95,30	8,03	89,89	0,79	98,53
<0,074	4,70	100	10,11	100	1,47	100
>1	48,13	-	54,42	-	41,86	-
1~0,105	44,16	-	27,44	-	55,88	-
<0,105	7,71	-	18,14	-	2,26	-

Tabela 6. Distribuição granulométrica dos minérios de ferro

Faixa (mm)	<i>Pellet feed A</i>		<i>Pellet feed B</i>		<i>Pellet coarse</i>		Concentrado	
	Retido (%)							
	Simples	Acumulado	Simples	Acumulado	Simples	Acumulado	Simples	Acumulado
>6,35	0	0	0	0	0	0	2,38	2,38
3,36	0	0	0	0	0	0	8,61	10,99
1,00	0	0	0	0	0,22	0,22	10,99	21,98
0,710	0	0	0	0	0,76	0,98	1,53	23,51
0,500	0	0	0	0	0,91	1,89	1,35	24,86
0,300	0,19	0,19	0	0	3,36	5,25	2,21	27,07
0,250	0,14	0,33	0	0	2,51	7,76	1,33	28,40
0,150	0,61	0,94	0,06	0,06	12,42	20,18	2,95	31,35
0,104	0,74	1,68	0,52	0,58	18,75	38,93	3,85	35,20
0,074	2,14	3,82	8,53	9,11	15,63	54,56	6,52	41,72
0,045	43,51	47,33	51,37	60,48	29,02	83,58	17,54	59,26
< 0,045	52,67	100	39,52	100	16,42	100	40,74	100
>1	0	-	0	-	0,22	-	21,98	-
1~0,105	1,68	-	0,58	-	38,71	-	13,22	-
<0,105	98,32	-	99,42	-	61,07	-	64,80	-

Tabela 7. Composição química dos minérios de ferro

Tipo	% em peso						
	Fe _T	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	PPC	CaO	MgO
<i>Sinter feed A</i>	63,4	0,8	5,37	1,70	2,12	0,04	0,06
<i>Sinter feed B</i>	65,4	0,5	4,28	1,14	1,71	0,26	0,05
<i>Sinter feed C</i>	66,0	0,6	2,33	0,93	1,50	0,09	0,10
<i>Pellet feed A</i>	67,1	2,0	2,59	0,32	0,51	0,02	0,05
<i>Pellet feed B</i>	67,9	0,0	1,94	0,40	0,49	0,01	0,01
<i>Pellet coarse</i>	67,0	0,9	2,66	0,58	0,57	0,01	0,01
<i>Concentrado</i>	65,2	0,7	4,15	0,92	1,55	0,01	0,01

O comportamento das misturas na aglomeração a frio foi avaliado por meio da distribuição granulométrica dos agregados. Coletou-se amostra com 1 kg de mistura antes do carregamento na peneira de sinterização. Após quarteamento, 500 g desta amostra foram levados à estufa com temperatura em 80°C para atingir a umidade de 3%. Esta mistura foi classificada em peneiras com malhas de 4,76 mm, 2,83 mm, 1,00 mm, 0,50 mm e 0,25 mm, originando a distribuição granulométrica dos agregados. Estas faixas foram desagregadas com água e secas em estufa a 105 °C durante 60 min. Com as amostras secas, procedeu-se à classificação das partículas não aglomeradas, originando a distribuição granulométrica das partículas primárias. Procedeu-se da mesma maneira com a outra parte da amostra quarteada, até a classificação dos agregados. O ensaio foi realizado em duplicata. A partir dessa etapa a fração > 4,76 mm foi preparada para análise ao microscópio óptico.

A resistência mecânica do sinter foi avaliada por meio do teste de queda (*Shatter Test*), conforme JIS M 8711.⁽¹⁾

Realizou-se a porosimetria de mercúrio para quantificar a distribuição do tamanho dos poros. Este ensaio mede os poros abertos situados na faixa entre 0,015 µm a 360 µm. A faixa granulométrica do sinter utilizada para a medição de porosidade foi 10 mm a 12 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são mostrados os resultados do *pot test* e da resistência mecânica do sinter para o Caso A. A produtividade e a velocidade da frente de queima (FFS – *Flame Front Speed*) foram elevadas significativamente pela adição do concentrado. O rendimento (sinter produto / (sinter produto + retorno)) e a resistência mecânica (*shatter index*) apresentaram redução com a adição do concentrado, sendo mais significativa para o rendimento.

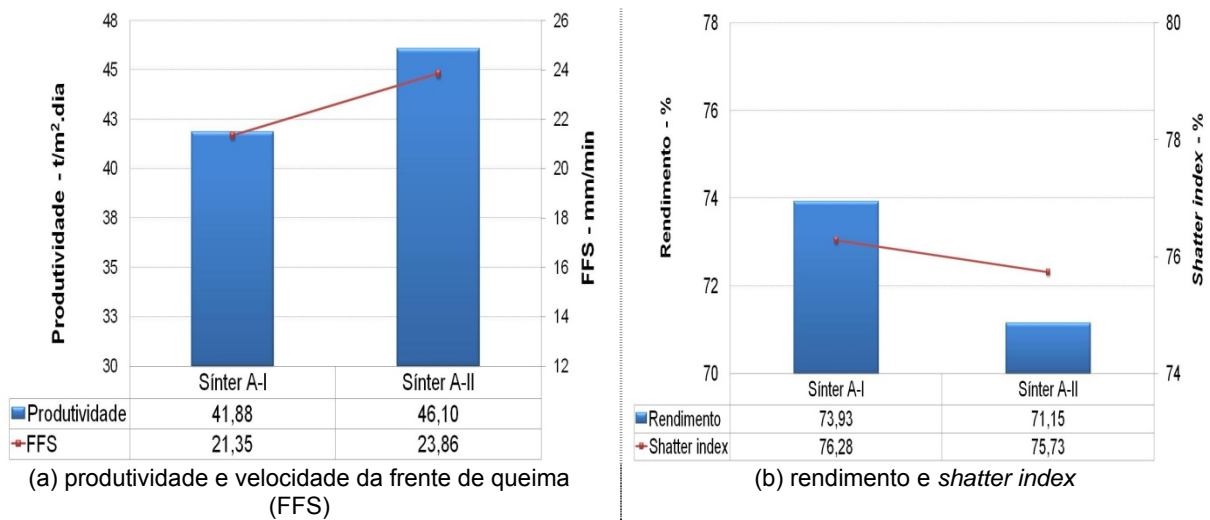


Figura 3. Resultados do teste piloto para o Caso A.

De maneira similar, na Figura 4 são mostrados os resultados do *pot test* e da resistência mecânica do sinter para o Caso B. A produtividade e a velocidade da frente de queima (FFS – *Flame Front Speed*) foram elevadas sensivelmente pela adição do *pellet feed* A e B em comparação ao sinter referência. Todavia, o seu rendimento e a sua resistência mecânica (*shatter index*) apresentaram ligeira redução.

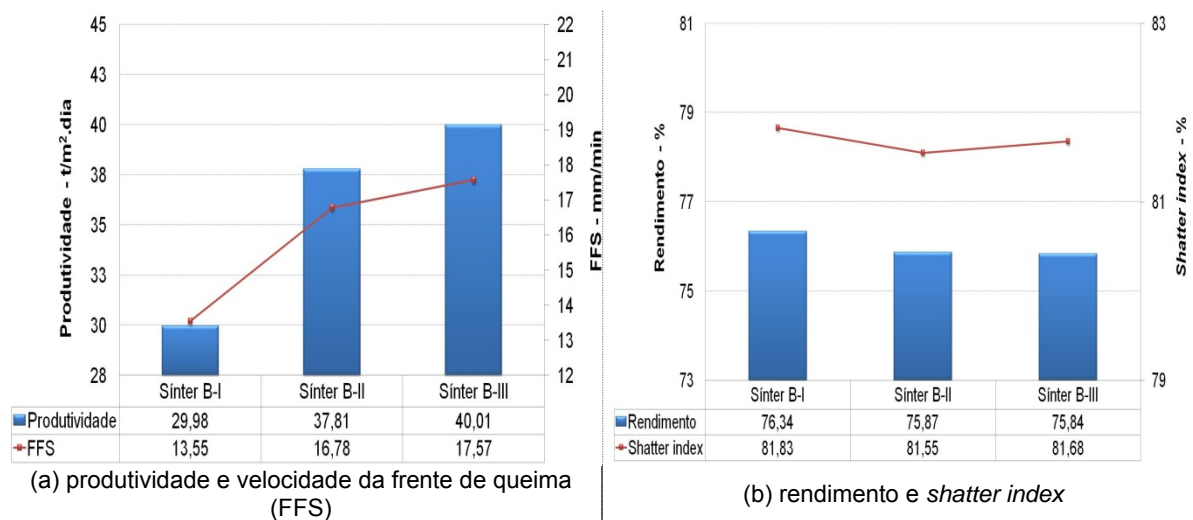


Figura 4. Resultados do teste piloto para o Caso B.

As distribuições granulométricas dos agregados (A) e das partículas primárias (PP) são apresentadas nas Figuras 5 e 6 para os Casos A e B respectivamente.

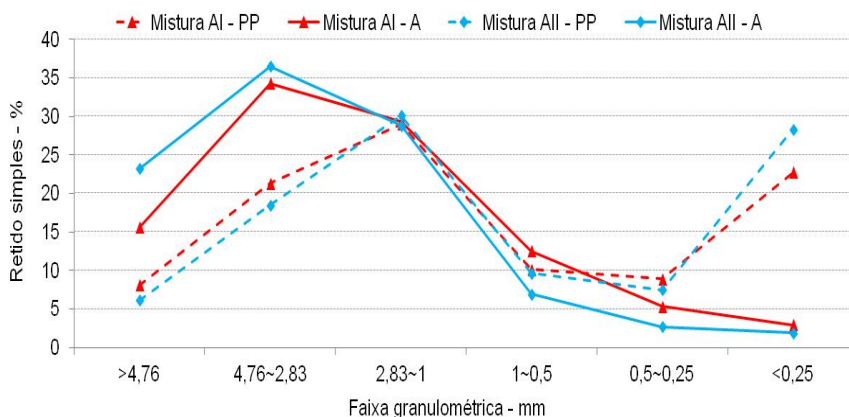


Figura 5. Caso A. Distribuição granulométrica dos agregados (A) e partículas primárias (PP).

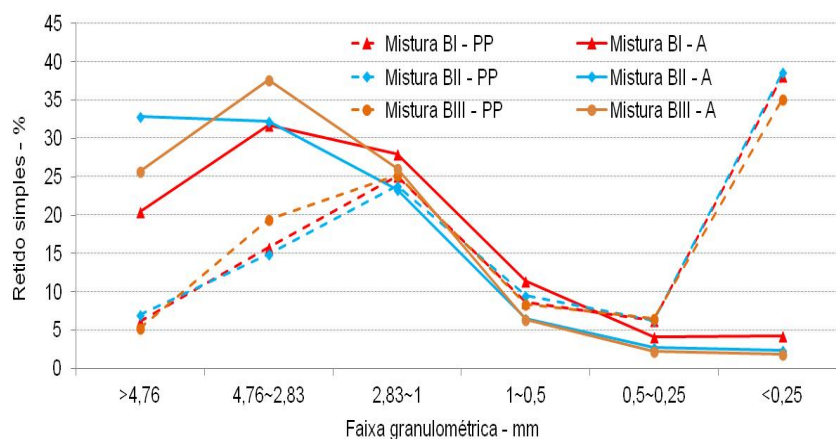


Figura 6. Caso B. Distribuição granulométrica dos agregados (A) e partículas primárias (PP).

É possível notar a melhor aglomeração da mistura A-II (Figura 5) e das misturas B-II e B-III (Figura 6), devido a maior proporção de agregado maior que 1 mm. A composição química dos sinteres é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Composição química dos sinteres, % em peso

Caso	Sínter	Fe _T	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	IB*
A	A-I	57,4	4,4	10,0	5,8	1,6	1,2	1,7
	A-II	56,0	5,1	10,7	6,1	1,7	1,6	1,7
B	B-I	58,1	4,1	9,5	5,0	1,5	1,3	1,9
	B-II	58,0	5,1	9,4	5,0	1,5	1,2	1,9
	B-III	58,4	3,9	9,1	4,9	1,5	1,3	1,9

*IB: índice de basicidade (CaO/SiO₂)

Em termos de porosimetria, para o Caso A, o Sínter A-I apresentou menor porosidade (9,9%) que o Sínter A-II (11,8%). Ao se analisar a distribuição dos poros (Figura 7), nota-se que parte deles se concentra entre 0,01 µm e 8 µm, e outra de 8 µm a 360 µm. Na primeira faixa de tamanho de poros o resultado é similar para os dois sinteres, porém na segunda o Sínter A-II apresentou maior volume de poros em comparação ao Sínter A-I. Para o Caso B, os Sinteres B-I, B-II e B-III apresentaram 8,6%, 12,1% e 10,9% de poros, respectivamente. Também foi observado que os poros são distribuídos nas duas faixas granulométricas citadas anteriormente (Figura 8). No entanto, os três sinteres apresentaram resultado diferente para a primeira faixa, mas similar para a segunda.

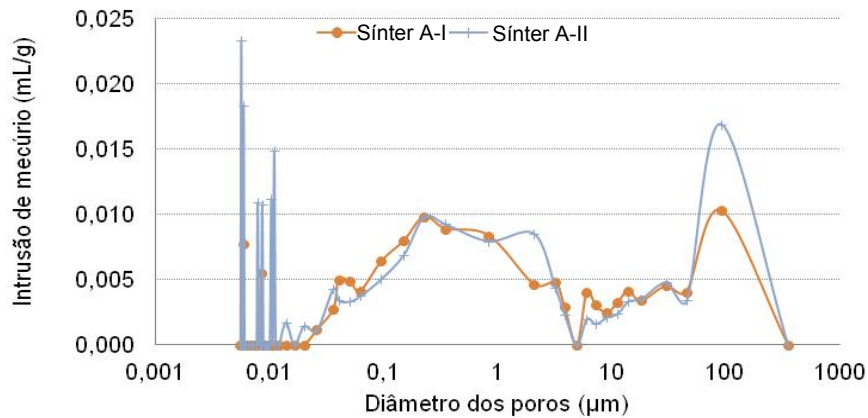


Figura 7. Caso A. Distribuição dos poros.

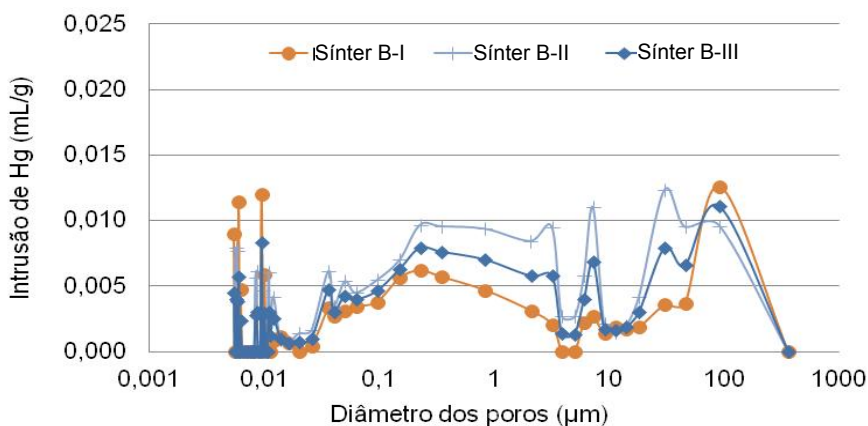


Figura 8. Caso B. Distribuição dos poros.

A substituição do *pellet coarse* por *pellet feed* mostrou, para os dois casos analisados em escala piloto, sensível elevação da produtividade.

Ao analisar as distribuições granulométricas das cargas metálicas (misturas de minérios de ferro) utilizadas (Figura 9), verifica-se que em ambos houve significativo aumento da fração ultra fina (menor que 50 µm) a partir da redução da faixa de 200 µm a 50 µm.

Vale ressaltar que no Caso A, parte do efeito positivo na produtividade se deve à participação de partículas na fração maior que 1 mm do concentrado.

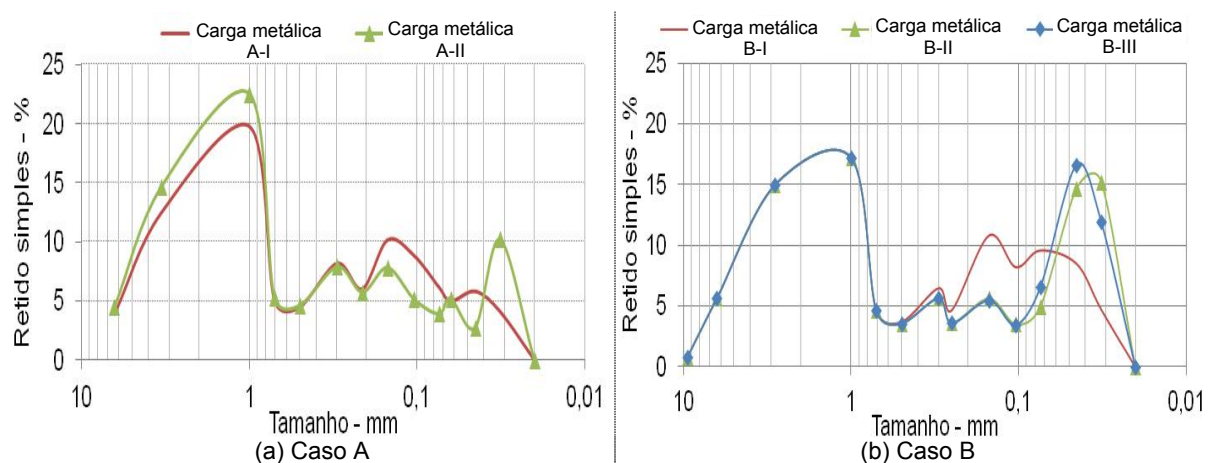


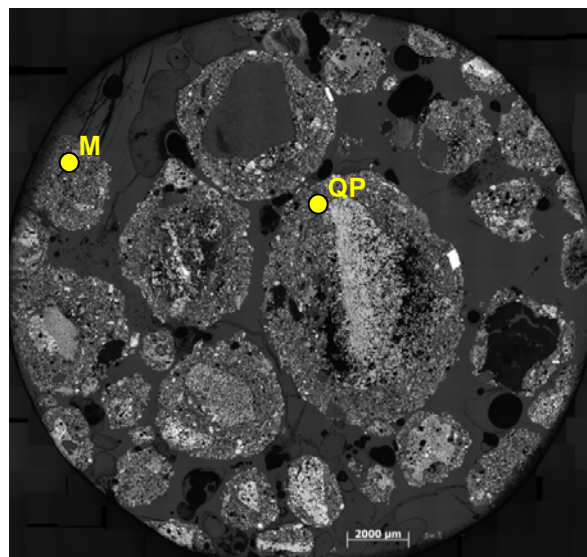
Figura 9. Distribuição granulométrica das misturas de minério de ferro.

A presença de partícula considerada ultrafina favoreceu ao aumento da participação de agregado maior que 1 mm na mistura, estreitando sua distribuição granulométrica em relação àquela com o *pellet coarse*, o que pode ser atribuído ao aumento da superfície específica, associado ao efeito do misturamento intensivo. Com isso, a permeabilidade no leito de sinterização foi elevada, sendo evidenciada pelos maiores valores da velocidade de frente de queima. Por outro lado, a substituição do *pellet coarse* por *pellet feed* mostrou ligeira redução da resistência mecânica e do rendimento do sínter.

Ao analisar a porosidade dos sínteres, verifica-se que aqueles com *pellet feed* e similar apresentaram maior quantidade de poros que o sínter com *pellet coarse*, corroborando para a redução de rendimento e resistência mecânica. Entretanto, outro fator que pode estar associado a esta redução é a matriz de escória.

O uso do *pellet feed* associado ao misturador intensivo permitiu a fabricação de quase partículas com maiores diâmetros e micropelotas, conforme mostrado na Figura 10.

Ao considerar que os agregados produzidos com *pellet feed* foram maiores que aqueles com *pellet coarse* (Figuras 5 e 6), pode-se inferir que a composição química da matriz de escória no sínter foi alterada em relação à referência de ambos os casos. A concentração de sílica na camada aderente foi reduzida por meio do seu deslocamento da camada aderente para o centro da quase partícula, ou seja, partículas nucleantes foram formadas por hematita com quartzo e partículas aderentes com maior teor de hematita e menor teor de quartzo.



M: micropelota; e, QP: quase partícula

Figura 10. Fotomicrografia de agregados com *pellet feed*.

De acordo com Azevedo et al.⁽²⁾ o rendimento e a resistência mecânica podem ser elevados com o aumento de CaO e SiO₂, ou seja, do volume de escória na região de partículas aderentes do sínter. Sendo assim, a dissolução da sílica que está presente na hematita primária do sínter na matriz de escória é uma alternativa para a recuperação do seu rendimento e resistência. Para tal, o aumento do aporte térmico é um meio, contudo as propriedades metalúrgicas do sínter podem ser alteradas.

Neste contexto, pode-se afirmar que o uso de minério de ferro fino, *pellet feed*, na sinterização será uma vertente nos próximos anos para as siderúrgicas brasileiras. No caso da Usiminas já é uma realidade o uso de *pellet coarse*, devido a

indisponibilidade atual de *pellet feed* no mercado. Contudo, é sabido que a sinterização convencional ainda não está adaptada para o uso deste minério, exigindo a busca por inovações tecnológicas, (por exemplo, misturador intensivo, HPS - *Hybrid Pelletized Sinter*, conjunto de misturadores) além de uma adequação do processo de manuseio da mineração até as sinterizações e dentro delas, estocagem e dos parâmetros de controle.

4 CONCLUSÃO

Dois casos foram apresentados para avaliar o efeito da substituição do *pellet coarse* por *pellet feed* e similar no processo de sinterização em escala piloto.

Em termos de processo de sinterização, a substituição elevou consideravelmente a produtividade, por outro lado houve redução do rendimento de sinter e da resistência mecânica. Condição comum para sinterizações que buscam melhores produtividades.

O uso de minério de ferro fino, *pellet feed*, na sinterização será uma vertente nos próximos anos para as siderúrgicas mundiais, exigindo alterações dos parâmetros de processo e inovação tecnológica para recuperar ou minimizar perda produtiva na sinterização.

A combinação do misturamento intensivo com adição de *pellet feed* na sinterização indica ser uma das formas para se evitar perda de produtividade e elevação de *slag rate* nos altos-fornos, entretanto a resistência mecânica do sinter deverá ser menor que o sinter produzido na forma convencional, exigindo esforços de pesquisa e desenvolvimento para melhoria do processo. Além disso, adequações dos sistemas de manuseio para movimentar o *pellet feed* desde a mina até as sinterizações serão necessárias.

REFERÊNCIA

- 1 JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. *Test Method for Determination of Shatter Strength of Iron Ore Sinter* - JIS M 8711. Tokyo, Japão, 1987. 4 p.
- 2 AZEVEDO, R. N.; ARAÚJO, H. G. V.; GONDIM, E. P. e DUARTE, M. R. Correlação entre Volume de Escória e Parâmetros de Qualidade do Sinter Produto. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.1, n. 4. P. 56-61, abril-junho, 2005.