

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ROTAS EM AGLOMERAÇÃO A FRIO PARA A SINTERIZAÇÃO*

Gerson Evaristo de Paula Júnior¹
Beatriz Fausta Gandra²
Daniel Andrade Paes de Lima³

Resumo

A redução gradativa da granulometria dos minérios do tipo *sinter feed* tem sido um fator complicador para a manutenção da produtividade das sinterizações. Além disso, uma das formas de correção química desse tipo de minério é a adição de *pellet feeds*, que têm como característica uma granulometria ainda mais fina. Dessa forma, a competitividade da área de redução passa por uma efetiva etapa de aglomeração a frio na sinterização. Sendo assim, no presente trabalho, foram avaliadas, em escala piloto, quatro diferentes rotas tecnológicas para aglomeração a frio de mistura com *sinter feeds* (tambor, misturador intensivo + tambor, duplo tambor e HPS - *Hybrid Pelletized Sinter*) e seus impactos nos indicadores da sinterização piloto e na qualidade do sínter obtido. Verificou-se que os melhores resultados em índice de granulação e, conseqüentemente, de produtividade foram obtidos na rota com utilização do processo HPS. Entretanto, o sínter oriundo desse processo foi o mais frágil dentre os analisados. O desempenho do processo duplo tambor foi superior ao misturador intensivo, do ponto de vista da produtividade e da qualidade do sínter.

Palavras-chave: Sinterização; Aglomeração a frio; Produtividade.

EVALUATION OF DIFFERENT ROUTES IN COLD AGGLOMERATION FOR SINTERIZATION

Abstract

The gradual reduction of the sinter feed size has been a complicating factor in the maintenance of sintering productivity. In addition, pellet feeds have been used for chemical correction. Because of this, it is necessary an effective cold agglomeration step in sintering to keep the ironmaking competitiveness. Thus, in the present paper, four different technological routes for cold agglomeration with sinter feeds (drum mixer, intensive mixer + drum, double drum and HPS - Hybrid Pelletized Sinter) were evaluated in pilot scale and their impacts on the indicators of the sintering and the sinter quality was obtained. It was found that the best results on granulation index and, consequently, productivity were obtained in the route using HPS. However, the sinter from this process was the most fragile among the analyzed ones. The performance of the double drum process was superior to the intensive mixer from the point of view of productivity and sinter quality.

Keywords: Sintering; Cold Agglomeration; Productivity.

¹ Engenheiro Mecânico, Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

² Membro da ABM; Engenheira Metalurgista, M. Sc., Pesquisadora, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A maximização de sinter na carga dos altos-fornos tem se mostrado a maneira mais viável, economicamente, para a produção de gusa. Esse fato tem levado as siderúrgicas a desenvolverem projetos que visam o aumento de produção das sinterizações.

Ademais, a escassez de minérios de alta qualidade para sinterização tem provocado o uso de materiais mais finos (*pellet feed*) no processo, que contribuem para melhor qualidade química do sinter, contudo, prejudicam a produtividade das máquinas de sinterização. Sendo necessário, portanto, investimentos em equipamentos que favoreçam a aglomeração a frio desses materiais.

Nesse contexto, foram avaliadas rotas em aglomeração a frio no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CP&D) da Usiminas para determinar a produtividade da Máquina Piloto de Sinterização (MPS), visando dar suporte a investimentos na empresa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As rotas de aglomeração a frio para sinterização, testadas em escala piloto, foram: (i) tambor, condição atual da Máquina de Sinterização 3 da Usiminas, (ii) intensivo + tambor, atualmente utilizada nas Máquinas 1 e 2, (iii) duplo tambor e (iv) HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*). Para avaliação da aglomeração a frio foi realizado o teste de GI (*Granulation Index*). Além disso, foram avaliados os parâmetros de sinterabilidade, bem como a qualidade física, mineralógica e metalúrgica dos sínteres.

2.1 Carga da sinterização piloto

A composição química e a distribuição granulométrica das matérias-primas usadas na fabricação dos sínteres são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Composição química das matérias-primas

Matéria-prima	Composição Química (%)							
	Fet	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	CaO	MgO	PPC
<i>Sinter Feed A</i>	62,35	5,37	1,57	0,20	0,15	0,03	0,06	3,80
<i>Sinter Feed B</i>	62,20	5,97	1,46	0,27	0,14	0,17	0,10	3,01
<i>Sinter Feed C</i>	61,40	7,60	1,73	0,10	0,13	0,02	0,06	3,02
<i>Sinter Feed D</i>	66,00	3,84	1,67	0,01	0,06	0,02	0,03	0,86
<i>Sinter Feed E</i>	66,20	3,52	1,24	0,32	0,12	0,05	0,23	0,32
Calcário	0,33	1,66	0,21	0,02	0,14	53,70	1,05	42,70
Magnesita	1,46	1,40	0,34	0,64	0,01	1,78	46,11	50,05
Cal virgem	0,27	0,05	0,26	0,02	0,18	90,82	0,30	7,68
Coque	0,70	1,50	0,01	0,01	0,03	0,29	0,10	89,60
Antracito	0,90	6,23	0,01	0,03	0,04	0,76	0,19	83,20

Tabela 2. Distribuição granulométrica das matérias-primas

Matéria-prima	+6,3 mm (%)	+1,0 mm (%)	-0,11 mm (%)
<i>Sinter Feed A</i>	10,14	42,80	18,29
<i>Sinter Feed B</i>	16,53	55,97	19,08
<i>Sinter Feed C</i>	10,10	44,02	27,25
<i>Sinter Feed D</i>	2,35	66,12	3,06
<i>Sinter Feed E</i>	3,47	28,18	2,33
Calcário	3,07	62,49	16,70
Magnesita	5,39	55,22	9,85
Cal virgem	0,0	3,03	71,26
Coque	0,2	31,6	7,4
Antracito	0,0	46,0	6,9

2.2 Parâmetros de aglomeração a frio

As rotas em aglomeração a frio simuladas em escala piloto são descritas na Figura 1, bem como as principais condições de operação dos equipamentos. Ressalta-se que nos testes utilizando o HPS, toda adição de combustível foi realizada no *coating mixer* (tambor para adição de combustível após o processamento nos discos).

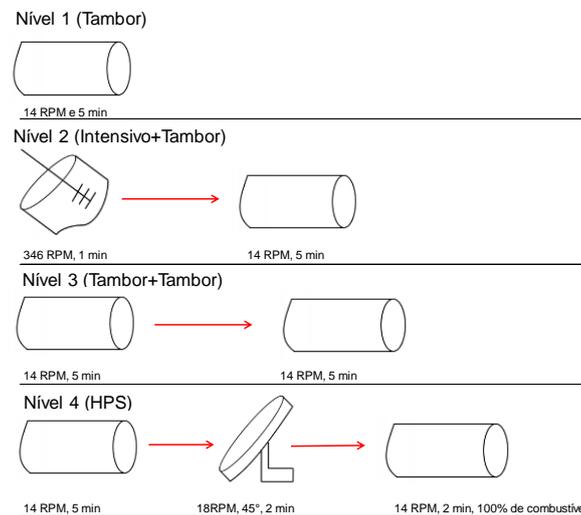


Figura 1. Rotas simuladas para a aglomeração a frio.

2.3 Testes de granulação

Após a etapa de aglomeração a frio, foram coletadas amostras das misturas para realização dos testes de GI e para embutimento para análise de microscopia óptica. No ensaio de GI determina-se o percentual da mistura menor que 0,25 mm e 0,50 mm que ficaram aderidas aos agregados. Além disso, é possível avaliar a constituição granulométrica dos agregados formados.

Os índices de granulação $GI_{-0,25}$ e $GI_{-0,5}$ são calculados a partir das fórmulas mostradas nas Equações (1) e (2), respectivamente.

$$GI_{-0,25} = \frac{b}{a+b} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

'a' é a fração granulométrica menor que 0,25 mm não aderida aos agregados, em massa (g);

'b' é a fração granulométrica menor que 0,25 mm aderida aos agregados, em massa (g).

$$GI_{-0,5} = \frac{c-e}{c} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

'c' é a fração granulométrica menor que 0,5 mm das partículas primárias (partículas da mistura retidas nas faixas do peneiramento), em %;

'e' é a fração granulométrica menor que 0,5 mm dos agregados, em %.

2.4 Ensaios na sinterização piloto

Os principais equipamentos utilizados para os testes e suas principais características são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Características dos equipamentos piloto

Equipamento	Parâmetro ou característica	Valor
 Tambor	Tempo de residência	5 min
	Rotação	14 RPM
 Disco-Pelotizador	Tempo de residência	2 min
	Rotação	18 RPM
	Inclinação	45°
 Misturador intensivo	Tempo de residência	1 min
	Rotação do elemento misturador	346 RPM
	Velocidade do elemento misturador	7,1 m/s
	Diâmetro do elemento misturador	350 mm
	Capacidade	120 kg
	Volume	75 l
	Rotação da cuba	25 RPM
 Máquina Piloto de Sinterização (MPS)	Altura da camada	520 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
	Depressão durante o resfriamento	900 mmH ₂ O

Nos testes de simulação piloto, primeiramente balanceou-se o retorno por meio da alteração da proporção do combustível fixando o *input* de retorno em 22%, sendo assim, para validação dos testes a relação de retorno carregado e gerado foi controlada na faixa de $1,00 \pm 0,05$. Em seguida, foi avaliado o efeito da umidade na produtividade (umidade ótima). Ressalta-se que a determinação da umidade ótima foi adotada somente na mistura referência e esse valor foi reproduzido nas demais.

2.5 Avaliação mecânica, metalúrgica e mineralógica dos sinteres

Os testes de resistência mecânica (*shatter test*) e metalúrgicos (degradação sob redução - RDI e Redutibilidade - RI) obedeceram às normas JIS e ISO, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Normas dos testes mecânico e metalúrgicos aplicados aos sinteres

Teste	Norma
<i>Shatter</i>	JIS M8711 [1]
RDI	ISO 4696-1 [2]
RI	ISO 7215 [3]

A mineralogia quantitativa foi determinada com a amostra global do sinter, britada em granulometria menor que 1,0 mm. Foi utilizado o microscópio óptico de luz refletida, com analisador de imagens e *softwares* de tratamento. A constituição mineralógica foi realizada de acordo com procedimentos internos do CP&D.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Índice de granulação

Os resultados dos ensaios de GI das misturas são apresentados na Figura 2. Destaca-se que a rota utilizando o HPS apresentou melhor índice de granulação. Além disso, todas as rotas proporcionaram bom crescimento dos agregados, exceto a do tambor misturador.

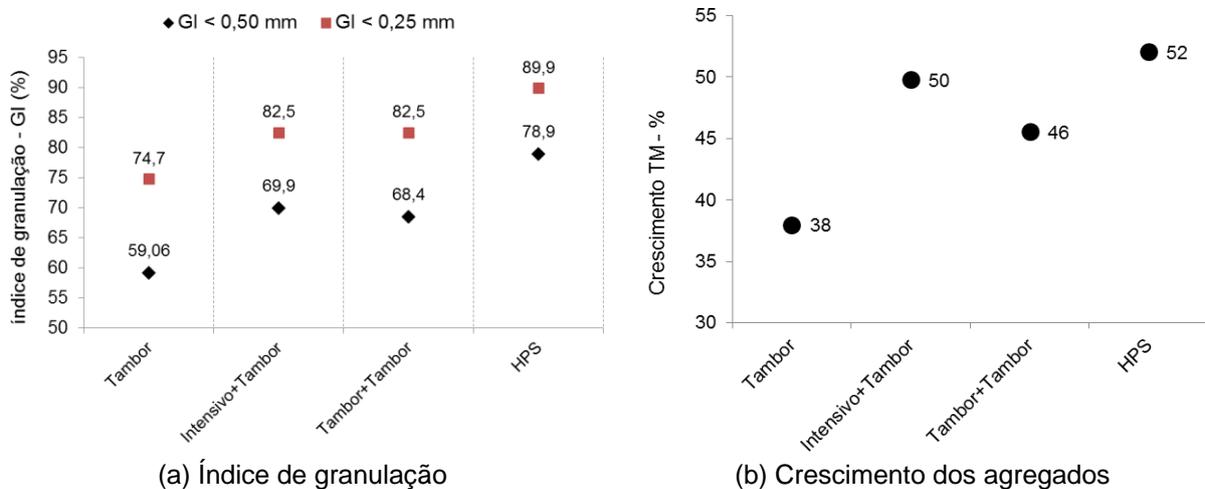


Figura 2. Resultados dos ensaios de granulação das misturas.

Observa-se, Figura 3 (a), que a proporção da fração menor que 0,25 mm das partículas primárias foi de aproximadamente 30% e que na distribuição dos aglomerados, Figura 3 (b), a adição de equipamentos para aglomeração a frio reduziu a presença de partículas não aglomeradas na mistura. Destaca-se o resultado do HPS que apresentou apenas 2,97% de partículas aderentes (<0,25 mm) não agregadas. Além disso, essa rota proporcionou a maior quantidade de aglomerados maiores que 2,8 mm, fato que justifica o maior tamanho médio e por consequência o maior índice de crescimento dos agregados.

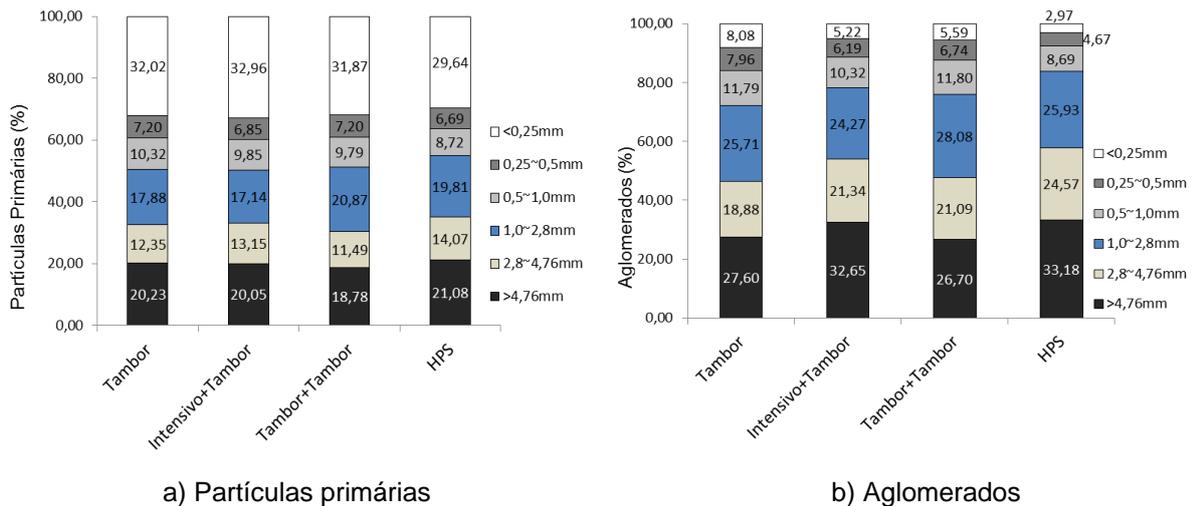


Figura 3. Distribuição das partículas primárias e dos aglomerados.

Pelas fotomicrografias das amostras de aglomerados, Figura 4, vale destacar a presença de combustível na interface das frações nucleantes da rota utilizando o HPS, fato propiciado pela utilização do *coating mixer*. Contudo, para melhores resultados no HPS o tamanho desejável do combustível deve ser abaixo de 1,0 mm devido ao combustível grosso apresentar baixa adesão na etapa de recobrimento e conseqüentemente segregação na etapa de carregamento da máquina de síter [4].

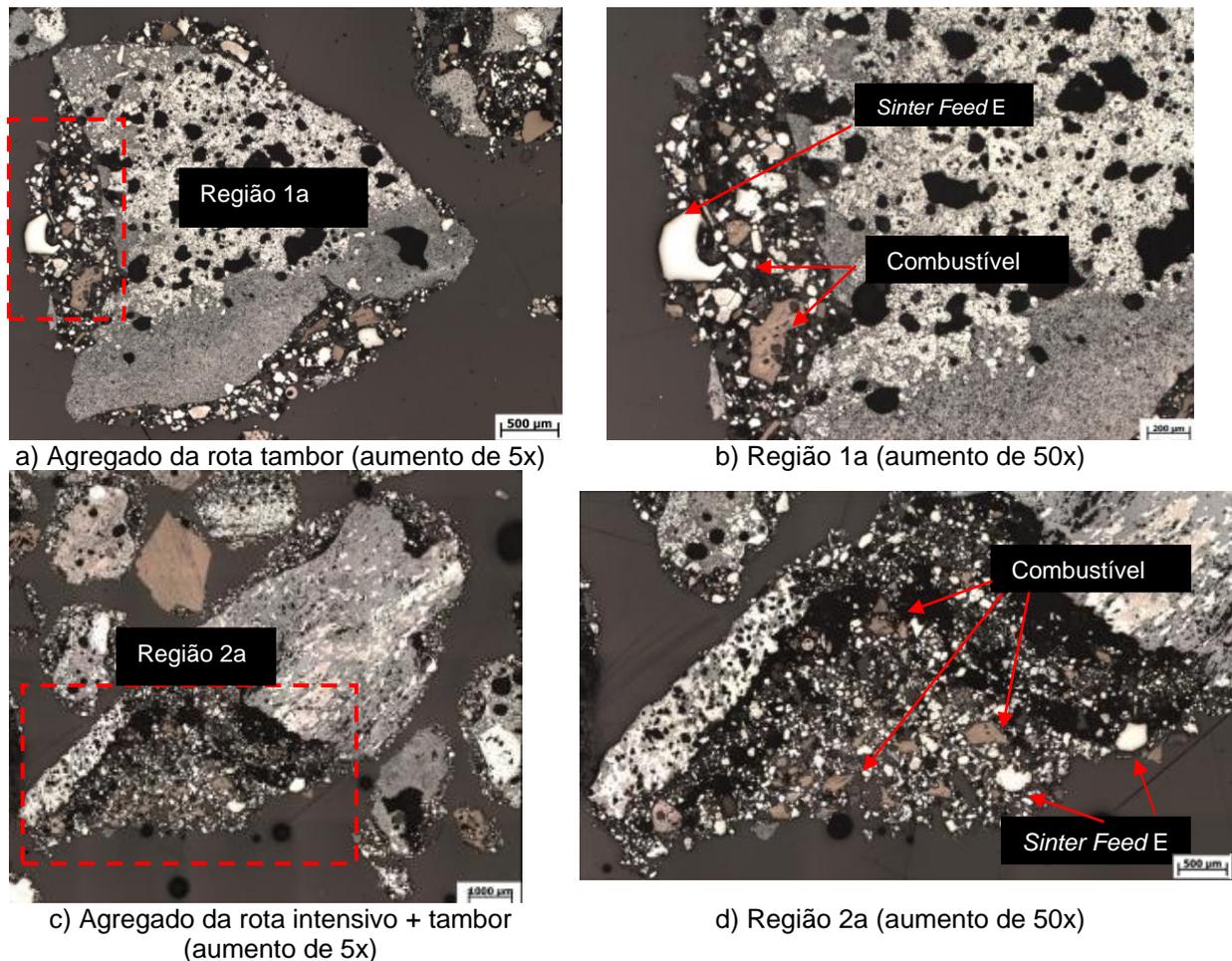
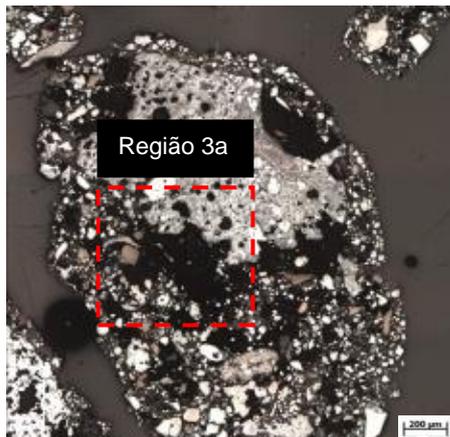
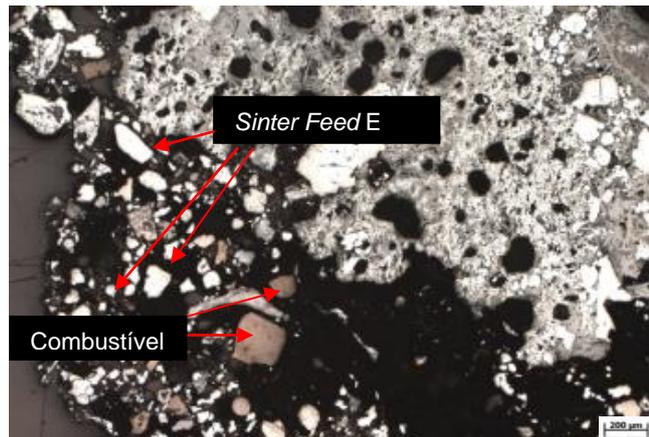


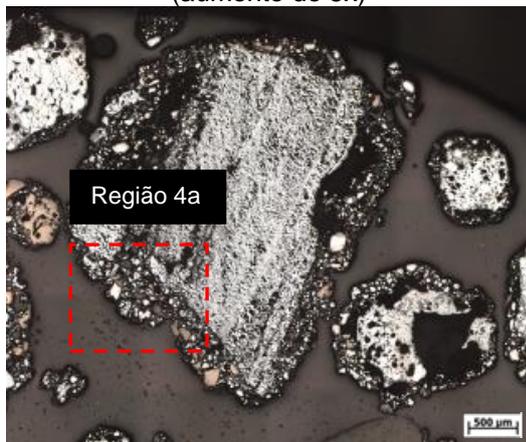
Figura 4. Fotomicrografias dos aglomerados.



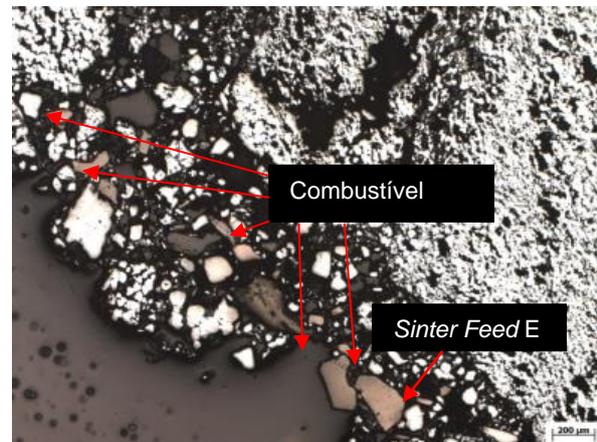
e) Agregado da rota tambor + tambor (aumento de 5x)



f) Região 3a (aumento de 50x)



g) Agregado da rota HPS (aumento de 5x)



h) Região 4a (aumento de 50x)

Figura 4. Fotomicrografias dos aglomerados. (Continuação)

Outro fato relevante é a presença do *sinter feed E*, que tem como característica o baixo desempenho em aglomeração a frio, com pouca participação, como nucleante, na formação das quase partículas. Todavia, para a rota utilizando o HPS percebe-se, em função da efetividade desse processo, a presença desse minério tendo em sua interface presença de materiais finos, formando quase partículas, Figura 5.

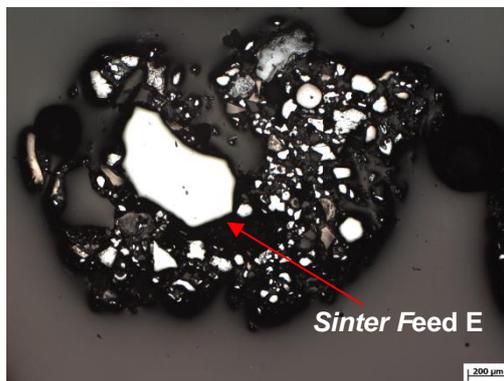


Figura 5. Quase partículas contendo o *sinter feed E* como nucleante.

3.2 Desempenho na sinterização piloto

Na Figura 6 são mostrados os principais indicadores da MPS. A mistura processada no HPS apresentou elevada produtividade e corroborava com o índice de granulação a frio, Figura 6 (a), além da maior velocidade de frente de queima (*Flame Front Speed* FFS), preponderante para esse resultado (Figura 6 (b)). Apesar de essenciais para boa produtividade da sinterização, os índices de rendimento do síter, Figura 6 (c), e da mistura total, Figura 6 (d), não foram determinantes para os melhores resultados de produtividade, fato confirmado pelo resultado da mistura referência que apresentou melhores resultados desses índices. Contudo, a baixa velocidade de frente de queima redundou no menor valor de produtividade. Destaca-se ainda o resultado do nível com utilização da rota duplo tambor com resultados superiores ao intensivo.

Com relação ao *fuel rate*, Figura 6 (f), a mistura do HPS por possuir baixo rendimento do síter atrelado ao ajuste do balanceamento do retorno, apresentou consumo mais elevado de combustível.

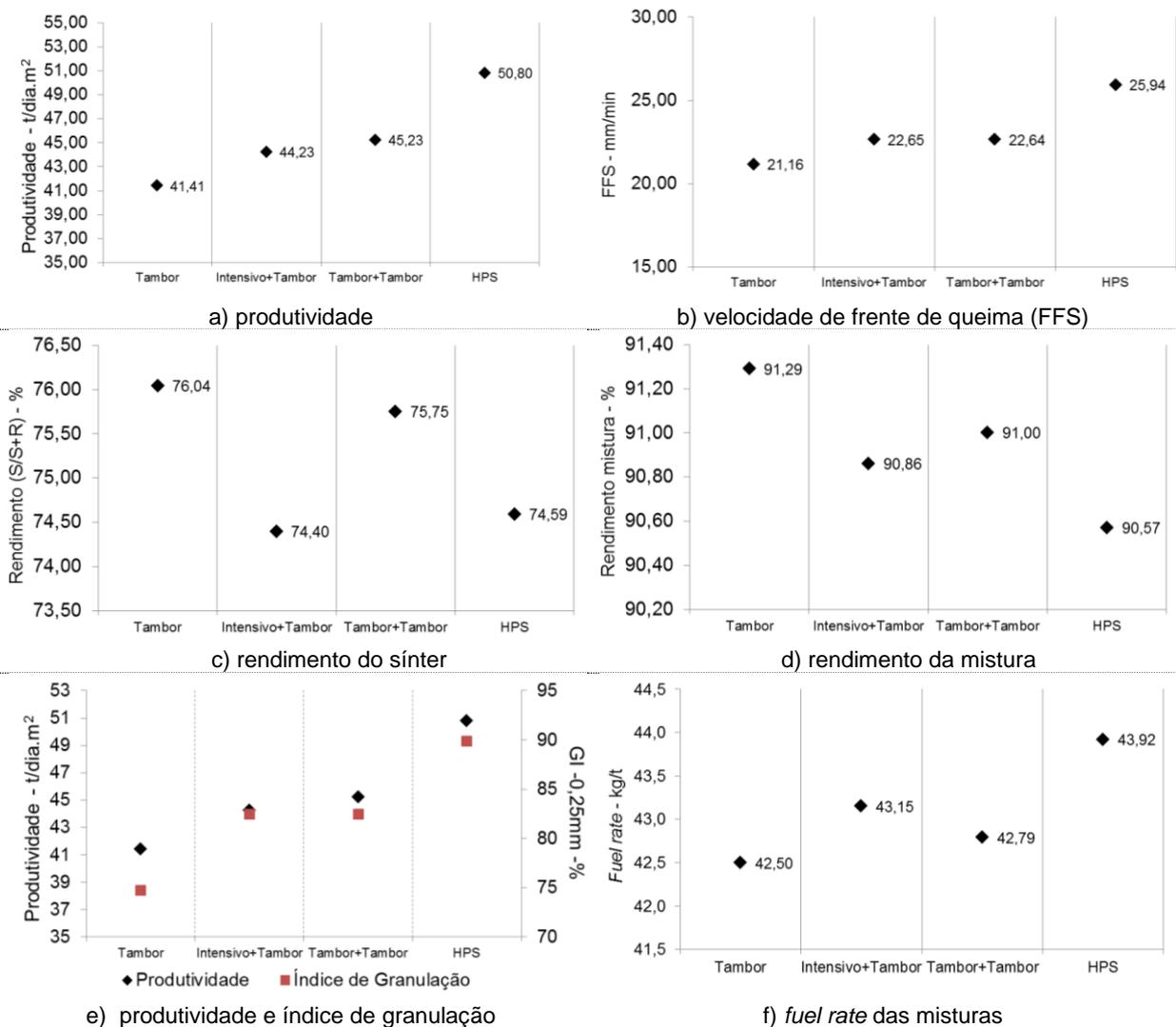


Figura 6. Indicadores da sinterização piloto.

3.3 Caracterização química, metalúrgica e mineralógica dos sínteres

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de análise química dos sínteres. A maior utilização de combustível para ajuste do balanço de retorno no processo HPS resultou no maior valor de FeO do sínter.

Tabela 5. Composição química dos sínteres

Técnica de análise	Elemento ou composto	% em massa				
		Rotas	Tambor	Intensivo + Tambor	Tambor + Tambor	HPS
Volumetria	FeT		56,9	57,1	57,9	57,0
	FeO		3,15	4,13	3,70	4,49
Raios-X	SiO ₂		5,68	5,54	5,52	5,46
	Al ₂ O ₃		1,43	1,46	1,50	1,50
	P ₂ O ₅		0,16	0,16	0,16	0,16
	MnO		0,23	0,23	0,24	0,23
	TiO ₂		0,068	0,066	0,064	0,064
	CaO		10,90	10,30	10,10	9,64
	MgO		0,94	0,94	0,94	0,94
	CaO/SiO ₂		1,90	1,86	1,83	1,77

Na Figura 7 é mostrado o resultado de resistência a frio dos sínteres. Percebe-se que com o aumento de produtividade houve perda na resistência mecânica. Em análise realizada por FURUI *et al.* [5] foi comprovada essa mesma tendência na planta industrial de Tobata no Japão. Esse comportamento pode estar associado à elevada velocidade de frente de queima e/ou menor densidade da mistura na panela.

Metalurgicamente, a redutibilidade do sínter proveniente do processo do HPS foi o melhor resultado, no entanto, todos os sínteres apresentaram bom comportamento nesse parâmetro. Com relação ao RDI (<3,15mm), a pior condição foi aquela do sínter obtido pelo processo de duplo tambor seguido pelo HPS, Figura 7.

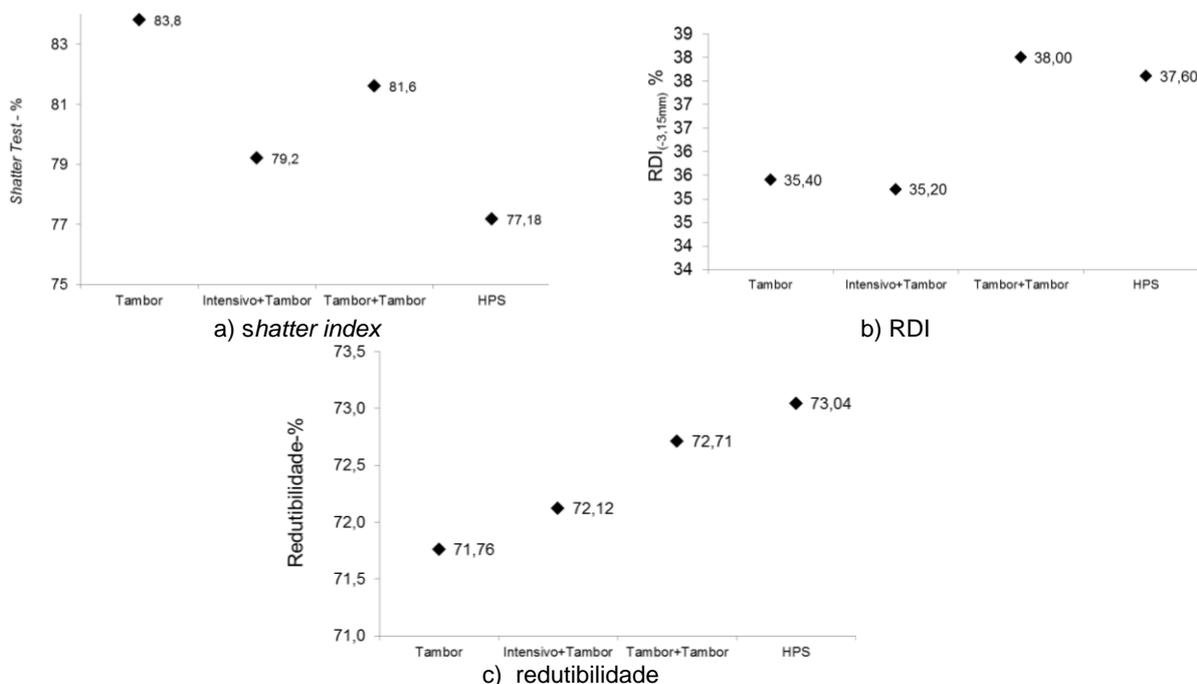


Figura 7. Resultados de resistência mecânica e metalúrgicos dos sínteres.

Os resultados de microscopia óptica dos sinteres britados são apresentados na Figura 8. A maior presença de magnetita dos sinteres produzidos pelo HPS e misturador intensivo estão de acordo aos resultados de *fuel rate* assim como aos de FeO. Ademais, tecnicamente não são esperadas alterações microestruturais significativas das amostras.

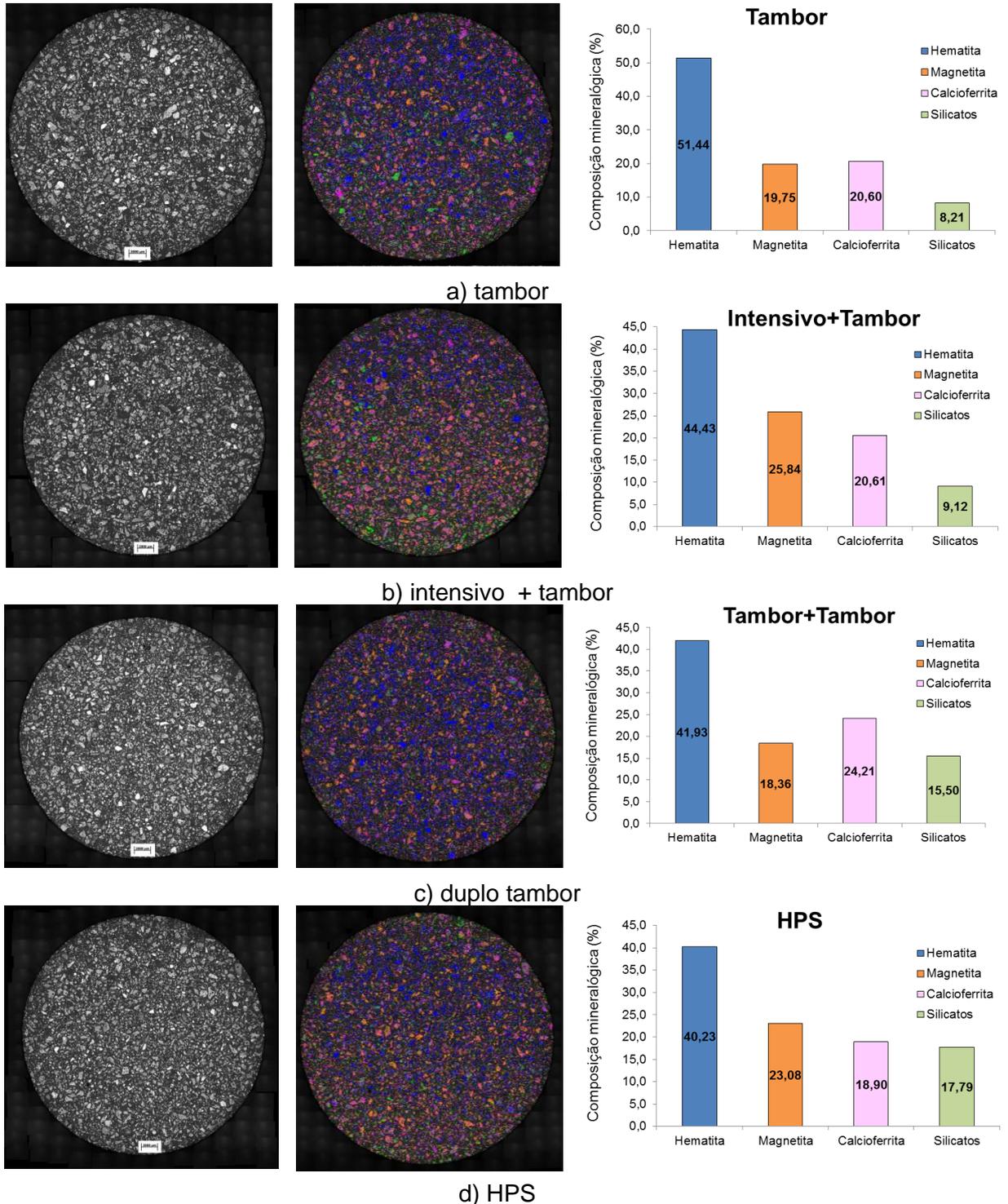


Figura 8. Microscopia dos sinteres.

4 CONCLUSÃO

Foi avaliado o impacto de rotas para aglomeração a frio (misturador intensivo, duplo tambor e HPS - *Hybrid Pelletized Sinter*) nos indicadores da sinterização, por meio de realização de ensaios piloto. Os testes mostraram que independentemente da rota testada, houve aumento de produtividade da Máquina Piloto de Sínter (MPS), quando comparada à rota atual praticada na Sinterização 3 da Usiminas, que envolve apenas o uso de um misturador tambor.

Os melhores resultados em índice de granulação e, conseqüentemente, de produtividade da MPS foram obtidos na rota com utilização do processo HPS. Entretanto, o sínter oriundo desse processo foi o mais frágil entre os analisados. O desempenho do processo duplo tambor foi superior ao misturador intensivo, do ponto de vista da produtividade e da resistência mecânica.

REFERÊNCIAS

- 1 JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. JIS M 8711: Test Method for Determination of Shatter Strength of Iron Ore Sinter. 1987.
- 2 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4696-1: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by static method - Part 1: Reduction with CO, CO₂, H₂ and N₂. 2015.
- 3 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7215: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of the reducibility by the final degree of reduction index. 2015.
- 4 NIWA, Y.; KOMATSU, O.; NODA, H.; SAKAMOTO, N.; OGAWA, S. – Development of Hybrid Pelletized Sinter Process and its commercial operation at Fukuyama n5 sintering plant. Ironmaking Conference Proceedings, 1990 – 683-689.
- 5 FURUI T.; SUGAWARA K.; KAGAWA M.; UNO S.; KAWAZU M.; FUJIWARA T, et al. Technology for preparation of raw materials to be sintered. Nippon Steel Technical Report. 1977; (10):36-46.