

ADIÇÃO DE PELLET FEED NA AGLOMERAÇÃO A FRIO DE MINÉRIO DE FERRO PARA SINTERIZAÇÃO*

Arthur Felipe Lino Oliveira¹

Rafael Adriano Lopes Júnior²

Ismael Vemdrame Flores²

Lindaura de Souza Cândido D' Avila³

Maurício Covcevich Bagatini⁴

Resumo

O uso de pellet feed para ajuste de qualidade química do sinter é uma alternativa diante do empobrecimento das reservas de minério de ferro. Entretanto, a adição de ultrafinos na sinterização pode ocasionar perda de permeabilidade e consequente queda de produtividade do processo. Nesse contexto, o presente estudo investigou a adição de pellet feed natural e moído, avaliando seus efeitos sobre aglomeração a frio para sinterização e a qualidade das quase-partículas produzidas. Oito misturas típicas de composição industrial foram produzidas em laboratório, substituindo-se o Sinter Feed por diferentes percentuais de Pellet Feed Natural (PFN, 91% < 150 µm) e Pellet Feed Moído (PFM, 83% < 44 µm). As misturas foram submetidas a ensaios de aglomeração a frio e as quase-partículas produzidas foram avaliadas por meio de peneiramento, degradação à queda, ensaios de permeabilidade e análise granulométrica particionada. Observou-se uma diminuição do tamanho médio das quase-partículas e um decréscimo de permeabilidade com a adição dos ultrafinos. A adição de PFN favoreceu o mecanismo de deposição de camadas em quase-partículas maiores. O mecanismo de coalescimento ocorreu para maiores adições de PFN e PFM, sendo mais expressivo para o PFM.

Palavras-chave: Aglomeração a frio; Sinterização; Minério de ferro; Pellet Feed.

PELLET FEED ADDITION ON IRON ORE SINTERING COLD AGGLOMERATION

Abstract

The use of pellet feed to adjust the chemical quality of the sinter is an alternative to the depletion of iron ore reserves. However, the addition of ultrafine in the sintering process can cause decrease of permeability and consequent drop in machine productivity. In this context, the present work investigated the addition of natural and ground pellet feed, evaluating its effects on cold agglomeration for sintering and quality of quasi-particles produced. Eight typical mixtures with industrial composition were produced in the laboratory, replacing Sinter Feed with different percentages of Natural Pellet Feed (NPF, 91% <150 µm) and Ground Pellet Feed (GPF, 83% <44 µm). The mixtures were subjected to cold agglomeration tests and the quasi-particles produced were evaluated by screening, shatter test, permeability test and disintegration into primary particles analysis. There was a decrease in the mean particle size of quasi-particles and reduce in permeability with addition of the ultrafines. The addition of NPF favored the layering mechanism in larger quasi-particles. The coalescence mechanism occurred for larger additions of NPF and GPF, being more expressive for GPF additions.

Keywords: Cold agglomeration; Sintering; Iron ore; Pellet Feed.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Processos Siderúrgicos (LPS), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Pós-graduação em Metalurgia Extrativa, Laboratório de Processos Siderúrgicos (LPS), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheira Metalurgista, M. Sc., Assessora Técnica da Área de Sinterizações Usina Ouro Branco, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

⁴ Prof. Doutor em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Processos Siderúrgicos (LPS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A sinterização de minério de ferro é um processo de aglomeração de finos que consiste em transformar uma mistura de minérios de ferro, combustíveis sólidos, água e aditivos em sínter metalúrgico com propriedades adequadas para uso no alto-forno [1]. Antes da sinterização propriamente dita tem-se a etapa de aglomeração a frio, fenômeno de união em temperatura ambiente, das partículas que compõem a mistura, com intuito de produzir aglomerados a frio conhecidos como quase-partículas [2].

Nas últimas décadas, as reservas de minério de ferro têm experimentado mudanças consideráveis em suas propriedades, apresentando altos percentuais de ganga em sua composição [3]. Em vista desse cenário, é uma realidade das sinterizações atuais trabalharem com maiores proporções de pellet feed (minério concentrado com maior teor de ferro e de menor granulometria que o sínter feed) em suas misturas, como forma de corrigir a qualidade química do sínter. Entretanto, o aumento da adição de ultrafinos prejudica a aglomeração a frio, provocando o decréscimo da permeabilidade do leito de sinterização, diminuindo a produtividade da máquina e promovendo alterações na qualidade do sínter produzido [4-6]. Nesse contexto, diversos estudos voltados para utilização de pellet feed na sinterização têm sido desenvolvidos, com intuito entender os mecanismos de aglomeração a frio e minimizar os efeitos negativos desse material de baixa granulometria no processo.

Furui et al. [7] mostraram que as partículas que compõem a mistura de sinterização são divididas em três grupos de acordo com sua granulometria, desempenhando diferentes funções no processo de aglomeração a frio. Segundo os autores, partículas maiores que 0,7 mm atuam como nucleantes e menores que 0,2 mm atuam como aderentes, sendo as partículas entre 0,2 e 0,7 mm classificadas como intermediárias. Em estudos recentes, Litster et al. [8] mostraram que partículas que atuam como núcleos aparecerão em quase-partículas de sua mesma faixa de tamanho ou em uma faixa de tamanho imediatamente acima, e as partículas aderentes estarão presentes em toda extensão granulométrica das quase-partículas, mostrando que a definição de nucleante e aderente não está diretamente ligada a uma faixa fixa de tamanhos.

Sendo o pellet feed formado somente por partículas aderentes, ao adicioná-lo na mistura de sinterização tem-se uma alteração na proporção nucleantes/aderentes dessa, que se refletirá no processo de aglomeração a frio. Nyembwe et al. [9] verificaram uma diminuição constante na permeabilidade do leito com proporções de partículas aderentes de até 35%. Além disso, Zhou et al. [10] relataram uma diminuição na fração de vazios do leito de sinterização para adições de até 30% de concentrado em uma mistura base. A redução global no tamanho das quase-partículas usando matérias-primas de menor granulometria também foi relatada em outros estudos [9-12] e segundo os autores está relacionada a mudanças nas proporções de aderentes. Takano [13] sugere que para minérios brasileiros, a proporção nucleantes/aderentes ideal seja uma mistura composta por 60% de partículas nucleantes e 40% de partículas aderentes, enquanto Gan et al. [14] sugerem valores entre 40 a 50% de partículas aderentes para um *blend* de minérios proveniente de vários países.

A maioria dos estudos sobre aglomeração a frio de minério de ferro para sinterização afirma que as quase-partículas se formam predominantemente por meio do mecanismo de deposição de camadas. Nesse mecanismo as partículas finas (aderentes) depositam-se sobre a superfície das mais grossas (nucleantes),

formando uma camada ao redor dessas [2,15-17]. Porém, Shatokha et al. [17] mostraram que maiores adições de pellet feed na mistura causa uma mudança no mecanismo de formação das quase-partículas, aumentando a quantidade de micropelotas (aglomerados formados apenas por aderentes), resultantes da interação entre partículas finas livres, que dão origem a um núcleo que cresce no decorrer da aglomeração a frio, sendo esse mecanismo conhecido como coalescimento.

Apesar de vários estudos investigarem o efeito de adições de pellet feed no processo de aglomeração a frio, em poucos casos a proporção de ultrafinos na mistura de sinterização supera 40% e raras pesquisas avaliam o efeito do tamanho das partículas aderentes. O presente trabalho teve como objetivo investigar o efeito do pellet feed natural e pellet feed moído sobre o comportamento de aglomeração a frio e na qualidade das quase-partículas produzidas. Além disso, o mecanismo de aglomeração a frio preponderante nos experimentos e a distribuição de tamanhos das partículas que formaram as quase-partículas foram avaliadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Matérias-primas

No presente trabalho foram utilizadas as seguintes matérias-primas: Sinter Feed, Pellet Feed Natural (PFN) (91% <150 μm), Pellet Feed Moído (PFM) (83% < 44 μm), cal, antracito, finos de coque, sinter de retorno, calcário, dolomito e carepa. Todos os materiais bem como suas composições foram fornecidos por uma usina siderúrgica integrada instalada em Minas Gerais. A composição química de cada matéria-prima é dada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química das matérias-primas (%)

Matéria-prima	Fe _T	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	PPC	Carbono fixo
Sinter Feed	63,5	-	5,05	1,03	-	-	1,54	-
Pellet Feed	64,31	-	5,01	0,75	-	-	1,29	-
Cal	0,23	-	1,41	0,13	89,04	0,64	7,65	-
Calcário	0,21	-	1,95	0,39	54,71	0,34	42,3	-
Dolomito	4,22	-	8,77	0,87	25,45	15,46	40,52	-
Sinter de retorno	55,7	6,49	6,17	1,36	10,22	1,5	-	-
Carepa	72,84	-	0,52	0,03	0,08	0,01	-	-
Finos de coque	-	-	6,97	2,96	0,39	0,15	-	83,77
Antracito	-	-	2,22	1,06	0,11	0,07	-	87,88

Fe_T = ferro total; PPC = perda por calcinação

Para investigar a influência da adição de ultrafinos na qualidade das quase-partículas formadas, elaborou-se uma série de misturas com diferentes proporções de Pellet Feed Natural e Pellet Feed Moído. Inicialmente considerou-se uma típica mistura industrial de sinterização, tendo o Sinter Feed como única fonte minério de ferro para ser o caso base. Adicionalmente, misturas contendo 10 a 40% de Pellet Feed Natural (PFN - 91% < 150 μm) ou Pellet Feed Moído (PFM - 98% < 75 μm) em substituição ao Sinter Feed foram elaboradas, conforme Tabela 2. A distribuição granulométrica e a relação aderente/nucleante de cada mistura são mostradas na Tabela 3, considerando partículas menores que 0,5 mm como aderentes, baseando-se na definição de Litster et al. [8].

Tabela 2. Composição das misturas testadas (% em massa)

	Sinter Feed	PFN	PFM	Cal	Cal-cário	Dolomi-to	Sinter retorno	Care-pa	Finos Coque	Antraci-to
Base	61	0	0	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
10% PFN	51	10	0	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
20% PFN	41	20	0	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
30% PFN	31	30	0	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
40% PFN	21	40	0	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
10% PFM	51	0	10	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
20% PFM	41	0	20	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
30% PFM	31	0	30	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8
40% PFM	21	0	40	3,5	2,6	2.5	26	0,8	1,8	1,8

Tabela 3. Distribuição granulométrica das misturas (% em massa)

	% Retido simples							Relação A/N
	>8 mm	8-5.6 mm	5.6-3.36 mm	3.36-2 mm	2-1 mm	1-0.5 mm	<0.5 mm	
Base	1,4	5,4	11,2	16,3	13,9	11	40,8	40/60
10% PFN	1,2	4,9	10,4	15,3	12,9	10	45,4	45/55
20% PFN	0,9	4,3	9,5	14,3	11,8	9,1	50,1	50/50
30% PFN	0,7	3,8	8,6	13,2	10,8	8,2	54,7	55/45
40% PFN	0,5	3,3	7,8	12,2	9,7	7,2	59,3	60/40
10% PFM	1,2	4,9	10,4	15,3	12,9	9,9	45,6	45/55
20% PFM	0,9	4,3	9,5	14,2	11,8	8,8	50,4	50/50
30% PFM	0,7	3,8	8,6	13,2	10,8	8,2	54,7	55/45
40% PFM	0,5	3,3	7,8	12,2	9,6	6,7	60	60/40

2.2 Aglomeração a Frio

Os ensaios de aglomeração a frio foram conduzidos em uma rota de escala laboratorial que representa o processo *Hybrid Pelletized Sinter (HPS)* [18], composta por duas etapas de aglomeração a frio, sendo a primeira em tambor misturador e a segunda em disco pelletizador. As características dimensionais e os parâmetros de ensaio no tambor e no disco encontram-se na Tabela 4. A quantidade de água adicionada foi fixada em 7,4% em massa para todos os testes.

Tabela 4. Características dimensionais e parâmetros operacionais para os testes de aglomeração a frio

Equipamento	D x H (mm)	Rotação (rpm)	Ângulo (°)	Tempo (s)
Tambor	250 x 250	20	20	360
Disco	600 x 100	14	48	270

2.3 Avaliação das Quase-partículas

Para avaliar o efeito da adição do PFN e PFM no processo de aglomeração a frio, as quase-partículas foram submetidos à análise de distribuição granulométrica, testes de resistência à degradação quanto a queda (*Shatter test*), ensaio de permeabilidade a frio e análise granulométrica particionada.

A distribuição granulométrica das quase-partículas foi realizada usando o método *Safe Analysis on Frozen Elements* (SAFE) [19]. Para isso, 1 kg de material foi submetido a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 90 minutos. Isso aumenta a resistência mecânica das quase-partículas, minimizando sua degradação durante manuseio. O peneiramento foi realizado em mesa vibratória a 10000 vibrações/min durante 10 minutos e a série de peneiras utilizada foi: 8, 5,6, 3,36, 2, 1 e 0,5 mm. Adicionalmente, o diâmetro médio de Sauter (SMD) das quase-partículas foi calculado usando a equação 1 [9, 20].

$$SMD (mm) = 100 / \sum_i \frac{x_i}{\bar{d}_i} \quad (1)$$

Em que \bar{d}_i é o diâmetro médio das quase-partículas para a fração de tamanho i e x_i é a porcentagem de massa de quase-partículas na fração de tamanho i .

A distribuição granulométrica obtida pelo método SAFE também foi utilizada para o cálculo do índice de granulação (IG, equação 2) [7], o qual permite avaliar a quantidade de finos aglomerados no processo.

$$IG = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad (2)$$

Sendo A a massa de partículas menores que 0,5 mm antes da aglomeração e B a massa de partículas menores que 0,5 mm após a aglomeração.

A distribuição granulométrica particionada foi realizada com objetivo de quantificar o tamanho e a distribuição de partículas primárias que deram origem a cada fração granulométrica de quase-partículas, permitindo identificar a proporção de partículas aderentes nessas. Para isso, cada um dos intervalos de tamanho obtidos por meio do SAFE foi desintegrado e peneirado a úmido. Após a total desintegração, o material obtido foi levado a estufa a 105°C para secagem durante 24 horas. Depois desse período, o produto de desintegração de cada faixa granulométrica de quase-partículas foi peneirado novamente nas mesmas malhas do teste SAFE.

Nas condições industriais, ocorre degradação das quase-partículas durante seu transporte até o carregamento da esteira de sinterização. Para simular essa degradação, as quase-partículas foram submetidas a duas quedas consecutivas de 1 metro de altura sobre uma chapa metálica (*shatter test*). Após as duas quedas, o material degradado foi levado ao teste SAFE para determinação de sua distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter, visando a comparar com as quase-partículas obtidas antes do teste de queda.

Os testes de permeabilidade foram realizados em um equipamento denominado permeômetro, composto por um tubo cilíndrico posicionado verticalmente, com altura de 150 mm e diâmetro da seção transversal de 120 mm. Os testes foram executados para as quase-partículas antes e após os testes de degradação. Para tanto, aproximadamente 3 kg de material foi carregado no leito, um motor conectado a base do sistema suciona ar a uma vazão de $0,5\text{ m}^3/\text{min}$ e a diferença de pressão entre o topo e a base do leito é medida por um manômetro diferencial. A permeabilidade das misturas foi calculada em JPU (*Japanese Permeability Unit*) a partir da equação 3 [21], onde F é a vazão de ar (m^3/min), A é a área da seção transversal do leito (m^2), L é a altura do leito (mm) e ΔP é a perda de pressão (mmH_2O).

$$JPU = \frac{F}{A} \left(\frac{L}{\Delta P} \right)^{0,6} \quad (3)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição Granulométrica das Quase-partículas

A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica e o diâmetro médio de Sauter (SMD) das quase-partículas formadas para as diferentes misturas. Além disso, utilizou-se o percentual em peso de quase-partículas entre 8 e 1 mm (W_{-8+1} , mostrado na Figura 1 pelas setas no interior das colunas) como indicador da largura de distribuição do tamanho. Quanto maior o W_{-8+1} , mais homogênea e estreita será a distribuição de tamanho das quase-partículas. Esse parâmetro também foi usado por Huang et al. [22] para determinação de aglomeração a frio ótima.

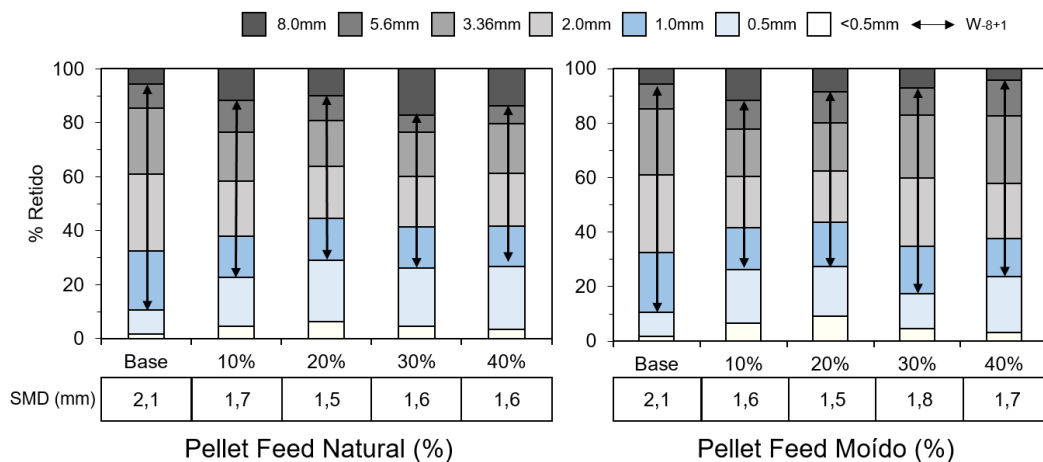


Figura 1. Distribuição granulométrica, SMD (diâmetro médio de Sauter) e W_{-8+1} (% em peso de partículas entre 8 e 1 mm) das quase-partículas formadas para diferentes adições de PFN e PFM

Como pode-se observar na Figura 1, a mistura base apresentou uma distribuição granulométrica mais estreita, com a maior parte de suas quase-partículas na faixa granulométrica entre 1 e 8 mm (84%). Todas as adições de PFN e PFM ampliaram a distribuição de tamanho, produzindo maiores percentuais de material menor que 1 mm. Além disso, foi observado a tendência de formar uma quantidade maior de quase-partículas superiores a 8 mm com maior adição de PFN nas misturas. Estes resultados indicam que adição de PFN favorece o mecanismo de deposição de camadas em quase-partículas maiores. Em relação ao PFM, a adição de 10% fez com que a distribuição das quase-partículas se tornasse mais ampla (menos homogênea), embora acima de 20% de adição, tenha ocorrido um estreitamento da distribuição. Adicionalmente, observou-se que acima de 10% de adição de PFM na mistura, menos quase-partículas maiores que 8 mm foram produzidas.

Quanto aos diâmetros médios, a mistura base teve maior SMD do que as misturas com adição de PFN e PFM. Em ambos os casos, adições de até 20% apresentaram tendências semelhantes, reduzindo o SMD das quase-partículas. No entanto, para adições de 30 e 40% de PFN e PFM foi observado um leve aumento do diâmetro médio. O aumento em SMD para maiores percentuais de PFN e PFM

pode ser atribuído à maior disponibilidade de partículas aderentes na mistura, o que favorece o mecanismo de coalescimento, pela maior interação entre as aderentes [17]. A formação de núcleos também pode ser vista por meio dos valores de IG das misturas, ilustrado na Figura 2. Ao se adicionar ultrafinos em até 20% na mistura base, tem-se uma diminuição no IG para ambos os casos, entretanto a partir de 30% de adição o IG aumenta. Acredita-se que os finos, que anteriormente não aglomeraram em adições de 10 e 20%, formaram núcleos pela interação entre eles próprios em percentuais de 30 e 40% de adição.

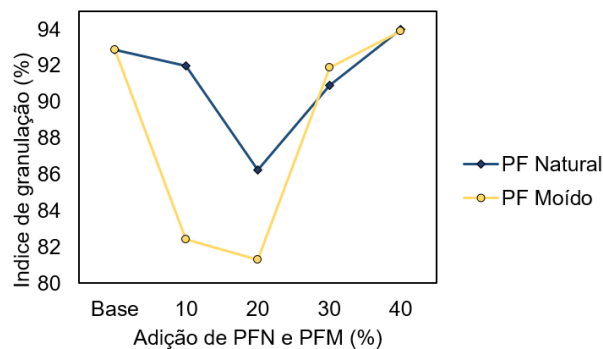


Figura 2. Índices de granulação (GI)

3.2 Distribuição Granulométrica Particionada

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, as distribuições granulométricas particionadas para os ensaios com adições de PFM e PFN. Em relação ao comportamento das partículas de PFM (Figura 3), pode-se observar uma distribuição de partículas aderentes (<0,5 mm) mais dividida ao longo de todos os tamanhos de quase-partículas classificadas. Tendo um aumento na homogeneidade da proporção de partículas aderentes em todos os tamanhos de quase-partículas, para maiores adições de PFM. Portanto, acredita-se que as micropelotas estão presentes em todas as faixas de tamanho, indicando que o coalescimento foi mais significativo para adições de PFM.

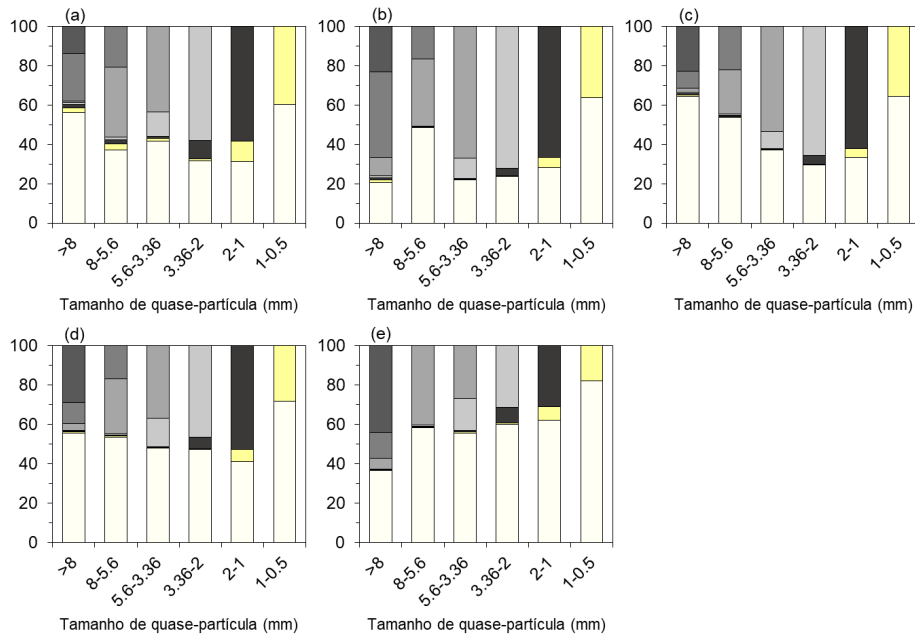


Figura 3. Distribuição granulométrica fracionada das seguintes misturas: (a) base e (b-e) adição de 10 a 40% de PFM, respectivamente.

Em relação ao comportamento das partículas aderentes de PFN, pode-se observar que, independentemente da quantidade adicionada desse ultrafino, a proporção de partículas abaixo de 0,5 mm (aderentes) ao longo dos diferentes tamanhos de quase-partículas se assemelha a uma parábola, com um ponto mínimo em 2-3,36 mm, ou seja, as aderentes ficaram mais concentradas em quase-partículas das extremidades da distribuição granulométrica, com pouca concentração na faixa central de tamanho. O elevado percentual de partículas aderentes em quase-partículas entre 0,5 e 1 mm indica ter ocorrido a coalescência e formação de micropelotas nessa faixa. O maior percentual de partículas primárias menores que 0,5 mm em quase-partículas maiores que 8 mm indica a tendência de o Pellet Feed Natural depositar-se na superfície de quase-partículas maiores.

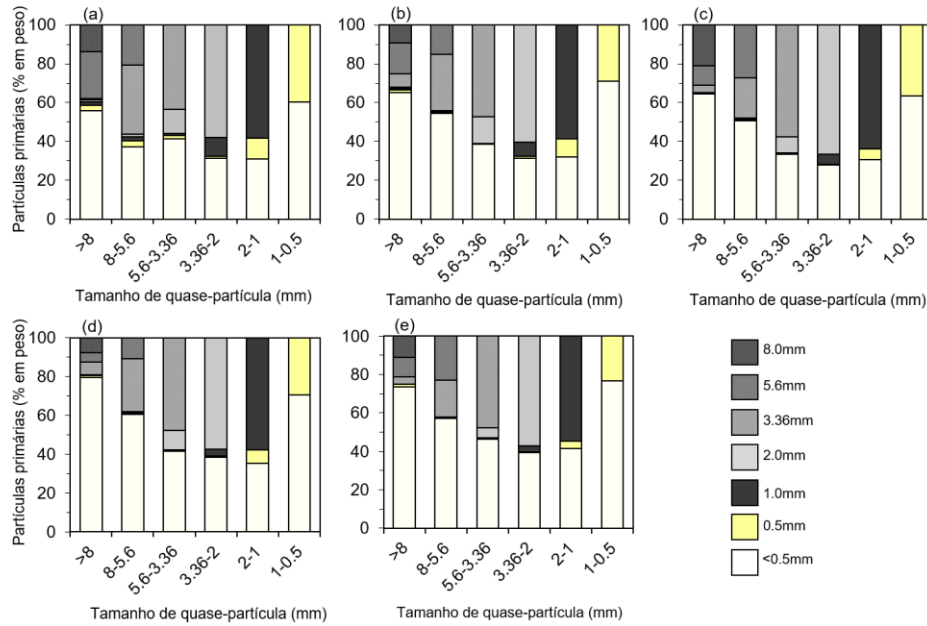


Figura 4. Distribuição granulométrica fracionada das seguintes misturas: (a) base, (b-e) adição de 10 a 40% de PFN, respectivamente.

3.3 Resistência à Queda (Shatter test) das Quase-partículas

A comparação entre o SMD para as misturas testadas antes e depois dos testes de queda foi usada para mensurar a degradação das quase-partículas, como pode ser visto na Figura 5.

Em todos os casos as quase-partículas sofreram degradação após o ensaio de queda, reduzindo significativamente o SMD. A redução média do SMD foi de 16%, com exceção das misturas com 30 e 40% de PFM, que claramente degradaram mais (cerca de 30%). Portanto, observou-se que em casos com elevadas quantidades de PFM (30 e 40%), as quase-partículas produzidas foram menos resistentes e acredita-se que isso se deve a maior presença de micropelotas compostas somente por finos, presentes nessas misturas.

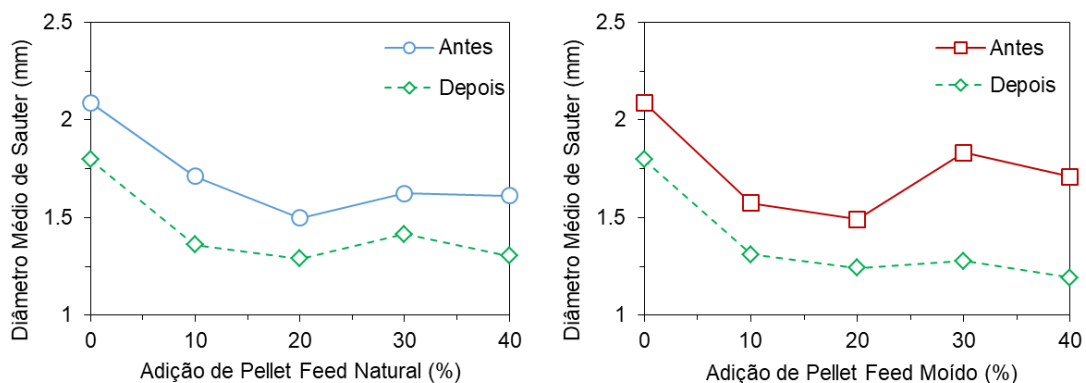


Figura 5. Diâmetro médio de Sauter antes e depois do teste de queda

3.4) Permeabilidade a Frio dos Leitos de Quase-partículas

Por meio da Figura 6, foi possível observar que o aumento de adições de PFN e PFM, em todas as proporções, resultou em decréscimo de permeabilidade comparado ao caso base. Para adições de 20 e 30% de PFM teve-se uma mudança de comportamento do leito, sucedendo em aumento de permeabilidade. Todas as misturas apresentaram um decréscimo na permeabilidade após os ensaios de queda, apresentando tendências semelhantes nos seus perfis antes e depois da degradação.

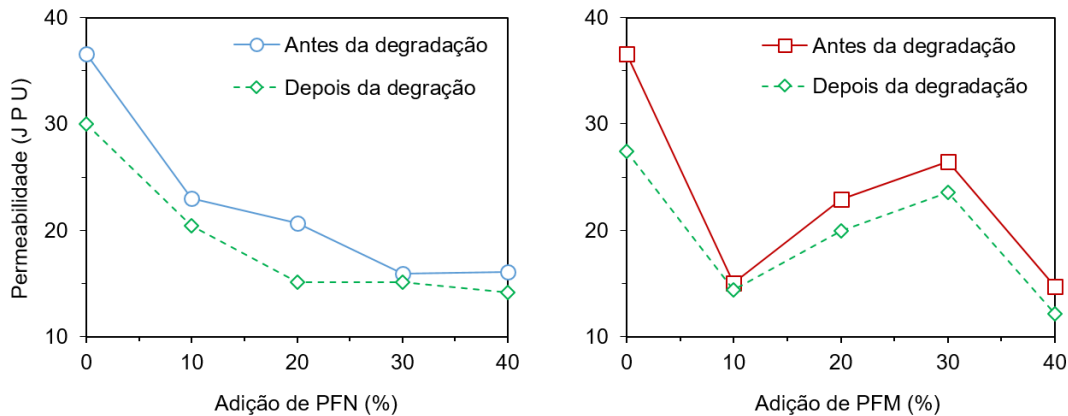


Figura 6. Permeabilidade a frio dos leitos

Na Figura 7 a permeabilidade dos leitos formados pelas diferentes misturas foi avaliada por meio do efeito de três variáveis: diâmetro médio de Sauter (SMD), porcentagem em peso de quase-partículas inferiores a 1 mm e largura da distribuição de tamanhos (W_{-8+1}).

A permeabilidade do leito de sinterização é um parâmetro muito complexo, sensível ao teor de umidade da mistura, tamanho das quase-partículas, dispersão de tamanho, fração de vazios e ângulo de repouso [23-26]. Contudo, em geral, foi encontrada uma boa correlação entre a permeabilidade do leito e as três variáveis apresentadas. Maiores valores de SMD tendem a apresentar leitos mais permeáveis. A mesma tendência é vista para distribuições de tamanho mais estreitas. Já o percentual de quase-partículas menores que 1 mm apresenta relação inversamente proporcional a permeabilidade do leito.

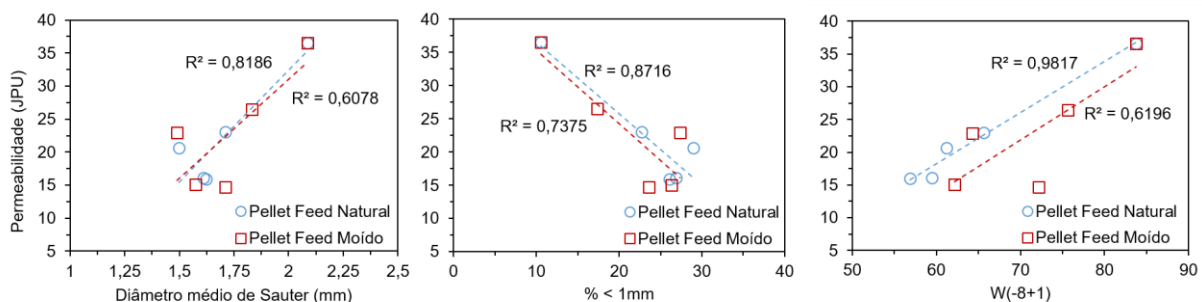


Figura 7. Correlação entre permeabilidade e diâmetro médio de Sauter, percentual em peso de quase-partículas menores que 1 mm e largura da distribuição de tamanho (W_{-8+1})

4 CONCLUSÕES

Foi investigado o efeito da adição de Pellet Feed Natural (PFN) e Pellet Feed Moído (PFM) na qualidade das quase-partículas produzidas na etapa de aglomeração a frio de minério de ferro para sinterização. Concluiu-se que:

- (1) Todas as adições de PFN e PFM ampliaram significativamente a distribuição de tamanho das quase-partículas, produzindo maiores percentuais de material menor que 1 mm.
- (2) A adição de PFN nas misturas favoreceu o mecanismo de deposição de camadas em quase-partículas maiores, além de promover a formação de micropelotas (formadas somente por partículas aderentes) em frações menores de tamanho;
- (3) Além disso, o mecanismo de coalescimento foi mais significativo para adições de PFM, indicando que partículas menores na fração aderente podem aglomerar mais facilmente.
- (4) Os testes de degradação a queda levaram a uma redução significativa no diâmetro médio das quase-partículas. Nos casos de elevada quantidade de PFM adicionado a mistura (30 e 40%), as quase-partículas produzidas foram menos resistentes e acredita-se que isso se deve a maior presença de micropelotas.

REFERÊNCIAS

- 1 Ball DJ, Davison JDF. Agglomeration of iron ores. [S.l.]: American Elsevier Pub. Co. 1973.
- 2 Cores A, Muñiz M, Ferreira S, Robla JI, Mochón J. Relationship between sinter properties and iron ore granulation index. *Ironmaking & Steelmaking*. 2012; 39(2):85-94.
- 3 Lu L, Ishiyama O. Recent advances in iron ore sintering. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2011; 125(3):132-9.
- 4 CE L. Quantifying the resistance to airflow during iron ore sintering. *ISIJ international*. 2003; 43(5):630-636.
- 5 Zhou H, Zhao JP, Loo CE, Ellis BG, Cen KF. Model predictions of important bed and gas properties during iron ore sintering. *ISIJ international*. 2012; 52(12):2168-2176.
- 6 Zhou H, Zhou M, Liu Z, Cheng M, Chen J. Modeling NOx emission of coke combustion in iron ore sintering process and its experimental validation. *Fuel*. 2016; 179:322-331.
- 7 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.
- 8 Litster JD, Waters AG. Influence of the material properties of iron ore sinter feed on granulation effectiveness. *Powder Technology*. 1985; 55(2):141-151.
- 9 Nyembwe AM, Cromarty RD, Garbers-Craig AM. Effect of concentrate and micropellet additions on iron ore sinter bed permeability. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016ç 125(3):178-186.
- 10 Zhou M, Zhou H, O’dea DP, Ellis BG, Honeyands T, Guo X. Characterization of granule structure and packed bed properties of iron ore sinter feeds that contain concentrate. *ISIJ International*. 2017; ISIJINT-2016.
- 11 Ellis BG, Loo CE, Witchard D. Effect of ore properties on sinter bed permeability and strength. *Ironmaking & steelmaking*. 2007; 34(2):99-108.
- 12 Venkataramana R, Gupta SS, Kapur PC. A combined model for granule size distribution and cold bed permeability in the wet stage of iron ore sintering process. *International journal of mineral processing*. 1999; 57(1):43-58.
- 13 Takano C. Aglomeração de minério de ferro. [S.l.]: ABM., 2012.

- 14 Gan M, Fan XH, Ji ZY, Chen XL, Yin L, Jiang T, Huang YS. Optimising method for improving granulation effectiveness of iron ore sintering mixture. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015; 42(5):351-357.
- 15 Nagano S, Noda H, Yanaka H, Shiobara K, Yamaoka Y. Characteristics of sinter feed and its influence on sintering. In *4 th International Symposium on Agglomeration*. 1985:191-202.
- 16 Nyembwe AM, Cromarty RD, Garbers-Craig AM. Prediction of the granule size distribution of iron ore sinter feeds that contain concentrate and micropellets. *Powder technology*. 2016; 295:7-15.
- 17 Shatokha V, Korobeynikov I, Maire E, Adrien J. Application of 3D X-ray tomography to investigation of structure of sinter mixture granules. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009; 36(6):416-420.
- 18 Niwa Y, Sakamoto N, Komatsu O, Noda H, Kumasaka A. Commercial production of iron ore agglomerates using sinter feeds containing a large amount of fine ores. *ISIJ International*. 1993;33(4):454-461.
- 19 González DF, Ruiz-Bustanza I, Mochón J, González-Gasca C, Verdeja LF. Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation, Mineral Processing and Extrative Metallurgy Review. 2016.
- 20 Zhou M, Zhou H, O'Dea DP, Ellis BG, Honeyands T, Guo X. Characterization of granule structure and packed bed properties of iron ore sinter feeds that contain concentrate. *ISIJ International*. 2017; 57(6):1004-11.
- 21 Sato S, Yoshinaga M, Inchiedate M, Kawaguchi T. Consideration on the granulation and the bed-permeability model of sinter raw materials. *Tetsu-to-Hagané*. 1982;68(15):2174-2181.
- 22 Huang X, Lv X, Xue Z. Interpretation on Iron Ore Granulation Process Based on Particle-size Analysis. *ISIJ International*. 2016; ISIJINT-2016.
- 23 Hinkley J, Waters AG, O'dea D, Litster JD. Voidage of ferrous sinter beds: new measurement technique and dependence on feed characteristics. *International journal of mineral processing*. 1994; 41(1-2):53-69.
- 24 Van Burkalow A. Angle of repose and angle of sliding friction: an experimental study. *Geological Society of America Bulletin*. 1945; 56(6):669-707.
- 25 Carstensen JT, Chan PC. Relation between particle size and repose angles of powders. *Powder Technology*. 1976; 15(1):129-131.
- 26 Rankin WJ, Roller PW, Batterham RJ. Quasi-particle formation and the granulation of iron ore sinter feeds. 1983.