

# AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE AGLOMERAÇÃO A FRIO DE MISTURAS A SINTERIZAR<sup>1</sup>

Fernando Luiz Câmara Campos Júnior<sup>2</sup>  
Marcus Emrich Botelho<sup>2</sup>  
Hamilton Porto Pimenta<sup>3</sup>  
Maximiliano Silva<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho descreve a implantação de uma metodologia experimental, no Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF) da Vale, para avaliação da eficiência de aglomeração a frio de misturas de sinterização. No processo de sinterização, a permeabilidade do leito é fundamental para a velocidade e a intensidade de reações de formação do sinter, fatores que estão diretamente ligados a produtividade do processo e qualidade do aglomerado. A disponibilização de ensaios que permitam avaliar a eficiência de aglomeração a frio de misturas e os efeitos de variáveis de processo sobre a formação das *pseudo-partículas* é fundamental para o desenvolvimento de misturas que resultem em elevada performance do processo de sinterização.

**Palavras-chave:** Aglomeração a frio; Sinter; Permeabilidade; Umidade.

## EVALUATION OF COLD GRANULATION EFFICIENCY OF SINTERING MIXTURE

### Abstract

This paper describes the implantation of the experimental methodology at the Ferrous Technology Center of Vale for evaluation of cold agglomeration efficiency of sintering mixtures. On sintering process, the permeability of the bed is fundamental for the velocity and reactions intensity of sinter formation, factors that will be connected directly with the process productivity and agglomerated quality. The availability of test to measure the cold agglomeration efficiency of sintering mixtures and the effects of process variables on the formation of quasi-particles is fundamental for development of high performance mixtures on sintering process.

**Key words:** Cold agglomeration; Sinter; Permeability; Moisture.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Pesquisador da Gerência de Tecnologia de Processos de Aglomeração – Gerência Geral de P&D de Ferrosos – Depto. Marketing e Pesquisa & Desenvolvimento – Vale;

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Tecnologia de Processos de Aglomeração – Gerência Geral de P&D de Ferrosos – Depto. Marketing e Pesquisa & Desenvolvimento – Vale;

<sup>4</sup> Técnico Metalúrgico, Gerência de Laboratórios, Pesquisa e Desenvolvimento – Gerência Geral de P&D de Ferrosos – Depto. Marketing e Pesquisa & Desenvolvimento – Vale;

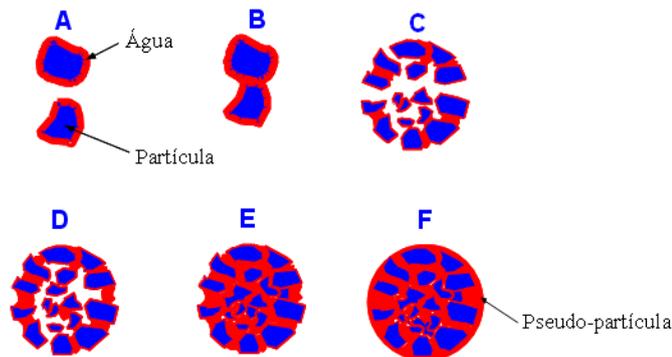
## 1 INTRODUÇÃO

O processo de sinterização propriamente dito é baseado em reações gás/sólido em um leito fixo, onde a permeabilidade do leito é fator determinante da velocidade e intensidade das reações, com impactos diretos sobre a produtividade do processo.

Pode-se entender a permeabilidade como a facilidade que o ar encontra para atravessar o leito do processo de sinterização, sendo que quanto menor for a permeabilidade mais difícil será a passagem através do leito e vice e versa.

A principal função da etapa de aglomeração a frio, no processo de sinterização, é promover a formação e o crescimento de grânulos (pseudo-partículas) a partir da união das partículas dispersas na mistura a sinterizar. O aumento da eficiência de aglomeração a frio resulta em maior permeabilidade do leito e, conseqüentemente, maior produtividade do processo de sinterização.

A Figura 1 apresenta as etapas do processo de aglomeração a frio e formação da *pseudo-partícula*.



**Figura 1:** Etapas do processo de aglomeração a frio – formação da *pseudo-partícula*.<sup>(1)</sup>

A eficiência do processo de aglomeração a frio no processo de sinterização é dependente, além de um bom controle operacional da umidade do processo, das características granulométricas e mineralógicas das matérias-primas, do teor de cal virgem da mistura e da condição de misturamento.

A Nippon Steel Corporation (NSC) desenvolveu uma metodologia para avaliação da eficiência de aglomeração a frio de misturas, denominada Índice de Granulação (*Granulation Index – GI*).<sup>(2)</sup> O índice representa o percentual do material <0,250mm presente na amostra que efetivamente participa da formação dos grânulos (*pseudo-partículas*).

A metodologia foi desenvolvida e implantada a mais de 30 anos no Japão, e, recentemente, foi adaptada e implantada no CTF da Vale.

Para a Vale, a determinação do GI permite gerar conhecimento adicional sobre as propriedades de seus produtos *sinter feeds* e o desenvolvimento e a otimização de misturas de elevado desempenho para seus clientes.

Neste trabalho, é apresentado o estudo para a implantação da metodologia de determinação do GI no CTF, com ênfase nas ações de otimização e padronização do procedimento visando melhorar a repetibilidade e a sensibilidade do método.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Equipamentos e Materiais

Inicialmente, foi projetado um misturador em escala de bancada, com as seguintes especificações:

- diâmetro interno: 240 mm;
- comprimento: 200 mm;
- superfície interna: lisa; e
- material: Aço Inox AISI 307.

O diâmetro do misturador foi calculado à partir da equação 2.1, que é utilizada para o dimensionamento de misturadores industriais, considerando:

- densidade da mistura a sinterizar: 1,75 t/m<sup>3</sup>;
- massa da mistura a sinterizar: 2.400 g;
- fator de ocupação: 15% em volume;

$$FATOR\ DE\ OCUPAÇÃO = \frac{\rho_{MISTURA} * M_{MISTURA}}{\pi * (D_{MISTURADOR})^2 * L_{MISTURADOR}} \quad (2.1)$$

A velocidade de rotação do misturador foi determinada com base em referência das empresas Hitachi/Mitsubshi/Lurgi, equações 2.2 e 2.3:

$$V_{CRÍTICA} = \frac{60}{2\pi} * \sqrt{\frac{2g}{D}} \quad (2.2)$$

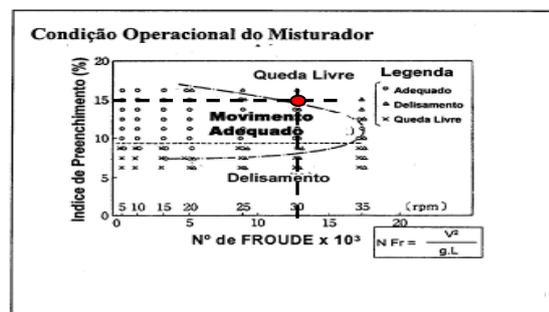
$$N = V_{CRÍTICA} * K \quad (2.3)$$

Considerou-se o valor de k=0,35 por ser este valor de referência para projetos de misturadores industriais, obtendo-se como resultado a velocidade de rotação N=30 rpm.

A Figura 2 apresenta o misturador dimensionado e a condição operacional do misturador em função do número de *Froude*, que depende da velocidade, largura do misturador e sua taxa de ocupação.



(a)



(b)

**Figura 2:** (a) misturador em escala de bancada e (b) condição operacional do misturador.

Além do misturador, foram utilizados os seguintes equipamentos: uma estufa com regulagem de temperatura, com capacidade de aquecimento até 150°C; um quarteador circular de amostras de mesa para 12 incrementos; uma balança analisadora de umidade; um agitador de soluções; seis béqueres de 1L; uma balança de precisão; seis bandejas pequenas, de aço, para receber o material peneirado e ser levada a estufa para secagem; um jogo de peneiras composto por malhas 4,76 mm; 2,00 mm; 1,00 mm; 0,50 mm; 0,25 mm e fundo; um sistema de peneiramento automático com controle de tempo de peneiramento e intensidade de vibração; um sistema de peneiramento tipo DENVER; e um misturador de bancada.

## 2.2 Procedimento Experimental

A Figura 3 apresenta o fluxograma simplificado da metodologia de determinação do Índice de Granulação das misturas a sinterizar utilizada no CTF.

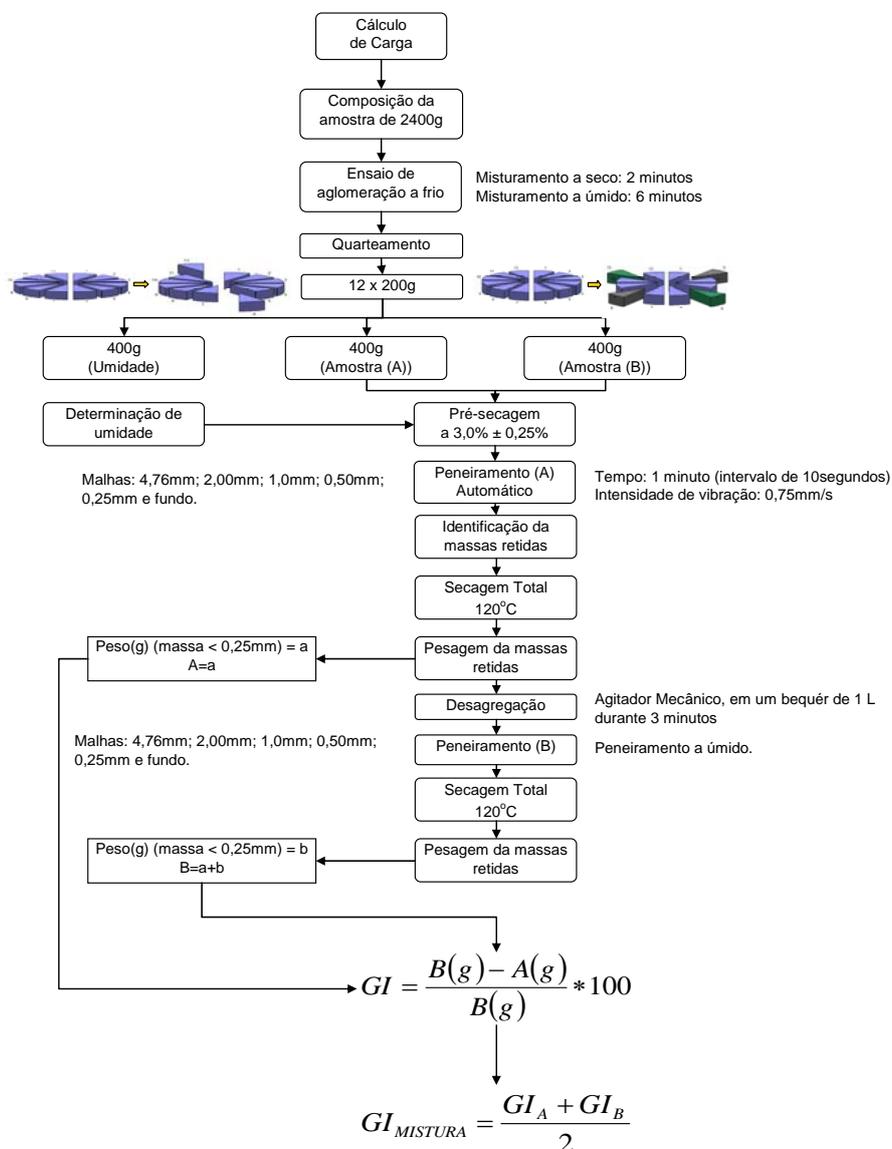


Figura 3: Fluxograma da metodologia de determinação do Índice de Granulação.

### 2.2.1 Preparação da mistura a sinterizar

As misturas a sinterizar são preparadas de acordo com os padrões internos CTF/Vale seguindo as proporções determinadas via cálculo de carga da sinterização.

As matérias-primas participantes das misturas são pesadas individualmente em uma bandeja apropriada e depois compostas, totalizando 2.400 g por mistura. As misturas compostas são colocadas no misturador de bancada para a realização da etapa de misturamento e aglomeração a frio.

Os tempos de misturamento utilizados são de dois minutos a seco e seis minutos após a adição da água (iguais aos tempos utilizados no misturador piloto da sinterização).

A Figura 4 apresenta o carregamento da mistura e a adição da água necessária ao processo de aglomeração de acordo com a finalidade, que também é definida no balanço de massa.



Figura 4: Etapa de carregamento da mistura e adição de água.

### 2.2.2 Amostragem e preparação das alíquotas

As amostras com aproximadamente 2.400 g, após serem submetidas à etapa de aglomeração a frio, são carregadas manualmente em uma bandeja. Após a descarga, o material é levado ao quarteador circular, onde são gerados doze incrementos.

Para verificação da umidade da mistura, 2 (dois) incrementos diametralmente opostos são retirados de cada mistura, formando uma alíquota de aproximadamente 400 g. A Figura 5 apresenta esquematicamente a retirada das amostras.

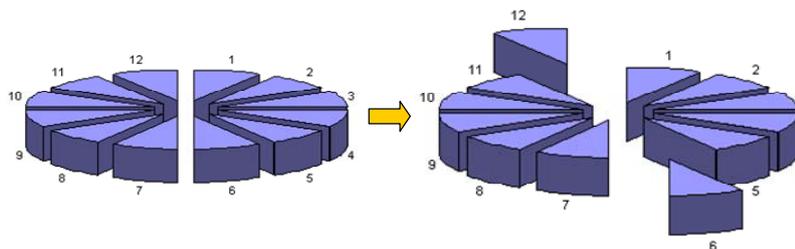


Figura 5: Seleção das alíquotas para análise de umidade da mistura.

O mesmo procedimento é adotado para aquisição das amostras que serão utilizadas para determinação do GI, dois pares de incrementos com cerca de 400g cada, denominados de amostras A e B, respectivamente. A Figura 6 apresenta esquematicamente a retirada das alíquotas.

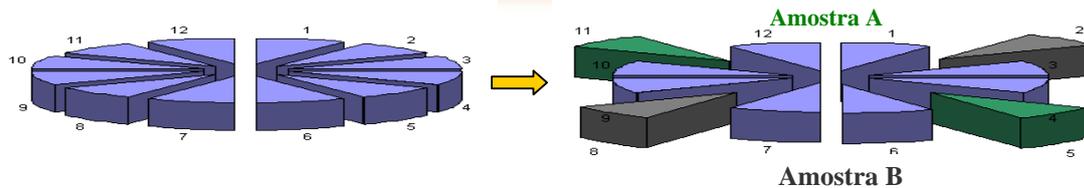


Figura 6: Seleção das alíquotas para os ensaios de determinação do GI.

### 2.2.3 Ajuste da umidade das amostras de 400 g

A umidade das amostras para a determinação do GI precisa ser de  $3 \pm 0,25\%$ . Em função disto, é necessário o ajuste da umidade das amostras para este nível. O ajuste da umidade é para garantir as condições mínimas de peneiramento, sem prejudicar a eficiência do processo e sem descaracterizar a mistura pela destruição das *pseudo-partículas* formadas na etapa de aglomeração a frio.

A umidade inicial das amostras é medida na balança analisadora de umidade. Optou-se pelo uso desse tipo de balança devido à maior praticidade e menor tempo de resposta em relação ao uso da estufa. Após o conhecimento da umidade inicial, a amostra A de cada mistura é colocada na estufa a  $70^{\circ}\text{C}$ , por aproximadamente 15 minutos, para ajuste da umidade. O mesmo procedimento de secagem é realizado para a amostra B de cada mistura.

Após ter atingido a umidade visada, as amostras são deixadas no ambiente para estabilização durante 5 minutos.

### 2.2.4 Massa de material < 0,25mm não aglomerado (peneiramento A)

Após a estabilização, as amostras pré-secas são submetidas ao processo de peneiramento, para classificar as *pseudo-partículas*.

O sistema de peneiramento utilizado permite a variação do tempo, da intensidade e do intervalo de vibração das peneiras sendo que as peneiras vibram de forma intermitente se assim definido, podendo ser definido o número de interrupções. Todos esses parâmetros são ajustados de maneira a garantir o peneiramento, mas sem destruição das *pseudo-partículas*. Das várias condições avaliadas, a melhor condição é obtida com o tempo de peneiramento em 1 minuto com vibração de  $0,75 \text{ mm/s}$  e intervalo de 10 segundos entre as vibrações.

Após o peneiramento, os materiais retidos em cada malha são dispostos em bandejas pequenas de aço para secagem completa. As seis bandejas, contendo o material retido por faixa granulométrica, são levadas à estufa a uma temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$  e por 40 minutos. A Figura 7 apresenta as etapas de carregamento do sistema de peneiramento e as *pseudo-partículas*, já classificadas e preparadas para serem submetidas a secagem total.



Figura 7: Peneiramento e preparação das *pseudo-partículas* para a secagem.

Após a secagem, as massas são pesadas para verificação da quantidade retida em cada faixa granulométrica. A massa correspondente à fração <0,250 mm é identificada como (a).

### 2.2.5 Massa total de material <0,25 mm (peneiramento B)

As *pseudo-partículas* classificadas e secas, com exceção do material <0,250 mm, são submetidas separadamente ao processo de desagregação com o auxílio de um agitador mecânico e béqueres contendo as pseudo-partículas e água. O processo de desagregação tem a duração de três minutos para ambos os béqueres.

Após a lavagem, utiliza-se a mesma sequência de peneiras da etapa de peneiramento A, com exceção do fundo. Nesta etapa, começando sempre da peneira da malha inferior para malha superior, cada fração retida é lavada na respectiva peneira e as inferiores referentes à série utilizada. Lavando-se os retidos com água corrente, são eliminadas as frações finas aderidas no processo de aglomeração a frio.

Após o peneiramento, as séries de peneiras com as partículas retidas são colocadas em estufa a uma temperatura de 120°C, durante 90 minutos. Logo após o processo de secagem, o conjunto de peneiras é exposto ao ambiente durante 20 minutos para estabilização.

Concluída a estabilização da temperatura, as massas retidas são pesadas novamente e a fração <0,250 mm é obtida por diferença da massa inicial, obtida no peneiramento A. As massas calculadas por diferença são identificadas como (b).

A Figura 8 apresenta as etapas de desagregação e peneiramento a úmido das misturas.

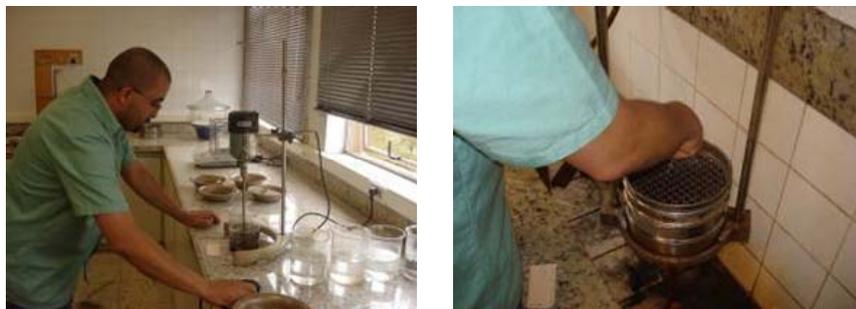


Figura 8: Desagregação e peneiramento a úmido da mistura.

### 2.2.6 Cálculo do Índice de Granulação – GI

Para os cálculos dos valores do GI, é utilizada a equação 2.4.

$$GI = \frac{B(g) - A(g)}{B(g)} * 100 \quad (2.4)$$

Sendo A = (a) → fração < 0,250 mm resultante do peneiramento A.

Sendo B = (a) + (b) → sendo (b) a fração <0,250 mm resultante do peneiramento B.

O valor final do GI de cada mistura é a média aritmética dos valores de GI de duas amostras da mesma mistura.

## 2.3 Verificação da Adequação da Metodologia de Determinação do GI

Para verificação da metodologia em questão, duas misturas de sinterização, de performances conhecidas e muito distintas quanto à capacidade de aglomeração a frio, foram repetidamente avaliadas quanto à eficiência de granulação (GI). Com isso, procurou-se estimar o desvio da medida e estabelecer uma curva de aprendizagem. Com base na experiência obtida, uma série de melhorias foi implementada no método objetivando reduzir a variabilidade entre ensaios.

Posteriormente, após a implementação das melhorias, procurou-se conhecer o efeito da variação da umidade sobre o Índice de Granulação (GI) de cada uma das misturas. As misturas de alto e baixo desempenho foram preparadas variando-se a umidade das mesmas a partir do valor inicial de 3,5%, em intervalos de 0,5%, e medindo-se o Índice de Granulação (GI) correspondente. As misturas denominadas de alto e baixo desempenho receberam estes nomes devido ao desempenho em avaliações na sínter piloto. A umidade máxima testada foi aquela em que ocorreu a queda do desempenho em relação à microaglomeração devido ao colapso das *pseudo-partículas* pelo excesso de umidade.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, o tempo e a intensidade de peneiramento foram determinados de forma a se obter o menor tempo de peneiramento e a menor intensidade de vibração possível, de modo a não danificar a estrutura das *pseudo-partículas* formadas durante a etapa de aglomeração a frio.

Após uma série de análises exploratórias, assim ficaram definidos os parâmetros padrão da etapa do peneiramento A:

- tempo de peneiramento: 1 min, de forma intermitente com intervalos de 10 s a cada acionamento; e
- intensidade de vibração: 0,75 mm/s para amostras de 400 g.

A análise da consistência da metodologia foi realizada com base em uma carta de controle onde foram plotados os resultados de GI de uma série de análises realizadas com a mistura de alto desempenho. A umidade da mistura foi mantida constante em 6,5%. A Figura 9 apresenta os resultados das análises na carta de controle, seguida da amplitude móvel dos dados. A alteração brusca nos resultados, notadamente nas amostras iniciais, deve-se à curva de aprendizado do técnico responsável pelas análises.

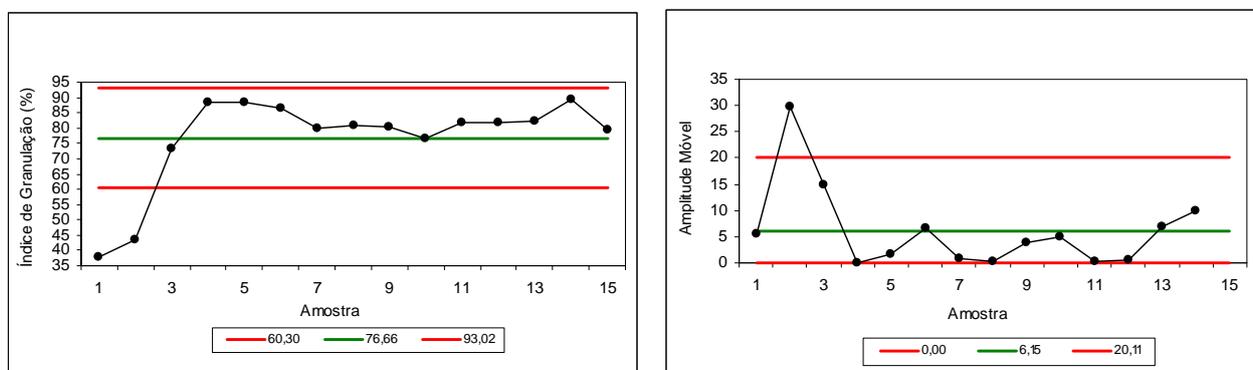


Figura 9: Análise do GI da Mistura de alto desempenho.

Apesar da redução da amplitude entre os resultados, nota-se ainda uma grande dispersão, que, nestes patamares, podem reduzir muito a sensibilidade da metodologia em diferenciar misturas similares.

Ao se analisar mais detalhadamente a execução da metodologia, foram encontradas condições que podem prejudicar muito a repetibilidade dos ensaios e aumentar a dispersão dos dados.

A água era dosada em uma bandeja, o que não colaborava muito para uma boa distribuição e homogeneização da água adicionada, além de aumentar o número de manuseios da amostra, causando sua degradação. Confirmado tal fato, a umidade passou a ser dosada no próprio misturador de bancada para evitar o manuseio e aumentar a homogeneização da água dosada.

Na etapa de quarteamento das amostras, uma distribuição granulométrica das misturas muito ampla pode dificultar o quarteamento da mistura, resultando em massas retidas diferentes em cada recipiente do quarteador.

Devido a esses fatos, optou-se por criar um controle da dispersão dos resultados dos Índices de Granulação das amostras A e B. Inicialmente, foi considerado de forma arbitrária o valor de aceite da análise para um coeficiente de variação (CV) <3,0%. O coeficiente de variação é uma medida estatística de dispersão dos resultados correspondente ao valor do desvio padrão dividido pela média dos dados considerados.

As misturas de alto e baixo desempenho foram analisadas quanto à sensibilidade à variação de umidade. Ambas as misturas foram submetidas à metodologia de determinação do Índice de Granulação (GI) já na sua formulação final, com todas as melhorias já implementadas. Os resultados são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 1:** Resultado da avaliação do índice de aglomeração da mistura de alto desempenho (%)

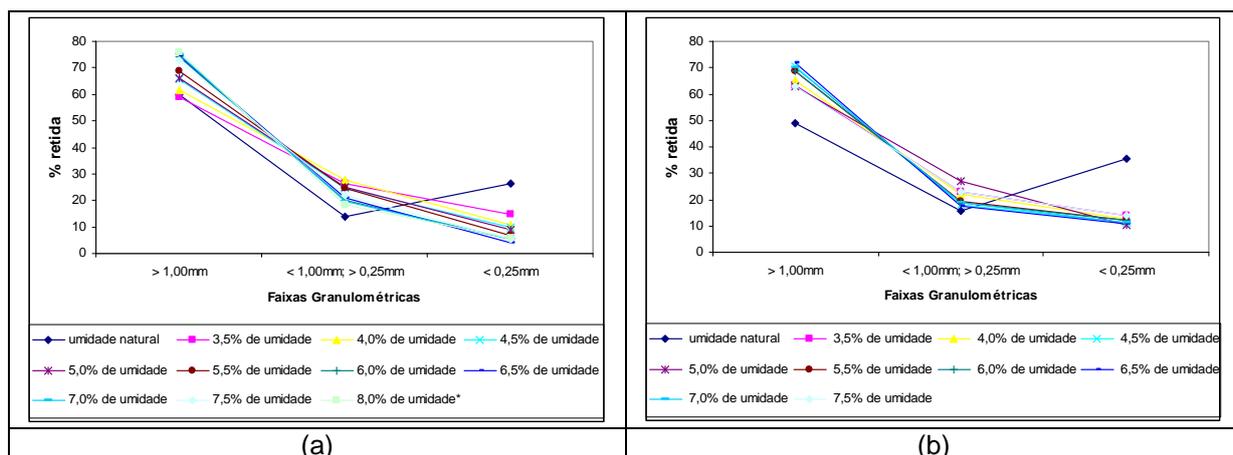
Configurações dos ensaios	>1,00mm	<1,00mm; >0,25mm	<0,25mm	GI <sub>A</sub>	GI <sub>B</sub>	CV	GI <sub>FINAL</sub>
Umidade natural	59,68	13,83	26,48	-	-	-	-
3,5% de umidade	58,91	26,35	14,74	44,77	43,59	1,89%	44,18
4,0% de umidade	61,62	27,58	10,80	53,44	52,29	1,54%	52,87
4,5% de umidade	65,59	24,42	9,99	58,17	56,45	2,12%	57,31
5,0% de umidade	66,06	24,94	9,00	64,03	63,40	0,70%	63,72
5,5% de umidade	68,82	24,50	6,68	71,3	71,38	0,08%	71,34
6,0% de umidade	74,31	20,25	5,44	74,17	74,94	0,73%	74,56
6,5% de umidade	74,85	21,00	4,15	81,85	82,02	0,15%	81,94
7,0% de umidade	74,96	19,78	5,23	79,14	77,03	1,91%	78,09
7,5% de umidade	72,70	21,79	5,51	78,85	77,84	0,91%	78,35
8,0% de umidade*	75,89	18,52	5,59	72,56	-	-	72,56

\* A mistura atingiu o ponto de saturação de umidade dificultando a análise.

**Tabela 2:** Resultado da avaliação do índice de aglomeração da mistura de baixo desempenho (%)

Configurações dos ensaios	>1,00mm	<1,00mm; >0,25mm	<0,25mm	GI <sub>A</sub>	GI <sub>B</sub>	CV	GI <sub>FINAL</sub>
Umidade natural	49,17	15,52	35,47	-	-	-	-
3,5% de umidade	63,39	22,77	13,84	53,47	52,39	1,44%	52,93
4,0% de umidade	65,08	22,18	12,74	58,39	56,73	2,04%	57,56
4,5% de umidade	70,45	18,15	11,40	61,85	60,04	2,10%	60,95
5,0% de umidade	62,74	26,78	10,48	62,50	63,49	1,11%	63,00
5,5% de umidade	68,92	19,15	11,93	62,70	60,71	2,28%	61,70
6,0% de umidade	68,93	18,87	12,20	61,13	61,02	0,13%	61,08
6,5% de umidade	71,87	17,46	10,67	65,00	65,41	0,44%	65,21
7,0% de umidade	70,29	18,67	11,04	67,11	67,6	0,51%	67,36
7,5% de umidade	63,01	23,13	13,86	63,17	61,7	1,66%	62,44

De fato, o efeito da microaglomeração foi observado, pois notou-se, em ambos os casos, a redução da fração <0,25 mm e o conseqüente aumento das frações >1,00 mm e <1,00 mm >0,25 mm. A Figura 10 apresenta a evolução das faixas granulométricas das misturas mediante a elevação da umidade.



**Figura 10:** Faixas granulométricas das misturas de (a) alto e (b) baixo desempenhos.

A mistura de baixo desempenho apresentava inicialmente uma quantidade de material na fração <0,25 mm maior que a mistura de alto desempenho.

Com a elevação da umidade notou-se comportamentos muito distintos das duas misturas. Na mistura de alto desempenho a fração <0,250 mm diminuiu continuamente e de forma significativa com a elevação da umidade, até atingir um valor mínimo a partir do qual quantidades adicionais de água levaram ao comprometimento da consistência das *pseudo-partículas*. Na mistura de baixo desempenho, onde a quantidade inicial de finos é bem maior, a adição de água levou a uma redução na fração <0,250 mm, mas adições posteriores não resultaram em reduções adicionais significativas desta fração.

Este comportamento pode ter sido causado pela relação entre a quantidade de finos presentes (fração <0,250 mm) e a quantidade de cal virgem utilizada para cada uma das misturas. No caso da mistura de alto desempenho essa relação é bem menor que na mistura de baixo desempenho. Acredita-se com isso que no caso

da mistura de baixo desempenho a quantidade de cal virgem adicionada tenha sido insuficiente em relação à quantidade de finos presentes e, neste caso, o efeito da adição de água não é significativamente percebido.

Entretanto, a metodologia do GI apresentou sensibilidade para discriminar as misturas quanto à sua capacidade de aglomeração a frio.

Na Figura 11 observam-se claramente as diferenças entre as misturas no que compete à capacidade de aglomeração, mas, sobretudo, fica clara a diferença do efeito da adição de água na resposta das misturas.

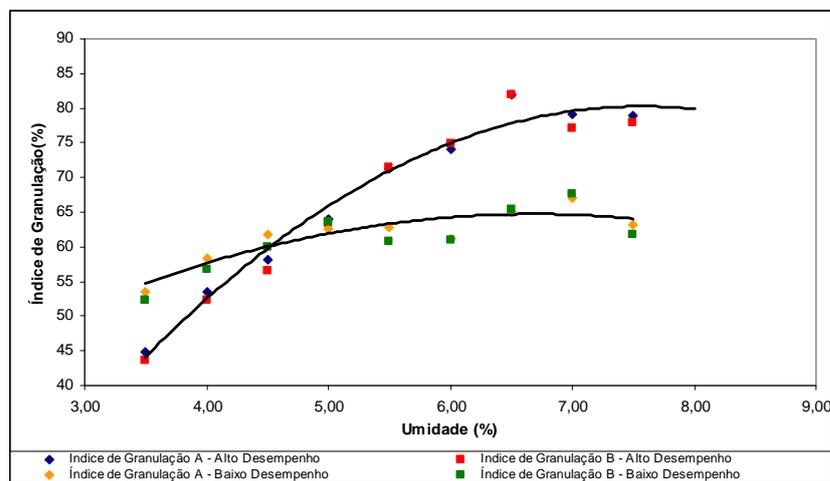


Figura 11: Comparativo entre as misturas de alto e baixo desempenho.

## 4 CONCLUSÕES

A metodologia de determinação do Índice de Granulação (GI) de misturas de sinterização, implantada nos laboratórios do Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale, apresentou boa capacidade de discriminação de misturas quanto à eficiência de aglomeração a frio.

Melhorias implementadas na metodologia, em relação ao ensaio de origem desenvolvido na Nippon Steel Corporation, resultaram em benefícios ao ensaio, tais como: menor complexidade, menor tempo de execução e menor custo.

A utilização do ensaio em futuros estudos permitirá a geração de conhecimentos adicionais a respeito da capacidade de aglomeração dos diferentes minérios de ferro e misturas, essenciais para a obtenção de elevado desempenho do processo de sinterização.

## REFERÊNCIAS

- 1 MEYER, K. *Pelletizing of Iron Ores*, Springer-Verlag Berlin and Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf, Alemanha, 1980.
- 2 FILHO, G. M. A. *Caracterização de Misturas para Sinterização*, Dissertação de Mestrado, UFMG, 1984.