



EFEITO DA ADIÇÃO DE SiO₂ NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E ABRASÃO A QUENTE DE PELotas AUTORREDUTORAS AGLOMERADAS COM CIMENTO PORTLAND*

Alberto Eloy Anduze Nogueira¹

Cyro Takano²

Marcelo Breda Mourão³

Adolfo Pillihuaman Zambrano⁴

Resumo

A pelletização é o método de aglomeração de minério que oferece o melhor custo benefício. No processo, é necessária a adição de um aglomerante para conseguir as propriedades desejadas. Entre estes, o cimento é um dos destaques pela facilidade e custo. A adição de pozzolânicos no concreto na construção civil para o aumento da resistência é de longa data. Neste trabalho, se estuda o efeito da adição de 1% de SiO₂ ou bentonita na mistura das pelotas autorredutoras. Realizam-se ensaios de compressão a frio, compressão após tratamento térmico 950°C, Teste de abrasão a quente, teste de quedas, além de difração de raios-X. Como resultados obteve-se um incremento da resistência a compressão a frio e a abrasão a quente com a adição da bentonita, porém com ambos pozzolânicos tem-se uma perda de 50% na resistência a compressão após tratamento térmico a 950°C.

Palavras-chave: Pelotas autorredutoras; Pozzolânicos; Aglomeração; Abrasão.

EFFECT OF SiO₂ ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND HOT RESISTANCE ABRASION OF SELF REDUCING PELLETS BONDED WITH PORTLAND CEMENT

Abstract

The pelletizing is the method of agglomeration of ore that offers the best cost benefit. In the process, adding a binder to achieve the desired properties is required. Among these, the cement is one of the highlights the ease and cost. The addition of pozzolan in concrete in construction for increased resistance is longstanding. In this paper, we study the effect of addition of 1% of SiO₂ or bentonite pellets in the mixture autorredutoras. Assays were carried out compression, compression after heat treatment to 950°C, the hot abrasion test, falls test, and X-ray diffraction The results gave an increased resistance to cold compression and abrasion hot with the addition of the bentonite, but with both pozzolanic has a 50% loss in compressive strength after heat treatment at 950°C.

Keywords: Self-reducing pellets, Pozzolan; Agglomeration; Abrasion.

¹ PhD em engenharia Metalúrgica e de Materiais, Pesquisador, Escola de Metalurgia e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

² PhD em engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor Associado, Escola de Metalurgia e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

³ PhD em engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor Associado, Escola de Metalurgia e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

⁴ PhD em engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor Associado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O processo de pelletização consiste na aglomeração de finos na forma de esferas da ordem de 8 a 16 mm de diâmetro. Esta operação é feita por rolamento em discos ou tambores rotativos. O princípio está em gerar continuamente uma quantidade de núcleos que são crescidos até o tamanho desejado [1,2].

O cimento Portland é um dos mais importantes materiais de construção. Por definição, é um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer, gesso e adições normalizadas finamente moídas. Aglomerante porque tem a propriedade de unir outros materiais, hidráulico porque reage (hidrata) ao se misturar com água e depois de endurecido ganha alta resistência. Uma reação química está sempre envolvida e formam-se ligações químicas [3].

Pozolânicos são materiais à base de silicato, que reagem com o hidróxido de cálcio gerado por hidratação do cimento para formar materiais de cimento adicionais. O hidróxido de cálcio é responsável por até 25% do cimento Portland hidratado, o CaO não contribui para a resistência ou durabilidade do concreto. Os pozolânicos se combinam com o CaO para produzir hidrato de silicato de cálcio adicional, o material responsável pela aglomeração do concreto. Ao consumir o excesso de CaO aumenta a resistência a compressão e a densidade do concreto [3].

Na figura 1 Tem-se a expansão térmica de algumas das fases polimórficas da sílica, observando-se para algumas uma forte variação volumétrica na faixa de temperaturas entre 100 – 800°C, a qual pode gerar distorções na estrutura no processo de aquecimento [4,5].

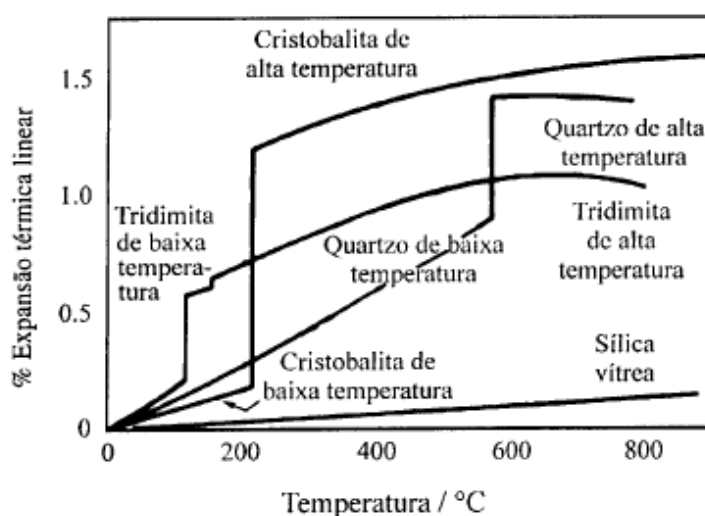


Figura 1. Expansão térmica de algumas das fases polimórficas da sílica [4]

Aumentando a finura e tendo-se uma distribuição de tamanho de partícula mais ampla na matéria prima, resulta em um incremento da resistência mecânica a verde dos aglomerados, o que não se aplica em grande escala na manufatura das pelotas verdes, já que a área de superfície específica da matéria-prima deve de estar na área de pelletização. Esta informação é de grande importância para o controle dos circuitos de pelletização: variações na granulometria da pelota não modificariam apreciavelmente a resistência à compressão úmida verde da pelota, ao passo que a plasticidade verde da pelota é mantida constante através do ajuste do teor de umidade [6,7].

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização Química e Física dos Materiais Empregados

Na continuação são mostradas as características químicas e físicas das matérias primas empregadas.

Tabela 1. Composição do minério de ferro (porcentagem em massa)

Componentes	% em massa	Componentes	% em massa
Fe	65,39	CaO	0,017
FeO	0,22	MgO	0,046
SiO ₂	3,01	TiO ₂	0,077
Al ₂ O ₃	0,77	K ₂ O	-
P	0,027	Na ₂ O	-
Mn	0,274	PF	1,358

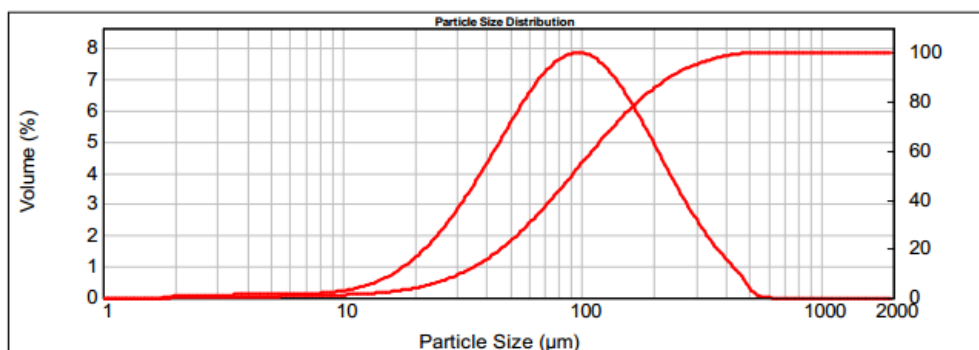


Figura 2. Distribuição granulométrica do minério de ferro (pellet feed).

Tabela 2. Análise imediata do Carvão mineral, porcentagem em massa (ASTM 5142)

Matéria volátil	23.76
Cinzas	10.56
Carbono fixo	65.58

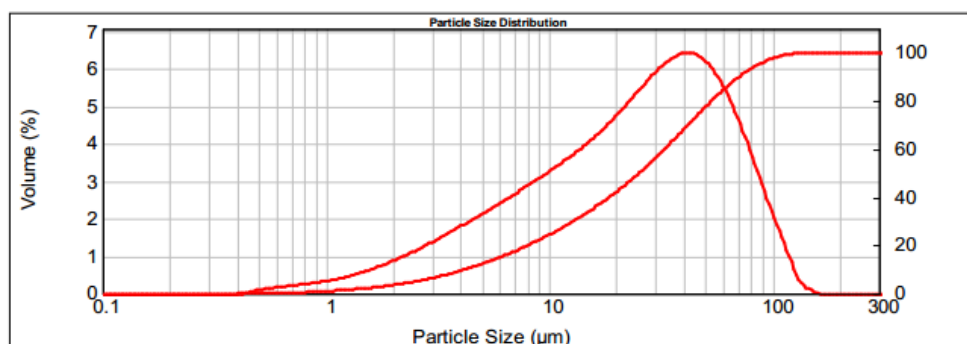


Figura 3. Distribuição granulométrica do carvão mineral (Mina Chipanga).

Tabela 3. Composição do cimento Portland

Componentes	% em massa	Componentes	% em massa
CaO	64,3	K ₂ O	0,7
SiO ₂	19,1	MgO	0,6
Al ₂ O ₃	4,9	Na ₂ O	0,1
Fe ₂ O ₃	2,8	CaO livre	1,0
SO ₂	2,6	outros	4,0

Análises típicas.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Tabela 4. Composição da bentonita

SiO₂	Al₂O₃	Cátions Intercambiáveis
70,2	29,8	Mg+2, Ca+2, Na+1

2.2 Produção das Pelotas Autorredutoras

Para a elaboração das pelotas autorredutoras primeiramente foi realizado o balanço de massa entre os componentes da mistura, utilizando em uma delas só cimento *Portland* como aglomerante (amostra padrão), e nas outras duas, foi adicionada sílica grau analítico e bentonita comercial, para estudar o efeito da adição de estas cargas (tabela 5). As pelotas autorredutoras foram elaboradas em disco pelletizador, e curadas em presença de água durante 30 dias [3].

Tabela 5. Composição das pelotas autorredutoras

Mistura	Minério	Carvão	Min./Carvão	Cimento	Bentonita	SiO ₂
Fe70C20Ci9	70,8	20,1	77,9/22,1	9,1		
Fe70C19Ci9Be1	70,2	19,9	77,9/22,1	9,0	0,9	
Fe70C19Ci9Si1	70,2	19,9	77,9/22,1	9,0		0,9

2.3 Teste de Abrasão a Quente

Para estudar a desagregação das pelotas autorredutoras no forno rotativo, foi feita uma adaptação de uma norma aplicada a pelotas convencionais e sinter de minério de ferro, a norma ISO 3271.

Os testes foram realizados a 950 °C temperatura na qual as ligações hidráulicas do cimento colapsam e simultaneamente a sinterização do ferro é limitada. Trabalhou-se com amostras de 1 kg. A velocidade máxima de giro do equipamento é de 15 RPM sendo que para atingir 200 revoluções são necessários 13 minutos. O diâmetro do tambor é de 500 mm com 6 levantadores. O material previamente desidratado é processado na montagem mostrada na figura 4, Posteriormente é analisado granulometricamente em duas malhas, 6,33 e 0,5 mm considerando-se um valor satisfatório quando a massa testada é maior a 90% retida na malha de 6,33 mm e a quantidade passante em -0,5 mm é inferior a 5%. Durante o processamento, os voláteis e os gases de redução (CO, H₂) são gerados, fazendo-se necessária sua combustão (figura 5). Com este fim o forno vem equipado com um sistema de combustão de gases.

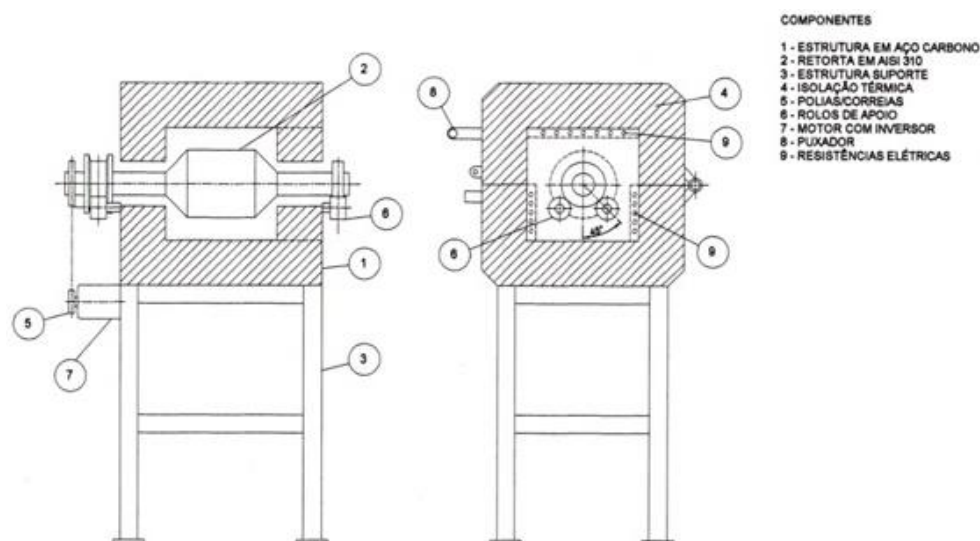


Figura 4. Esquema do forno rotativo para o ensaio de abrasão a quente.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Figura 5. Queima dos voláteis e dos gases de redução durante o teste de abrasão a quente.

2.4 Medida da Resistência à Compressão a Frio e Após o Teste de Abrasão a quente das Pelotas em Estudo

A resistência a compressão a frio e após o teste de abrasão a quente das pelotas foi determinada com ajuda da prensa EMIC, estudando-se o efeito das composições das pelotas, e o tipo e concentração do aglomerante empregado. Para cada valor foram testadas dez pelotas, obtendo-se o erro e a média. Como as pelotas não tem um diâmetro perfeito foram tomadas três medidas de diâmetro perpendiculares entre si por cada pelota, obtida sua media, e levado a um sistema fixo de $D = 15$ mm aplicando (1):

$$\frac{Fr1}{D1^2} = \frac{Fr2}{D2^2} \quad (1)$$

O tempo de cura para cada caso foi superior aos 30 dias, lapso de tempo no qual o cimento *Portland* convencional atinge sua resistência de trabalho [3]. A pesar de estar trabalhando com pelotas autorredutoras e não existir normas específicas para este caso foi levada em consideração a norma ISO 4700 para pelotas convencionais (Fr =Força de ruptura).

2.5 Teste de Quedas.

É aplicado o teste de quedas nas diferentes misturas, o qual consiste em realizar diversos arremessos a uma altura padronizada de 457.2 mm (18 pol) até a ruptura da pelota. São obtidas a media e o erro para cada uma delas. É considerada uma boa resistência quando a pelota suporta mais de cinco quedas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição, Basicidade e Quantidade da Escória para cada Mistura

Na tabela 6 tem-se a Composição, basicidade e quantidade de escória para cada mistura. E notória a quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 presentes no minério e no carvão, dando a escória um comportamento ácido sendo que, no caso da adição de 10% em massa de cimento *Portland*, a basicidade não atinge a unidade ($Bq=0,89$). Na

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



medida em que se adicionam cargas ao cimento contendo sílica, como SiO₂ ou bentonita, a acidez da escória aumenta. A quantidade de escória do processo é importante, pois o aumento desta implica um maior consumo de energia e matérias primas para corrigi-la.

Tabela 6. Composição, basicidade e quantidade de escória para cada mistura (porcentagem em massa).

Mistura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Basicidade Quaternaria	% Escória
Fe70C20Ci9	5.11	1.56	5.91	0.89	12.57
Fe70C19Ci9Be1	5.74	1.83	5.91	0.78	13.48
Fe70C19Ci9Si1	6.11	1.56	5.91	0.77	13.58

3.2 Resistência à Compressão a Frio (ISO 4700)

As resistências à compressão a frio foram obtidas com um tempo de cura superior a 30 dias [3] nos casos das pelotas aglomeradas com cimento (tabela 7). A adição de SiO₂ ao cimento não aumento a resistência a compressão como esperado. A adição de bentonita no cimento aumenta à resistência a compressão a frio.

Tabela 7. Resistência à compressão a frio.

Mistura	Fr 15mm [kgf] (± 10%)
Fe70C20Ci9	3.1
Fe70C19Ci9Be1	4.3
Fe70C19Ci9Si1	3.3

3.3 Resistência a Compressão após o Teste de Abrasão a Quente

Na tabela 8 estão representadas as resistências a compressão a frio e após processamento térmico de cada uma das misturas. De modo geral, a resistência à compressão aumenta em algumas ordens de magnitude após processamento. Os maiores valores foram atingidos com o uso de 9% de cimento, sem adições de outras cargas. É notória a perda de mais de um 50% de resistência após processamento térmico pela adição de sílica e alumina na mistura. Isto provavelmente se deva as fortes variações volumétricas da sílica em função da temperatura [4,5].

Tabela 8. Comparação das resistências a compressão a frio e após processamento das misturas em estudo [kgf] (±10%)

Mistura	Fr 15mm (Frio) [kgf] (± 10%)	Fr 15mm (Proc.) [kgf] (± 10%)
Fe70C20Ci9	3.1	31.2
Fe70C19Ci9Be1	4.3	15.5
Fe70C19Ci9Si1	3.3	12.7

Fe:Minério, C: Carvão, Ci: Cimento, Be: Bentonita, Si: SiO₂.

3.4 Teste de Quedas

Na tabela 9 Tem-se o resultado do teste de quedas para as diferentes misturas. O teste de quedas é um teste simples que permite colher informação da resistência a impacto das pelotas de forma rápida. Se considera uma boa resistência da pelota

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Outro detalhe importante é a formação de compostos do tipo $\text{Fe}_2\cdot\text{SiO}_4$ (Fayalita, do grupo das Olivinas) [8] que pode afetar o rendimento em ferro do processo.

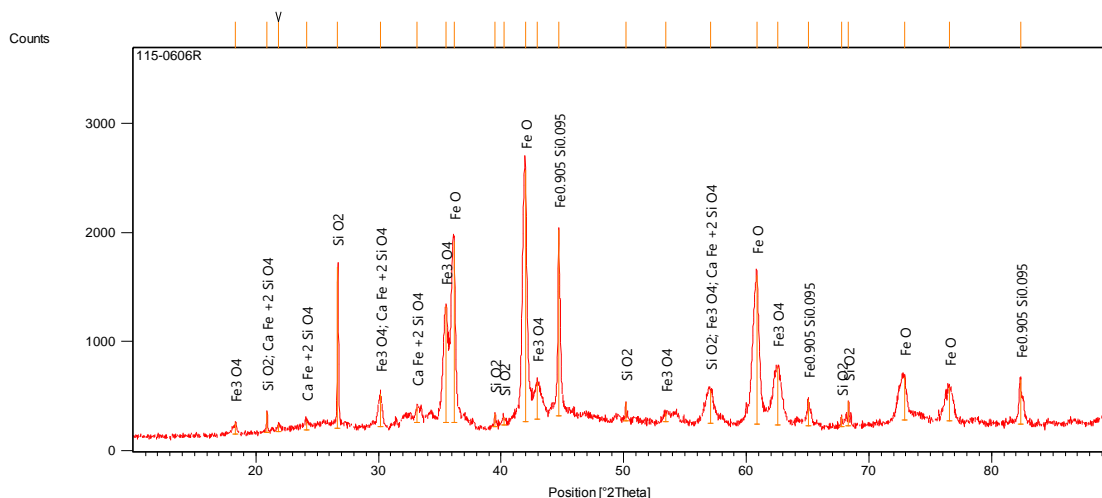


Figura 7. Difração de Raios X das pelotas aglomeradas com cimento *Portland* Com adição de 1% de SiO_2 e processadas termicamente.

Quando se compara as fases da amostra com cimento, com as amostras com adições de sílica ou bentonita, se observa que praticamente possuem as mesmas fases, sendo que a adição de sílica ou bentonita não geram novas fases, o que acontece é que as fases ricas em sílica e alumina aumentam. Por esse motivo, a redução da resistência à compressão após tratamento térmico não esta fundamentada na formação de novas fases, e sim pelo aumento da concentração da sílica, a qual provavelmente reduza a resistência à compressão pela grande variação volumétrica que a sílica sofre no processo de aquecimento [4, 5].

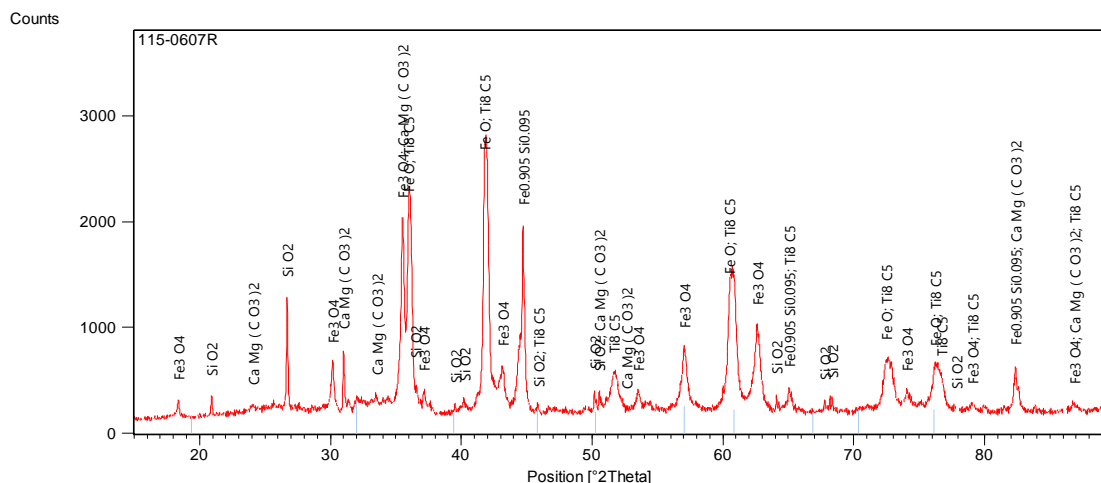


Figura 8. Difração de Raios X das pelotas aglomeradas com cimento *Portland* com adição de 1% de bentonita e processadas termicamente.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



4 CONCLUSÕES

- A adição de SiO₂ e bentonita na mistura reduz a resistência a compressão das pelotas processadas no teste de abrasão a quente em até 50%.
- A adição de SiO₂ e bentonita na quantidade de 1% não geram novas fases na pelota autorredutora.
- As pelotas manufaturadas com 10% de cimento reprovam no teste de quedas com um numero de quedas inferiores a cinco.
- As cinzas do redutor e a ganga do minério transmitem a escória da pelota uma natureza acida de difícil controle.
- A adição de bentonita melhora sensivelmente a resistência à abrasão a quente pela diminuição dos finos.
- A adição de bentonita aumenta a resistência à compressão a frio das pelotas autorredutoras.

Agradecimentos

Agradece-se a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, (FAPESP) processo No. 2011/22544-7, a companhia VALE S.A. e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelos auxílios prestados sem os quais seria impossível realizar este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Mourão M, Takano C, et al. Siderurgia para não siderurgistas. São Paulo: ABM; 2005.
- 2 Kawatra K, Mafra W, Iron ore pelletization. São Paulo: ABM; 2013.
- 3 Associação Brasileira de cimento *Portland*. Guia básico de utilização do cimento Portland. ISBN 85-87024-23-X 7. São Paulo. 2002.
- 4 Marino L, Boschi A. A expansão térmica de materiais cerâmicos parte I: Introdução aplicações e composição de massa. *Cerâmica Industrial*. 1998;3(1/2):17-21.
- 5 Van Vlack L. Propriedades dos materiais cerâmicos. São Paulo: USP; 1973.
- 6 Forsmo S, Samskog P, Björkman B. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. 2008;181:321-330.
- 7 Kawachi S, Kasama S. Effect of Micro-particles in Iron Ore on the Granule Growth and Strength. *ISIJ International*. 2011;51(7).
- 8 Cornelius S, Hurbult J. Manual de mineralogia. volume 2. Rio de Janeiro: Editora da universidade de São Paulo; 1969.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.