

Influência do Teor de Carvão nas Propriedades Físicas e Metalúrgicas das Pelotas de Alto-Forno ⁽¹⁾

Washington Luiz Mafra⁽²⁾
Luiz Fernando Andrade de Castro⁽³⁾

Resumo

O carvão passou a ser usado nos processos de pelotização com o objetivo de se obter uma melhor distribuição de temperatura no interior da pelota durante a queima, assim como, reduzir o consumo de combustível nos fornos. Com isto, obteve-se também uma melhor uniformidade microestrutural, influenciando de forma positiva sobre as propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas de minério de ferro usadas nos altos-fornos.

Neste trabalho foram avaliados os teores de carvão mineral 1,5% e 2,0% sobre as seguintes propriedades das pelotas: compressão da pelota queimada, tamboramento/abrasão, inchamento, resistência a passagem de gás - Delta P, redutibilidade, degradação à baixa temperatura - LTD, porosidade e índice de degradação de redução - RDI.

As pelotas foram preparadas no "Pot Grate" da SAMARCO MINERAÇÃO S/A e utilizou-se o método fatorial de dois níveis no planejamento do teste e análise dos resultados. Foi utilizada ainda a microscopia ótica para auxiliar na interpretação dos resultados.

Analisando o teor de carvão na pelota foi observado que, pelas tabelas de variância e pela microestrutura da pelota queimada, 2,0% de carvão é bastante elevado. Neste nível ocorre uma queda generalizada da qualidade da pelota, devido a redução indesejável da hematita, aumento da porosidade e fragilização da microestrutura. Mesmo considerando alguma influência positiva sobre as reduções de consumo de óleo e energia elétrica, aumento de produtividade e melhoria de pelotamento, 2,0% de carvão é totalmente desaconselhável.

Palavras-chaves: Pelotas, Carvão, Propriedades de Pelotas

-
- (1) Trabalho a ser apresentado no 1º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro : Caracterização, Beneficiamento e Pelotização, Ouro Preto, 14 a 17 de outubro de 1996.
 - (2) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Engenharia de Processo da Samarco Mineração S/A em Ponta Ubu/ Anchieta.
 - (3) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG.

INTRODUÇÃO

O carvão passou a ser usado nos processos de pelotização com o objetivo de se obter uma melhor distribuição de temperatura no interior da pelota durante o endurecimento assim como, reduzir o consumo de combustível dos fornos.

No início foram realizadas experiências numa usina de pelotização no Canadá utilizando-se 1,2% de antracito, obtendo-se os seguintes resultados: aumento de produção em 20%, redução do consumo de combustível e energia dos ventiladores em 15% e melhoria geral das propriedades das pelotas.

Neste trabalho foram avaliados os teores de carvão mineral de 1,5% e 2,0% sobre as seguintes propriedades: compressão da pelota queimada, tamboramento/abrasão, inchamento, resistência à passagem do gás - Δp , redutibilidade, degradação à baixa temperatura - LTD, porosidade e índice de degradação de redução - RDI. Vale ressaltar que o Δp e a redutibilidade são dois dos parâmetros obtidos após o teste de Redução sobre Pressão (R.U.L.). Os teores de carvão a serem pesquisados foram definidos como sendo o médio praticado pela SAMARCO MINERAÇÃO S/A e um valor que acredita-se ser bastante elevado.

A microscopia ótica contribuiu bastante para complementar a análise matemática feita através do método fatorial. Este foi usado no planejamento dos testes e interpretação dos resultados obtidos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando dar maior consistência aos resultados obtidos, faz-se necessário uma breve revisão bibliográfica sobre a influência do carvão sobre as propriedades citadas anteriormente.

Tamboramento / Abrasão

Não houve influência significativa sobre o tamboramento e a abrasão. Conforme a Tabela I houve uma variação média de 96,1% para 95,9% enquanto a abrasão de 3,6% para 3,9%, utilizando-se 0,85% de carvão na mistura. ⁽¹⁾

Compressão

Pela Figura 1 observa-se que, em pelotas feitas com hematita, até 0,5% de C_{fixo} a resistência a compressão aumenta e acima deste valor ela diminui lenta-

(1)

Tabela I - Influência do carvão sobre as propriedades físicas das pelotas

PROPRIEDADES FÍSICAS	PELOTAS COM CARVÃO *		PELOTAS SEM CARVÃO		
	AF	DR	AF	DR	
GRANULOMETRIA -5"/8 + 3"/8	90.1	88.1	82.7	81.3	**
TAMBORAMENTO	95.9	95.9	96	96.3	**
ABRASÃO	3.9	3.9	3.7	3.5	**
COMPRESSÃO	320	333	355	380	***
ÍNDICE Q	95.6	95.5	95.4	95.7	**
PERÍODO PRODUÇÃO	MAIO 80/OUT.81		JAN.78/ABR.80		

* 0.85% CARVÃO NA MISTURA

** VALORES EM %

*** Kg/PELOTA

Influência do Carvão sobre a Compressão e Produtividade

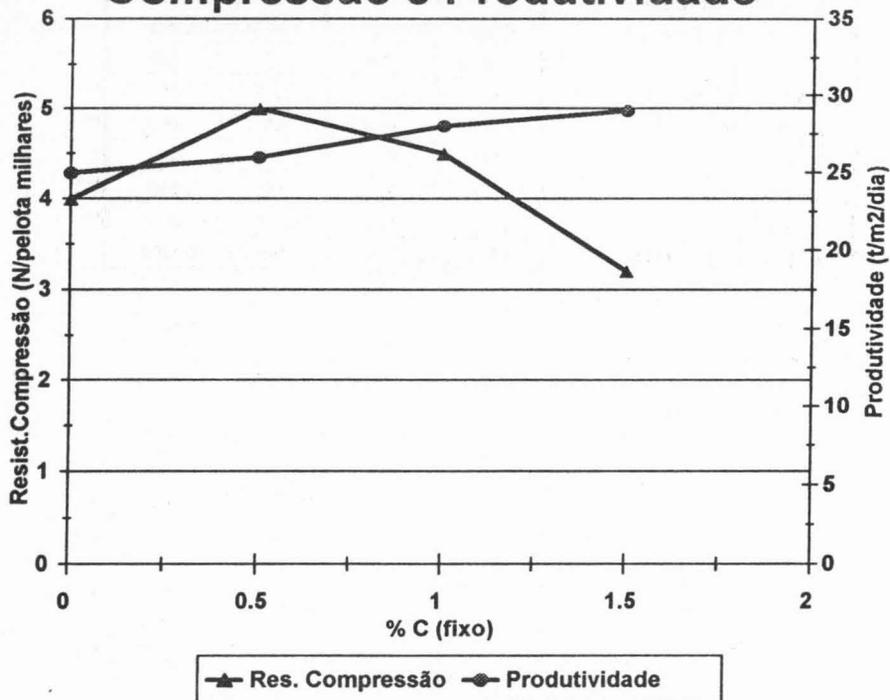


Figura 1 - Influência do Carvão na Resistência à Compressão. ⁽²⁾

mente, podendo chegar até 1,5% C_{fixo} sem grandes prejuízos para a compressão. Esta queda na resistência pode ser explicada pela redução parcial da hematita em magnetita e subsequente reoxidação incompleta da magnetita em hematita. Outra vantagem do uso do carvão, como pode ser visto, é o aumento da produtividade do forno.⁽²⁾

Inchamento

A presença ou não de carvão não influencia no comportamento do inchamento. Conforme pode ser visto na Tabela II esta propriedade esteve dentro do limite máximo permitido⁽¹⁾.

Redutibilidade

Não foi possível encontrar referência na bibliografia sobre a influência do carvão na redutibilidade obtida no teste RUL. Os valores apresentados na Tabela II $dr/dt_{(40)}$ no teste Burghardt - não são consistentes, por isto não foram levados em consideração.

Resistência à passagem do gás - Delta P

A variação do Delta P não é influenciada pelo teor de carvão. Pela Tabela II pode-se observar que a qualidade metalúrgica da pelota não foi comprometida.⁽¹⁾

LTD

Segundo os autores pesquisados, o LTD foi normalmente excelente, exceto em teores de carvão muito elevados. A Figura 2 mostra a variação do LTD com o teor de carvão. Pela Tabela II observa-se que não houve variação substancial dos valores do LTD.^(1,3)

Porosidade

A porosidade é influenciada diretamente pelo teor de carvão. Quanto mais fino for o carvão a ser usado, mais bem distribuído ficará na mistura e haverá uma predominância da microporosidade. Quando a granulometria do carvão é muito grosseira pode ocorrer fusão localizada, reduzindo a porosidade. Pela Tabela II nota-se um aumento nesta propriedade : 25% para 26,3%.^(1,3,4)

Tabela II - Influência do Carvão sobre as Propriedades Metalúrgicas das Pelotas do Alto-Forno de Fire Lake⁽¹⁾

PROPRIEDADES METALÚRGICAS	COM CARVÃO (1)	SEM CARVÃO
REDUTIBILIDADE ISO dR/dT(40)	0.65	0.65
LTBT % + 6.3 mm	97.7	96.2
% - 0.5 mm	2.2	2.8
C.R.M. MODIFICADO		
MÁX. % INCHAMENTO	19.25	19.4
TESTE BURGHARDT		
DELTA P mm W.G.	0.85	0.64
DELTA v %	5.7	4.3
dR/dT(40)	15.5	7.4
POROSIDADE TOTAL	26.3	25.0

Pelotas produzidas entre 28/setembro a 19/novembro de 1991 (1) 0,85% carvão na mistura

Influência do Carvão sobre o LTD

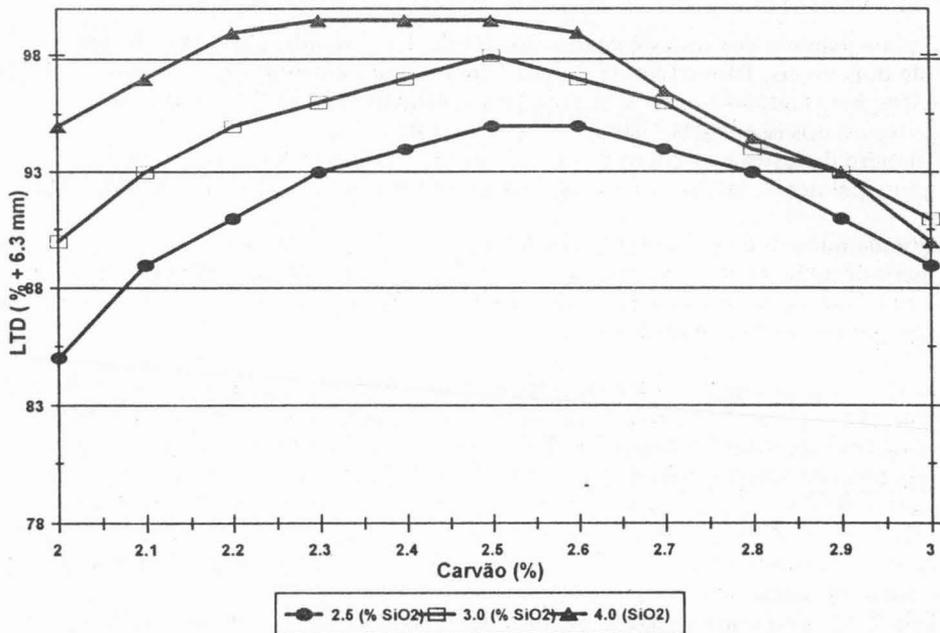


Figura 2 - Influência do Carvão e Sílica no LTD ⁽³⁾

RDI

Não foi possível encontrar bibliografia sobre a influência do carvão no RDI, visto que este teste não é rotina para pelotas de minério de ferro para altos fornos.

METODOLOGIA ⁽⁵⁾

No planejamento dos testes e análise dos resultados, foi utilizado o método fatorial ⁽⁶⁻¹²⁾ de dois níveis. Para o teor de carvão, como foi dito anteriormente, utilizou-se 1,5% e 2,0%. Este método apresenta as seguintes vantagens em relação aos demais:

- a) precisão dos resultados - por ser um método estatístico;
- b) número de testes a serem realizados é bem inferior aos métodos equivalentes ;
- c) principalmente, estabelece o comportamento entre as interações dos fatores estudados;
- d) grande número de informações obtidas na análise dos resultados;
- e) permite uma exploração básica das variáveis dentro de um intervalo de valores (níveis). Talvez a principal limitação deste método seja admitir um comportamento linear entre os níveis estudados.

Quando o número de testes for elevado, pode-se utilizar o fatorial fracionado. Toda a preparação das amostras e testes físicos, químicos e metalúrgicos foram realizados nos Laboratórios da Samarco Mineração S.A. A etapa de microscopia ótica foi realizada no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG. Os testes físicos e metalúrgicos seguiram as normas ISO correspondentes. Os valores de Delta P e $(dR/dt)_{40}$ foram obtidos do teste de Redução sob Pressão (RUL). Considerou-se os teores de carvão 1,5 +/- 0,1% e 2,0 +/- 0,1% para efeito de aceitação da mistura a ser queimada.

A Tabela III apresenta a análise química do minério de ferro e insumos utilizados no testes. As queimas foram realizadas no "Pot Grate" da Samarco Mineração S.A. O sistema de queima é totalmente automatizado, onde um software simula com precisão as condições operacionais do forno de pelotização.

Com a finalidade de contribuir na interpretação dos resultados, utilizou-se a análise microestrutural das amostras. Tomou-se o cuidado de utilizar "cavacos" de pelotas ensaiadas na máquina de compressão. Supondo que para um teor médio de carvão de 1,5% tem-se uma compressão de 253 kg/pelota. Logo, foram utilizados na microscopia "cavacos" de pelotas que apresentaram valores entre 250 +/- 10kg/pelota.

RESULTADOS ⁽⁵⁾

Na Tabela IV tem-se o resumo da análise de variância (para 5% de significância) sobre a influência dos teores de carvão sobre as propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas de alto-forno.

Tabela III - Análise Química e Física dos Constituintes ⁽⁵⁾

	Minério de Ferro	Bentonita	Carvão	Cal Hidratada
% Fe	65.87	6.6	1.14	
% SiO ₂	2.13	57.88	8.17	1.80
% Al ₂ O ₃	0.3	19.44	4.92	
% CaO	0.08	0.36	1.36	68.67
% MgO	0.03	2.66	0.58	0.64
% P	0.05			
P.F.	3.13	7.22	82.08	26.35
% H ₂ O	8.10	12.10	3.20	0.20
- 200 #		98		98
% - 325 #	83.40		53	95
S.E. cm ² /g	1744	5452	4154	11755

Tabela IV - Resumo dos Resultados ⁽⁵⁾

	Carvão
Tamboramento (% +6.3 mm)	-
Abrasão (% - 0.5mm)	+
Compressão (- 16mm + 12.5mm)	-
Compressão (- 12.5mm + 10 mm)	-
Inchamento	NTE
Porosidade	+
(dR/dt)40	NTE
Delta p	NTE
LTD (% + 6.3 mm)	-
LTD (% - 0.5 mm)	+
RDI (% + 6.3mm)	-
RDI (% - 0.5mm)	+

Legenda:

- Efeito Negativo e Significativo 5% (diminui o valor)
- + Efeito Positivo e Significativo 5% (aumenta o valor)
- NTE Não Tem Efeito

Tamboramento / Abrasão

O carvão tem um efeito negativo e significativo sobre o tamboramento (% + 6,3 mm). Conforme as Figuras 3 e 4 pode-se observar um aumento da porosidade. Sobre a abrasão o efeito é positivo e significativo ocorrendo um aumento na % - 0,5 mm.

Compressão

Tanto na faixa + 12,5 mm - 16mm quanto na faixa + 10 mm - 12,5 mm o efeito do carvão é negativo e significativo. Pode-se associar a mesma causa do tamboramento, ou seja, excesso de vazios (aumento da porosidade) e também conforme a Figura 5, a presença de Wustita ou Fe superposto à hematita. Isto deve-se a redução localizada da hematita devido ao CO gerado na queima do carvão.

Inchamento

O carvão não tem efeito significativo sobre o inchamento.

Porosidade

O carvão tem um efeito positivo e significativo sobre a porosidade. Pode-se observar ainda pelas Figuras 6 e 7 que a porosidade da pelota queimada aumenta bastante com o teor de carvão em 2,0%.

Redutibilidade

Os valores de $(dR/dt)_{40}$ foram obtidos após o teste de Redução sob Pressão (RUL). Neste teste obtém-se também os valores de Delta P, $(dR/dt)_{40}$ e contração da amostra. Observa-se que o carvão não possui efeito significativo sobre a redutibilidade.

Delta P

O carvão não possui efeito significativo sobre o Delta P.

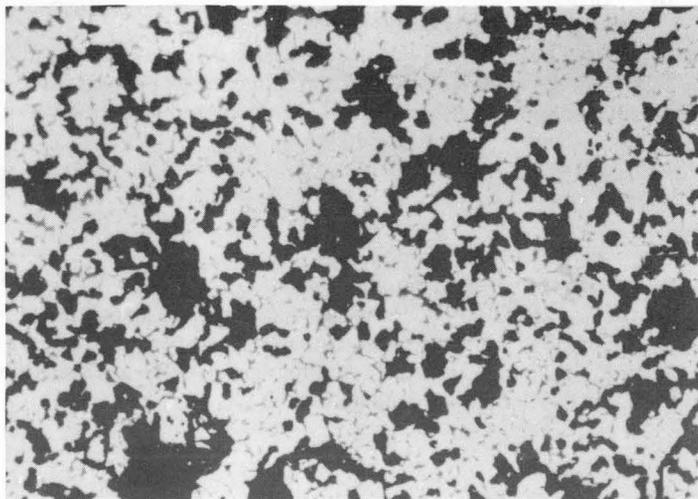


Figura 3 - Microestrutura da Pelota: Amostrá com 1,5% de carvão ⁽⁵⁾

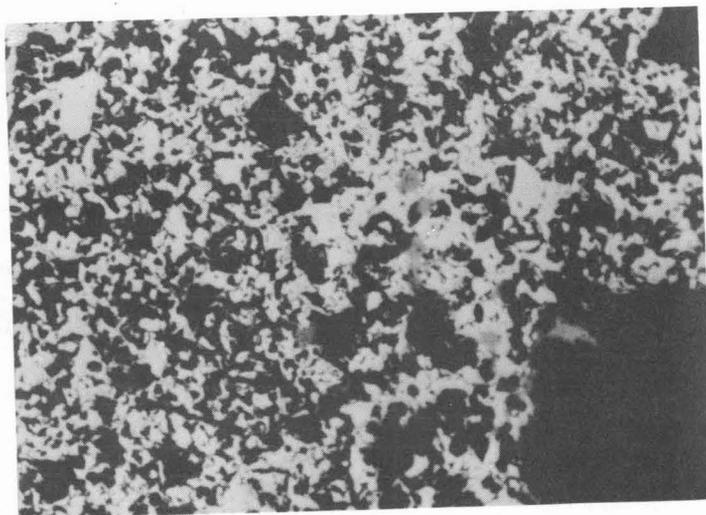


Figura 4 - Microestrutura de Pelota, Carvão a 2% ⁽⁵⁾

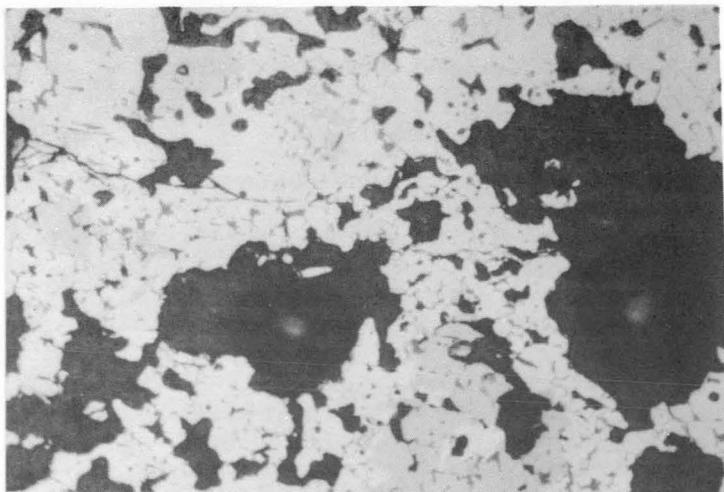


Figura 5 - Microestrutura da Pelota: Placas de Wustita ou Fe superpostas à Hematita (carvão 2%)⁽⁵⁾.

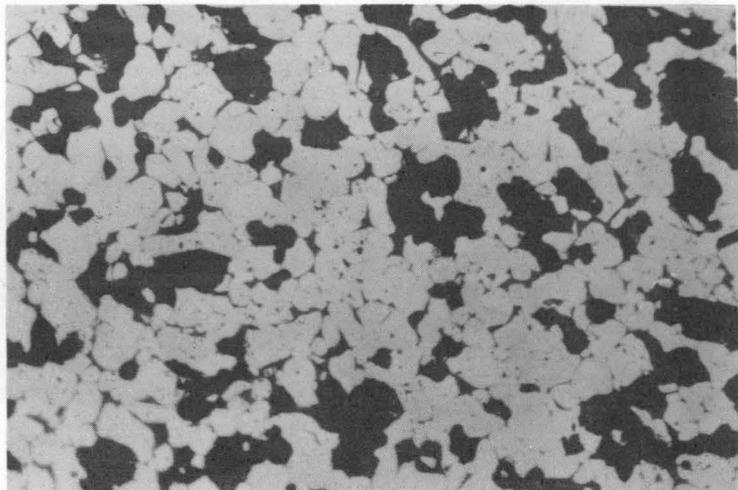


Figura 6 - Microestrutua da Pelota: Amostra com 1.5% de carvão⁽⁵⁾

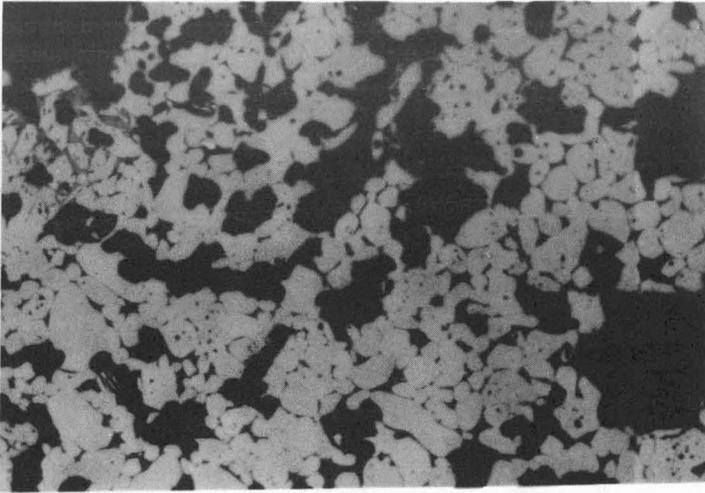


Figura 7 - Microestrutura da Pelota com 2% de carvão ⁽⁵⁾

LTD

O carvão possui efeito negativo e significativo sobre o LTD (%+ 6,3mm), ou seja, ao aumentar-se seu teor para 2,0% a %+6,3mm irá reduzir. Sobre o valor do LTD (%-0.5mm) o efeito é positivo e significativo. A fragilização da estrutura da pelota queimada com 2,0% de carvão, ocorrida pela presença de vazios, wustita e Fe, explica a queda de qualidade da pelota quando se analisa o L.T.D.

RDI

Da mesma maneira que ocorre com o LTD, o RDI (% + 6,3mm) é influenciado negativamente e de forma significativa. Para o RDI (%- 0,5mm) a influência é positiva e significativa. Nos altos-fornos o efeito será uma maior geração de finos durante a redução. Com isto tem-se caminhos preferenciais e marcha irregular.

CONCLUSÃO:

Pode-se observar que as conclusões obtidas através do método fatorial foram coerentes com a bibliografia encontrada e também com as microestruturas analisadas no microscópio. Devido a queda generalizada da qualidade física da pelota queimada não é recomendável utilizar-se 2,0% de carvão na mistura. As economias de combustível e energia elétrica (não foram avaliadas) que certamente ocorrem não compensam o fator qualidade. Pode-se otimizar o teor deste aditivo com o objetivo de obter-se uma dosagem máxima aliada à qualidade física requerida pelos altos-fornos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] DESMEULES, C.. Coke Breeze Addition to Fire Lake Pellets in Regular Operation., **Can. Min. Metal. Bull.**, v.76, n.856, p.01-95, ago.1993.
- [2] MEYER, K.. **Pelletizing of Iron Ores**. Berlin: Springer-Verlag, 1980, 300p.
- [3] HEDGE, V.S., KONG, L.T., PAQUET, G., LU, W-K..Fluxed Pellets with a High Coke Breeze Additions. In: IRONMAKING CONFERENCE, 1990. **Proceedings...**: 1990, p.3-11.
- [4] YANG, Y.H., STANDISH, N..Fundamental Mechanism of Pore Formation in Iron Ore Sinter and Pellets. **ISJJ International**, v.31, n.5, p.468-477, 1991.

- [5] MAFRA, W.L., CASTRO, L.F.A.. *Influência da Temperatura de Queima, Basicidade e Teor de Carvão Sobre as Propriedades Físicas e Metalúrgicas das Pelotas de Alto-Forno.* **Dissertação de Mestrado.** EEUFMG, 1994, 271p.
- [6] GOMES, F.P.. **Curso de Estatística Experimental.** 13ª ed. Piracicaba: Livraria Nobel S.A., 1990, 468p.
- [7] COCHRAN, W.G., COX, G.M.. **Experimental Designs.** 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- [8] MONTGOMERY, D.C.. **Design and Analysis of Experiments.** 1ª ed, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976, 418p.
- [9] DUCKWORTH, W.E. **Statistical Techniques in Technological Research: and Aid to Research Productivity,** 1ª ed. London: Methuen and Company Ltd, 1968, 303p.
- [10] CHATFIELD, C.. **Statistics for Technology. A Course in Applied Statistics,** 3th ed.. London: Chapman and Hall, 1983, 381p.
- [11] VIEIRA, S., HOFFMANN, R.. **Estatística Experimental.** 1ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 1988, 179p.
- [12] DRUMOND, F.B. et al.. **Metodologia de Otimização de Processos.** Belo Horizonte: FAPEMIG, 1993

Influence of coal addition on physical and metallurgical properties of BF pellets

Abstract

The coal addition in pelletizing process had been used to improve the temperature distribution into the pellets during hardening and to decrease the furnace oil consumption. Then, the microstructure of the pellets became more homogeneous and their physical and metallurgical properties got better.

This paper evaluate 1.5% and 2.0% of coal on such iron ore pellets properties: cold compression strength, tumble index/ abrasion, swelling, differential gas pressure - Δp , reducibility, low temperature disintegration - LTD, porosity and reduction disintegration index - RDI.

The pellets were prepared in Samarco Mineração S/A labs and factorial method was used to design the tests and to analyze the results. The optical microscopy was used to support the mathematic analysis.

According to variance tables and burned pellets microstructures, it can be observed that 2.0% of coal is too high. There is a physical quality decrease due undesirable reduction of hematite, porosity increase and brittle microstructure.

Key words: Pellets, Coal , Pellets properties

