

BASICIDADE BINÁRIA COMO PARÂMETRO DE QUALIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE PELOTAS TIPO ALTO-FORNO¹

Washington Luiz Mafra²
Valdirene Gonzaga de Resende³
Maria Beatriz Harmendani Vieira⁴
Aleí Leite Alcântara Domingues⁴

Resumo

As qualidades física e metalúrgica das pelotas para alto-forno e redução direta são fortemente influenciadas pelas características dos minérios utilizados e, de maneira especial, pela basicidade binária, relação CaO/SiO_2 . Este trabalho mostra a influência da basicidade binária sobre a qualidade final de uma pelota de alto-forno produzida pela Vale S.A. As amostras geradas foram caracterizadas conforme os parâmetros físicos e metalúrgicos de rotina e também as propriedades de amolecimento e fusão. Análises microestruturais foram realizadas visando suportar o entendimento das variações de qualidade ocorridas nas diversas amostras. Observou-se que a resistência à compressão apresenta um valor máximo para basicidade em torno de 0,70, reduzindo significativamente em pelotas super ácidas, básicas e auto fundentes. Quanto aos parâmetros metalúrgicos e propriedades de amolecimento e fusão, foi observado um efeito positivo com o aumento da basicidade binária. A caracterização microestrutural das pelotas mostrou um aumento expressivo de macroporos com a elevação da basicidade binária, assim como o grau de maturação. O controle da basicidade binária da pelota se mostrou crítica no desenvolvimento de novos produtos.

Palavras-chave: Pelota; Basicidade binária; Alto-forno; Microestrutura.

BINARY BASICITY AS QUALITY PARAMETER FOR DEVELOPING BLAST-FURNACE PELLETS

Abstract

The physical and metallurgical qualities of pellets for blast furnace and direct reduction processes are deeply affected by iron ore characteristics and, especially, the binary basicity, CaO/SiO_2 ratio. This paper showed the influence of the binary basicity on the quality of fired pellets produced by Vale's pelletizing plant. Fired pellets samples were prepared and evaluated according to usually physical and metallurgical parameters and softening and melting properties. Micro structural analysis was carried out in order to support the understanding of quality variations. It was observed that compressive strength reached maximum value around 0.70 of binary basicity, decreasing significantly for acid, fluxed and self fluxed pellets. It was observed a positive effect of binary basicity on metallurgical, softening and melting properties. Micro structural evaluation showed a significant increase of micro and macro pores. The binary basicity control is a critical issue for developing new pellets.

Key words: Pellets; Binary basicity; Blast furnace; Microstructure.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc.; Vale, Ferrous Technology Center; Membro da ABM, Nova Lima, MG, Brasil.

³ Químico, Dr., Eng. Senior. Vale, Ferrous Technology Center; Nova Lima, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Geólogo, Eng. Pleno. Vale, Ferrous Technology Center, Membro da ABM, Nova Lima, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A basicidade binária (B_2) é um dos parâmetros determinantes da qualidade física e metalúrgica de pelotas de minério de ferro. E por isto, juntamente com o % MgO, é uma variável normalmente considerada nos desenvolvimentos de novos produtos.

Os efeitos destes parâmetros sobre a qualidade da pelota já foram estudados por diversos autores para diferentes tipos de minérios. Costa,⁽¹⁾ por exemplo, baseou seu estudo em minérios hematíticos de maior tamanho de cristal, avaliando as influências de B_2 e dos teores de MgO e SiO_2 sobre as propriedades físicas e metalúrgicas de pelotas. Burghardt e Kortmann⁽²⁾ também avaliaram os mesmos aspectos, mas incluíram parâmetros metalúrgicos importantes para o mercado europeu, como LTD e o RUL, e consideraram, separadamente, dois tipos de minérios, hematítico e magnetítico. Umadevi, Kumar e Lobo⁽³⁾ estudaram a influência da basicidade binária sobre a qualidade e a microestrutura das pelotas, utilizando minérios indianos. Em todos estes trabalhos fica demonstrada a íntima dependência da qualidade da pelota com a basicidade e o tipo e origem dos minérios.

Sendo assim, decidiu-se fazer avaliação similar em planta piloto, mas em condições semelhantes às praticadas na Vale no desenvolvimento de seus produtos, tais como a utilização de minérios hematíticos brasileiros e antracito como combustível sólido.

Nesta avaliação, estudou-se a influência do aumento da basicidade binária sobre a qualidade de uma das pelotas tipo alto-forno produzida pela Vale S.A, e que utiliza minérios hematíticos de menor tamanho de grão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A simulação física foi realizada na planta piloto de pelletização do Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF) da Vale, em Nova Lima, MG.

A mistura de minérios foi coletada industrialmente após a filtragem e, posteriormente, encaminhada para caracterização nos laboratórios do CTF.

Na preparação das misturas foram consideradas as seguintes basicidades binárias: 0,0; 0,3; 0,6; 0,9 e 1,2 e utilizando como fundente um calcário calcítico de Minas Gerais (CCMG). Antracito e bentonita complementam a base de insumos das misturas avaliadas no trabalho. A Tabela 1 apresenta a qualidade das matérias-primas e insumos utilizados no programa de trabalho.

Tabela 1. Qualidade das matérias-primas e insumos

	Unid.	Polpa Minério	CCMG	Antracito	Bentonita
Fe	%	66,23	0,26	5,96	5,14
SiO_2	%	1,93	1,66	55,08	58,30
Al_2O_3	%	0,84	0,51	20,75	14,69
CaO	%	0,02	53,30	3,86	1,75
MgO	%	0,03	0,22	1,04	2,14
P	%	0,041	0,081	0,17	0,040
Mn	%	0,067	0,02	0,06	-
PPC	%	1,52	42,26	81,75	7,50
Cfix	%	-	-	70,93	-
Cinzas	%	-	-	18,25	-
M. Vol.	%	-	-	10,82	-
S.E.	cm ² /g	1670	-	-	
325#	%	-	75,87	-	69,20

O pelletamento foi realizado em disco de 1,0m de diâmetro interno, seguindo procedimentos de rotina da planta piloto de pelletização. As condições de queima foram idênticas para todas as amostras e realizadas no forno piloto (*pot grate*). As misturas foram preparadas considerando 1,20% de carbono fixo.

Na avaliação da qualidade física foram considerados os parâmetros: (i) índice de abrasão/tamboramento (IA/IT - ISO 3271⁽⁴⁾), e (ii) resistência à compressão (RC - ISO 4700⁽⁵⁾).

Na avaliação da qualidade metalúrgica das amostras foram considerados os seguintes ensaios: RDI (ISO 4696-2⁽⁶⁾), redutibilidade relativa (GR - ISO 7215⁽⁷⁾), grau de inchamento (GI - ISO 4698⁽⁸⁾), LTD (ISO 13930⁽⁹⁾), perda de carga (Delta p - RUL ISO 7992⁽¹⁰⁾). Também foram avaliadas as propriedades a altas temperaturas através do ensaio de amolecimento e fusão (A&F). A porosidade total (aberta e fechada) foi medida durante o ensaio de inchamento das pelotas.

A caracterização microestrutural das pelotas foi realizada tendo por base amostras de “pedaços ou cavacos” de pelotas coletadas após o ensaio de resistência à compressão, e que apresentaram valores médios de resistência representativos das amostras. No corte transversal da amostra embutida foram consideradas quatro seções a partir da camada externa: casca, manto externo, manto interno e núcleo (Figura 1).



Figura 1. Desenho esquemático das seções da pelota.

O grau de maturação (GM), conceito adotado no Laboratório de Caracterização de Materiais do CTF, consiste no estágio de desenvolvimento da microestrutura interna no que diz respeito à conformação do grão de hematita, formação da escória inter e intragranulares e distribuição e tamanho dos poros. Este grau de maturação, conforme a classificação adotada, pode ser dividido em quatro níveis: A, B, C, D. Onde o grau A corresponde à pelota com pouca evolução microestrutural e constituída praticamente pela hematita. O grau de maturação D consiste numa evolução microestrutural muito intensa, chegando a ser excessiva. Os graus intermediários (B e C) correspondem às microestruturas de pelotas mais bem desenvolvidas, levando a valores mais elevados de resistência à compressão. Complementando a caracterização microestrutural, foi realizada uma avaliação da porosidade e características dos poros das amostras por porosimetria de Hg, técnica bastante eficiente na medição de porosidade aberta na faixa dos meso e macroporos (30nm a 360µm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Microestrutural

A característica macroscópica das pelotas queimadas foi dependente do seu nível de basicidade. A presença de defeitos macroestruturais, definidos como “trincas

grossas”, aumentou com o aumento de basicidade binária, principalmente acima de 0,6, como mostra a Figura 2.



Figura 2. Presença de “trinca grossa” em função da basicidade binária das pelotas queimadas .

No caso de pelotas de minério de ferro, a causa das trincas ou de defeitos macroscópicos é a existência de um gradiente da taxa de sinterização ao longo do seu raio, e que pode ser induzido por variações na temperatura, no tamanho da partícula ou na quantidade de fase líquida. A quantidade de fase líquida aumenta com o aumento da basicidade binária e, à medida que ela aumenta, aumenta a taxa de sinterização e a probabilidade de ocorrer um gradiente de contração da pelota, gerando um defeito superficial.

A Figura 3 mostra o efeito da basicidade binária sobre o grau de maturação da pelota que é uma medida qualitativa do seu grau de sinterização. Nota-se, que com o aumento da basicidade binária da pelota aumenta também o grau de maturação. Daí, se as condições de temperatura e tempo de sinterização são as mesmas, conclui-se que existe um efeito positivo da basicidade binária sobre o grau de maturação da pelota ou sobre a taxa de sinterização. Isto poderia ter induzido os defeitos macroscópicos discutidos anteriormente.

A Figura 4 mostra as características microestruturais, em uma mesma posição (manto externo), de pelotas com diferentes níveis de basicidade, AF00 e AF12. Nota-se claramente o efeito da basicidade binária sobre a evolução microestrutural das pelotas processadas nas mesmas condições de tempo e temperatura, conforme descrito na Tabela 2.

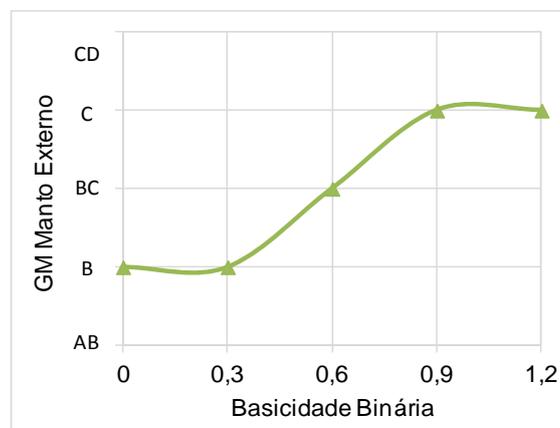


Figura 3. Grau de maturação da pelota queimada no manto externo versus basicidade binária.

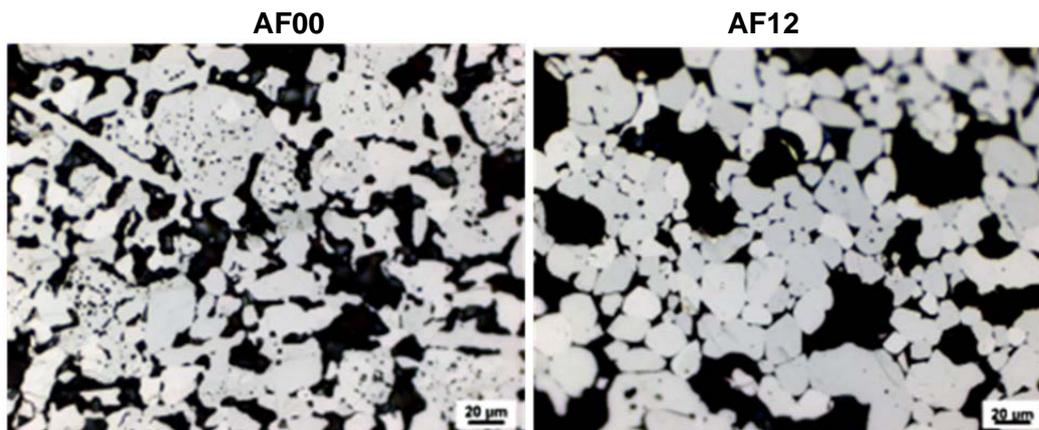


Figura 4. Características microestruturais: manto externo, baixa (AF00) e alta basicidade (AF12).

Tabela 2. Descrição das microestruturas de pelotas de baixa (AF00) e alta basicidade (AF12)

AF00	AF12
<ul style="list-style-type: none"> • Predominam partículas angulosas e distanciadas entre si. • A coesão é dada pelo contato pontual entre partículas, formado pela sinterização das partículas finas intersticiais. • A morfologia original das partículas está preservada, com destaque para as partículas policristalinas. • Ausência da fase escória (silicatos) ou de ferritas. • Predomina a porosidade intersticial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Predominam partículas arredondadas e ajustadas, revestidas e conectadas por fino filme de silicato. • Partículas policristalinas são completamente incorporadas à microestrutura da pelota. • Observa-se maior equilíbrio no tamanho das partículas. • Predominância de poros maiores.

A Figura 5 mostra o efeito da basicidade binária sobre a estrutura de poros das pelotas queimadas em função da basicidade.

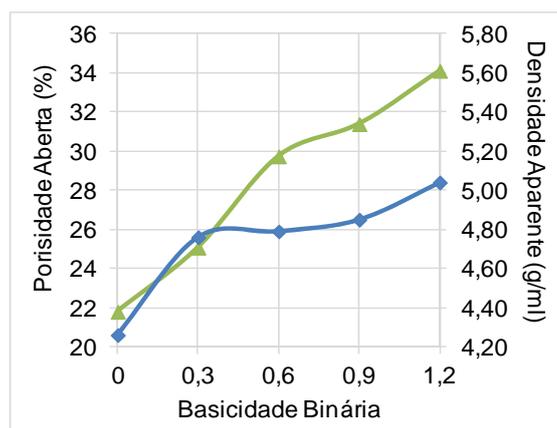


Figura 5. Variação da porosidade aberta e da densidade aparente, medidas em porosímetro de Hg, em função da basicidade da pelota queimada.

A Figura 6 mostra as curvas de distribuição de tamanho de poros e do diâmetro médio dos poros, baseado no volume de Hg injetado, em função da basicidade.

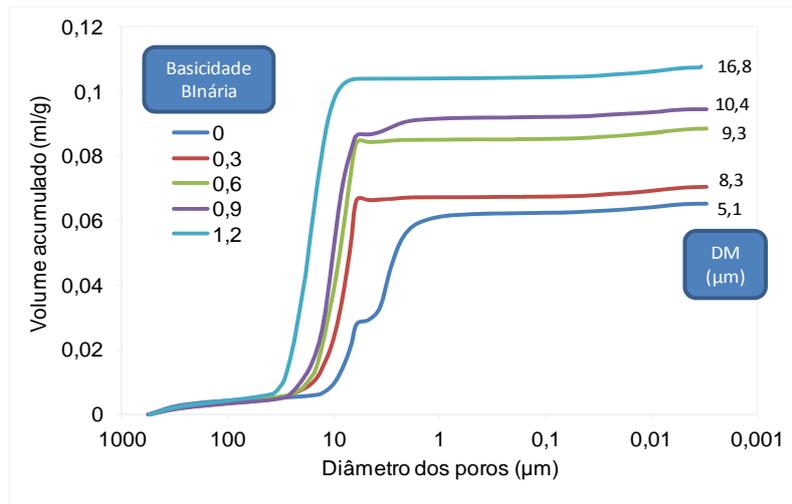


Figura 6. Curvas de distribuição do tamanho de poros e de diâmetro médio de poros em função da basicidade.

Esta evolução da estrutura de poros é característica na sinterização de sólidos de baixa densidade inicial (*“loose powder sintering”*)⁽¹¹⁾, ou seja, a medida que o processo de sinterização evoluiu houve densificação da pelota pela eliminação de poros de menor diâmetro e aumento do diâmetro médio, mas com aumento também da porosidade aberta.

3.2 Qualidade Química, Física e Metalúrgica

A Tabela 3 apresenta a qualidade química das amostras testadas.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os resultados de qualidade física, metalúrgica e amolecimento e fusão das pelotas em função da basicidade binária.

Tabela 3. Qualidade química das pelotas queimadas (%)

Amostra	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	Mn	B ₂
AF00	66,45	2,54	0,98	0,12	0,05	0,041	0,07	0,05
AF03	66,14	2,47	0,95	0,76	0,05	0,038	0,07	0,31
AF06	65,30	2,48	0,93	1,47	0,06	0,045	0,07	0,59
AF09	65,71	2,54	0,97	2,29	0,06	0,044	0,07	0,90
AF12	64,58	2,50	0,96	2,99	0,06	0,047	0,07	1,20

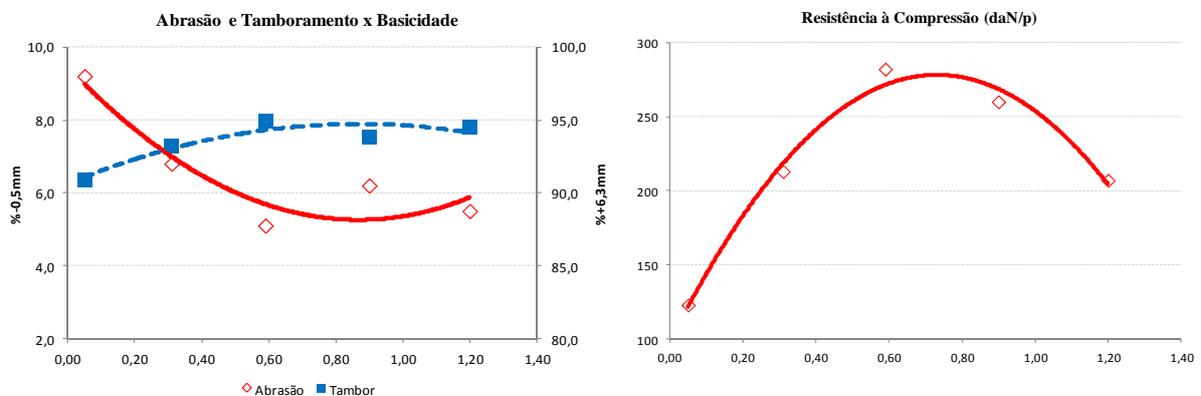


Figura 7. Basicidade binária versus qualidade física.

De acordo com a Figura 7, o aumento na basicidade binária apresentou um efeito negativo sobre IA e, em relação a IT, a influência foi menos significativa exceto para

basicidades muito baixas. Em relação à resistência à compressão, este parâmetro alcança um valor máximo em torno da basicidade binária de 0,7. A porosidade total das amostras não foi influenciada pelo aumento da basicidade binária.

Os efeitos da basicidade binária sobre a qualidade metalúrgica das pelotas são apresentados na Figura 8, podendo se destacar:

- os parâmetros metalúrgicos RDI (%-2,8mm), grau de inchamento e LTD (%-0,5mm) melhoraram com o aumento da basicidade binária; e
- o Δp (RUL) apresentou um ponto de máximo e o grau de redução um ponto de mínimo para uma basicidade binária em torno de 0,4 a 0,5. Isto decorre, provavelmente, devido à maior formação de fase líquida nesta faixa de basicidade. Essa tendência é confirmada nos testes de amolecimento e fusão. (Figura 9).

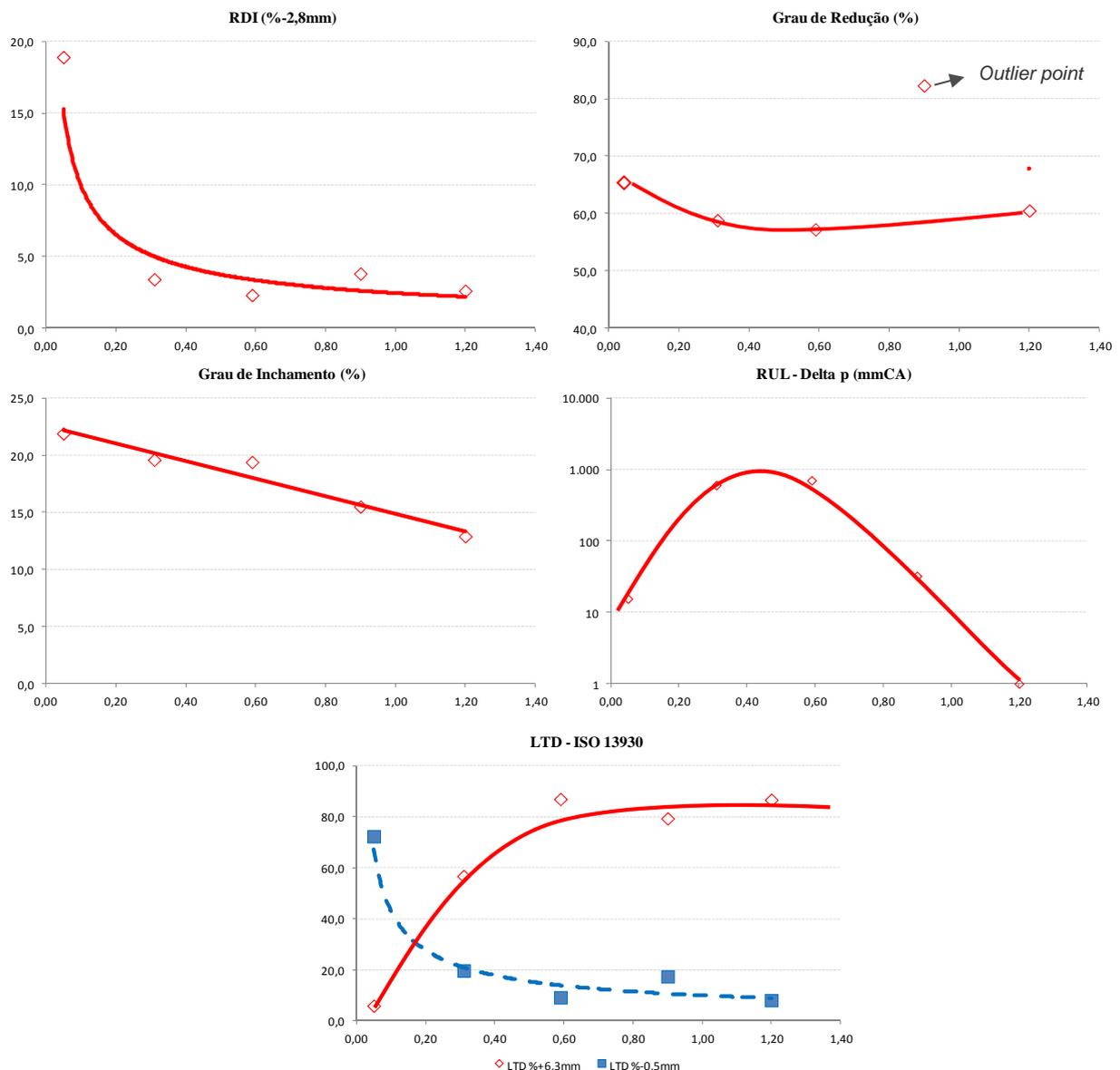


Figura 8. Basicidade binária versus qualidade metalúrgica.

Quanto às propriedades de amolecimento e fusão (Figura 9), o aumento da basicidade binária reduziu a perda de carga do gás, aqui representada pelas áreas

\underline{S} , \underline{s} e o diferencial de pressão máximo – Δp_{\max} , demonstrando melhor permeabilidade do leito. Em relação aos parâmetros T_{s200} (temperatura de início de amolecimento) e R_{s200} (grau de redução em T_{s200}), o aumento da basicidade binária resultou num ponto de mínimo em $B_2=0,4 \sim 0,5$. Ainda, pode-se observar a relação direta e positiva entre T_{s200} e R_{s200} .

Merece ressaltar que a avaliação individual das propriedades de amolecimento e fusão dos constituintes da carga metálica não elimina a necessidade da avaliação destas propriedades na carga metálica completa, pois essas propriedades, de maneira geral, mostram-se aditivas.

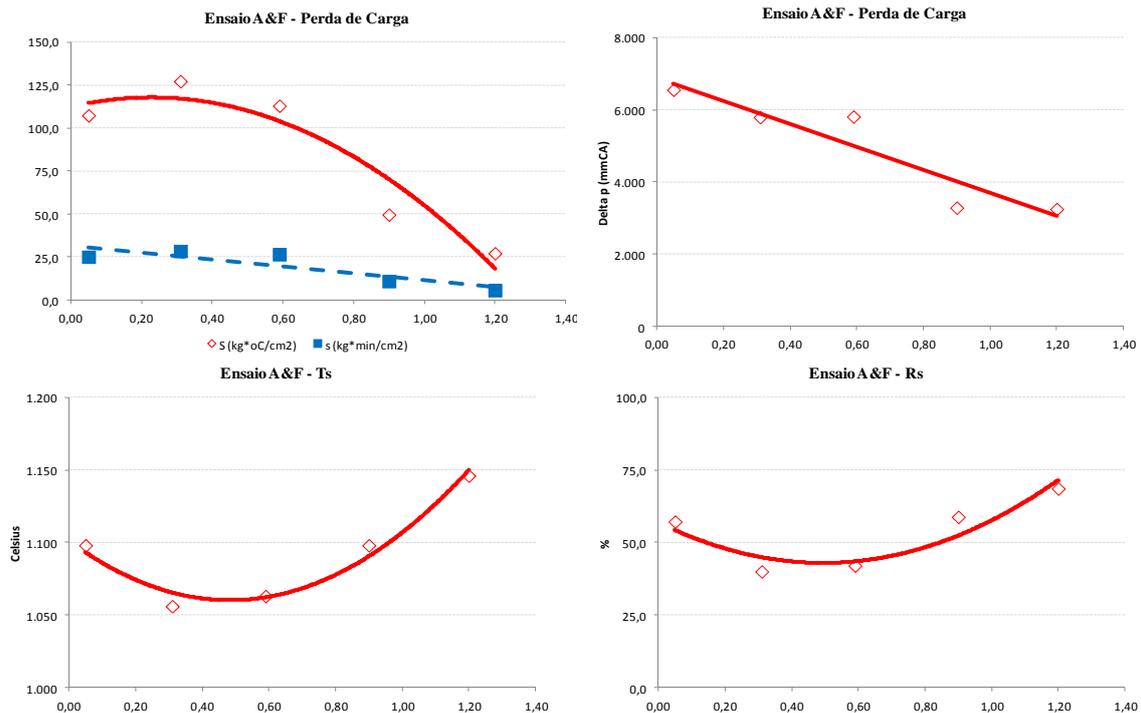


Figura 9. Basicidade binária versus propriedades de amolecimento e fusão.

4 CONCLUSÃO

Os efeitos da basicidade binária sobre as propriedades físicas e metalúrgicas de uma pelota tipo alto-forno da Vale foram investigados por meio de testes em pelletização piloto e ensaios de laboratório. Os seguintes resultados foram obtidos neste trabalho:

- em relação à qualidade física da pelota (IA e RC) os melhores resultados são percebidos para a faixa de basicidade binária de 0,70 a 0,85;
- a porosidade total das amostras não foi influenciada pelo aumento da basicidade binária;
- os parâmetros metalúrgicos RDI (%-2,8mm), grau de inchamento e LTD (%-0,5mm) melhoraram com o aumento da basicidade binária;
- o Δp (RUL) apresentou um ponto de máximo e o grau de redução um ponto de mínimo para uma basicidade binária em torno de 0,4 a 0,5;
- quanto às propriedades de amolecimento e fusão, o aumento da basicidade binária reduziu a perda de carga do gás, representada pelas áreas (S e s) e por Δp_{\max} , demonstrando melhor permeabilidade do leito;

- em relação aos parâmetros T_{s200} (temperatura de início de amolecimento) e R_{s200} (grau de redução em T_{s200}), o aumento da basicidade binária resultou num ponto de mínimo em $B_2=0,4$ a $0,5$;
- assim, considerando a mistura de minérios utilizada no trabalho, a basicidade binária em torno de $0,80$ a $0,90$ é a que resulta, de uma maneira geral, nos melhores parâmetros de qualidade física e metalúrgica; e
- eventuais diferenças em relação aos valores ou tendências obtidas por outros autores podem ser creditadas aos diferentes tipos de minérios e condições de queima consideradas em cada estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 COSTA, M. - Evaluation of the Effects of Binary Basicity, SiO₂ and MgO Content on the Quality of Blast Furnace Pellets., *NSC-CVRD Cooperative Works, Phase VI Part III, Final Report*, Feb, 2003.
- 2 BURGHARDT, O.P.; KORTMANN, H.A. - Possibility of Influencing the Quality of Iron Ore Pellets, *Soc. of Mining & Eng – AIME, AIME Annual Meeting*, New York, Feb. 14-20, 1975.
- 3 UMADEVI, T.; KUMAR, P.; LOBO, N.F. et al. - Influence of Pellet Basicity (CaO/SiO₂) on Iron Ore Pellet Properties and Microstructure, *ISIJ Inter.*, Vol. 51, pp. 14-20, 2011.
- 4 ISO 3271. 2007. Iron ores for blast furnace and direct reduction feedstocks - Determination of the tumble and abrasion indices.
- 5 ISO 4700. 2007. Iron ore pellets for blast furnace and direct reduction feedstocks - Determination of the crushing strength.
- 6 ISO 4696-2. 2007. Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by static method - Part 2: Reduction with CO and N₂.
- 7 ISO 7215. 2007. Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of the reducibility by the final degree of reduction index.
- 8 ISO 4698. 2007. Iron ore pellets for blast furnace feedstocks - Determination of the free-swelling index.
- 9 ISO 13930. 2007. Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by dynamic method.
- 10 ISO 7992. 2007. Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of reduction under load.
- 11 R.M. German, *Sintering Theory and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., 1996, pg. 153.