

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CALCÁRIO E CARVÃO NA QUALIDADE FÍSICA E METALÚRGICA DAS PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO¹

Fernando Oliveira Boecha²

Priscilla Messias Pereira³

Heidy de Oliveira Simões⁴

Vinicius Perin Passigatti⁴

Daniel Magnago⁵

Ana Maria Guilherme Bailon⁵

João Luiz Moreira⁵

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência da distribuição granulométrica do carvão e calcário na qualidade física e metalúrgica das pelotas de minério de ferro. Para isso, foi realizado um projeto de experimento aplicado à produção de pelotas para alto forno com basicidade de 0,80 em escala de laboratório. Foram realizados pelotamento e queima das pelotas em escala piloto. Foram analisados como variáveis resposta os ensaios físicos de tamboramento e compressão, e os ensaios metalúrgicos de inchamento e redutibilidade. Para análise mais detalhada, foi feita micrografia possibilitando entender como os parâmetros estudados afetam na formação de magnetita residual (que acabou por impactar na resistência da pelota). Com base nestes resultados, estabeleceram-se limites para os parâmetros de controle, objetivando assim ganhos em termos de resultados de qualidade física e metalúrgica da pelota queimada.

Palavras-chave: Distribuição granulométrica; Insumos; Qualidade; Pelota Queimada.

INFLUENCE OF COAL AND LIMESTONE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION IN THE PHYSICAL AND METALLURGICAL QUALITY OF IRON ORE PELLETS

Abstract

This study aimed to investigate the influence of particle size distribution of these intakes on physical and metallurgical quality of iron ore pellets. It was conducted a design experiment applied to production of blast furnace pellets with basicity of 0.80 in laboratory scale. Balling and firing stage were performed in a pilot scale. The physical test of tumble index and compression strength, as well as metallurgic test of swelling and reducibility, were analyzed. Micrograph analysis was used to understand the effect of residual magnetite in the resistance of iron ore pellets. Based on these results, control limits parameters were established to obtain better metallurgical and physical quality in fired pellet.

Key words: Particle size distribution; Intakes; Quality; Fired pellets.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Engenheiro de Produção, Engenheiro de processo da Ger. de Eng^a de Processo e Automação, Samarco Mineração, Unidade de Ponta Ubu, ES.

³ Engenheira de Minas, Engenheira de processo da Gerência de Produção, Samarco Mineração, Unidade de Ponta Ubu, ES.

⁴ Graduando em Eng^a de Metalurgia, Técnico de processo da Ger. de Eng^a de Processo e Automação, Samarco Mineração, Unidade de Ponta Ubu, ES.

⁵ Graduando em Eng^a de Metalurgia, Laboratorista da Ger. de Eng^a de Processo e Automação, Samarco Mineração, Unidade de Ponta Ubu, ES.

1 INTRODUÇÃO

Dentro de uma usina de pelletização de minério de ferro existem insumos importantes para a produção de pelotas, que afetam tanto a produtividade das plantas como a qualidade física e metalúrgica final. Dentre este insumos, destacam-se o carvão e o calcário, cujas as características de suas curvas de distribuição de tamanho das partículas tem sido foco de estudos que visam identificar o efeito deste parâmetro na qualidade física das pelotas de minério de ferro.^(1,2)

O carvão é usado como fonte energética na produção de pelotas de minério de ferro no processo de endurecimento, de forma a reduzir o consumo de óleo combustível no forno. Além de ser um importante fator energético, o carvão proporciona uma perfeita distribuição de calor na pelota durante a etapa de queima⁽³⁾ (Figura 1), contribuindo para uma melhoria na qualidade física da pelota, assim como aumento de produtividade do processo. O carvão adicionado também contribui na formação de poros nas pelotas em virtude da liberação de gás durante a queima.

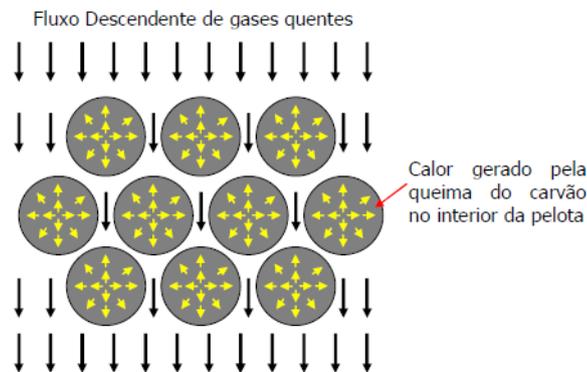


Figura 1. Fluxo de calor através do leito de pelotas.⁽³⁾

Fonseca et al.⁽³⁾ mostraram que um aumento da dosagem de carvão utilizada na mistura das pelotas afeta a resistência física das pelotas queimadas devido às partículas de carvão presentes na mistura ser consumidas pela queima no forno de pelletização, deixando poros na estrutura, reduzindo assim a resistência física da pelota queimada. Além disto, o excesso de energia térmica favorece a formação de magnetita. Isso provoca a mudança de estrutura cristalina, induzindo conseqüentemente à formação de trincas e ao crescimento das partículas de minério, fazendo com que a estrutura final fique susceptível a elevadas tensões internas, enfraquecendo a mesma.

O calcário é adicionado na pelota visando à neutralização da ganga ácida, influenciando na temperatura de formação das fases líquidas durante a etapa de queima no forno de pelletização e com efeito marcante sobre as características físicas e metalúrgicas das pelotas de minério de ferro produzidas. O CaO reduz a temperatura de formação da primeira fase líquida, permitindo a formação de silicato de cálcio, de baixa viscosidade, o qual penetra nos poros abertos formados pela combustão do carvão e decomposição do carbonato (CaCO_3). Isso reduz a porosidade e aumenta a resistência à compressão das pelotas queimadas.⁽²⁾

Sem adição de CaO as pelotas praticamente permanecem sem a formação de magnetita até a temperatura de 1.400°C (curva-I da Figura 2). O aumento no teor de CaO nas pelotas favorece a transformação da hematita em magnetita (curvas II, III e IV da Figura 2). Segundo Meyer⁽⁴⁾ este fenômeno é explicado pelo aumento da temperatura dentro das pelotas, devido ao calor exotérmico de formação das cálcio-

ferritas e seu adicional calor de fusão, o que trás um superaquecimento do núcleo da pelota para temperaturas superiores a 1.400°C, levando à formação da magnetita. O calor exotérmico causado pela formação da ferrita pode levar a um superaquecimento e amolecimento do núcleo da pelota e a formação de uma estrutura vítrea por onde, durante o resfriamento, a reoxidação é impedida. Ainda segundo Meyer⁽⁴⁾ esta tendência de formação de magnetita das pelotas que contêm elevado valor de CaO pode ser reduzida através do abaixamento da temperatura de queima.

Em seu estudo, Costa⁽²⁾ verificou que o teor de CaO e outros fatores tem influência significativa na resistência à compressão a friodas pelotas queimadas.

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência da distribuição granulométrica do calcário e do carvão na resistência física e metalúrgica da pelota queimada, avaliando a relação da formação de magnetita residual podendo assim definir os parâmetros de controles a serem seguidos na moagem destes insumos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização dos ensaios foram coletadas amostras de carvão e calcário brutos (antes da moagem). Sua cominuição foi realizada em laboratório de forma a garantir diferentes níveis de distribuições granulométricas.

As distribuições granulométricas foram alcançadas através da cominuição dos materiais em moinho de bolas de laboratório com diametro de 240 mm e 390 mm de profundidade. Foram utilizadas bolas de 35 mm a 50 mm com uma proporção de 60% de bolas superiores a 45 mm e 40% inferiores a este tamanho. A amostra foi submetida à moagem por tempo determinados até obtenção da granulometria desejada à uma rotação de 39 rpm. Para cada insumo foram obtidas três diferentes níveis de granulometria A Tabela 1 apresenta a caracterização das amostras de calcário e carvão obtidos após a etapa de moagem.

Tabela 1. Caracterização das amostras de calcário e carvão

	Calcário Calcítico			Carvão Mineral		
	FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO
+100# (149 µm)	1.0	6.0	14.4	6.5	16.0	22.5
- 325# (44 µm)	74.8	58.0	47.4	72.0	56.0	42.5
SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (cm ² / g)	5973	3733	2613	6667	5714	3478

Para comprovar a mudança de distribuição granulométrica, foi realizado o teste em granulômetro a laser (Mastersizer 2000). Pela Figura 2 percebe-se que a moagem possibilitou uma perfeita distinção em toda a curva da distribuição do carvão e do calcário, respectivamente. Ou seja, todas as faixas granulométricas foram alteradas.

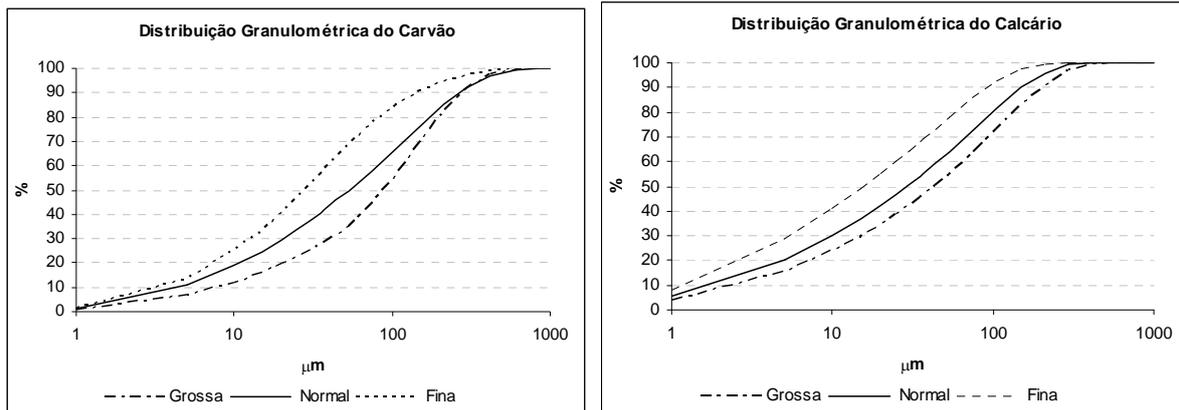


Figura 2. Resultado de distribuição granulométrica passante do carvão e calcário.

O *pellet feed* utilizado nos testes foi coletado diretamente no processo produtivo após a etapa de filtragem sendo um minério de qualidade química e com a granulometria descrita na Tabela 2. Como não foi avaliada a etapa de pelotamento, o mesmo material foi utilizado para todos os ensaios.

Tabela 2. Caracterização do *pellet feed*

Pellet feed utilizado	
	PRENSADO
% SiO₂	1.42
Al₂O₃	0.43
CaO	0.21
-325# (44 µm)	87.4
SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (cm² / g)	1754

Foi utilizado o minério de ferro com a fração menor que 325# e superfície específica grosseira (87,4% e 1.754 cm²/g respectivamente).

A Tabela 3 mostra as condições utilizadas para todos os testes de pelotamento. No laboratório a taxa de alimentação da mistura foi mantida constante, assim como a velocidade de rotação e inclinação dos discos piloto. Foi definida para este estudo a pelota padrão para alto-forno.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no pelotamento

PARÂMETROS DO TESTE	
UMIDADE PF	10.0%
DOSAGEM DE BENTONITA	0.400%
DOSAGEM DE NaOH	0.029%
ROTAÇÃO DO DISCO	15 rpm
DIAMETRO DO DISCO	60 mm
INCLINAÇÃO DO DISCO	45°

Outro ponto a ser observado, é referente à dosagem de carvão adicionado a mistura a pelotar. Já é de conhecimento, com base em estudo anterior,⁽³⁾ que a dosagem de carvão tem grande influência na qualidade física da pelota queimada. Para evitar

a influência deste parâmetro nos resultados, foi utilizada uma dosagem fixa, sendo considerada em trabalhos futuros esta interação.

Os testes foram realizados de modo a avaliar o desempenho das amostras com as diferentes granulometrias obtidas de acordo com o experimento fatorial completo de dois fatores (calcário e carvão) e três níveis (Granulometria fina, média e grossa) com réplica.

As misturas foram mantendo-se a dosagem fixa de todos os insumos e submetidas a queima no forno piloto utilizando perfil térmico padrão com ritmo de produção anualizado. A camada de fundo e camada total de pelotas foram mantidas constantes. As pelotas queimadas obtidas foram avaliadas em termos de resistência física (compressão - ISO4700⁽⁵⁾ e tamboramento - ISO3271⁽⁶⁾), de qualidade metalúrgica (Redutibilidade - ISO7215⁽⁷⁾ e Inchamento - ISO4698⁽⁸⁾) e da caracterização em microscopia ótica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as amostras analisadas atingiram temperaturas satisfatórias, cerca de 1.350°C na camada inferior durante a etapa de queima no forno piloto.

Em termos de química da pelotas produzidas não foi encontrado nenhuma variação significativa que pudesse impactar nos resultados. Para análise física das pelotas queimadas foram realizados testes de compressão (fx: -16,0 +12,5 mm) e tamboramento.

Para melhor entender os resultados foi utilizado o *software* estatístico MiniTab utilizando nível de significância de 10%. Através da análise do experimento fatorial não foi encontrada nenhuma significância entre os resultados de tamboramento e a variação da distribuição granulométrica do carvão e do calcário.

Por outro lado, o resultado de compressão mostrou influência da granulometria do calcário, carvão e da interação calcário e carvão com um poder de explicação do resultado de 69,8% (R quadrado ajustado). Analisando o efeito da granulometria do calcário percebe-se que as pelotas produzidas com a granulometria média tendem a ter melhores resultados de qualidade física, o que representa que este seria um “ponto ótimo” para este insumo.

Para analisar a interação entre os dois fatores foi utilizada a superfície de resposta. A Figura 3 mostra como a compressão tende a ter valores maiores com o aumento do nível de superfície específica do carvão. Este aumento tende a reduzir o efeito negativo da queda da superfície específica do calcário. Entretanto um aumento acima de aproximadamente 5.500 de superfície específica não traria um ganho nos valores de compressão. Utilizando a fração maior que 100# para análise, percebe-se que a compressão tende a reduzir com valor superior a aproximadamente 11% maior que 100# para o carvão e que o valor do calcário deveria estar entre 6% e 11% aproximadamente.

Interação da Compressão com a Superfície específica e a Fração maior que 100#

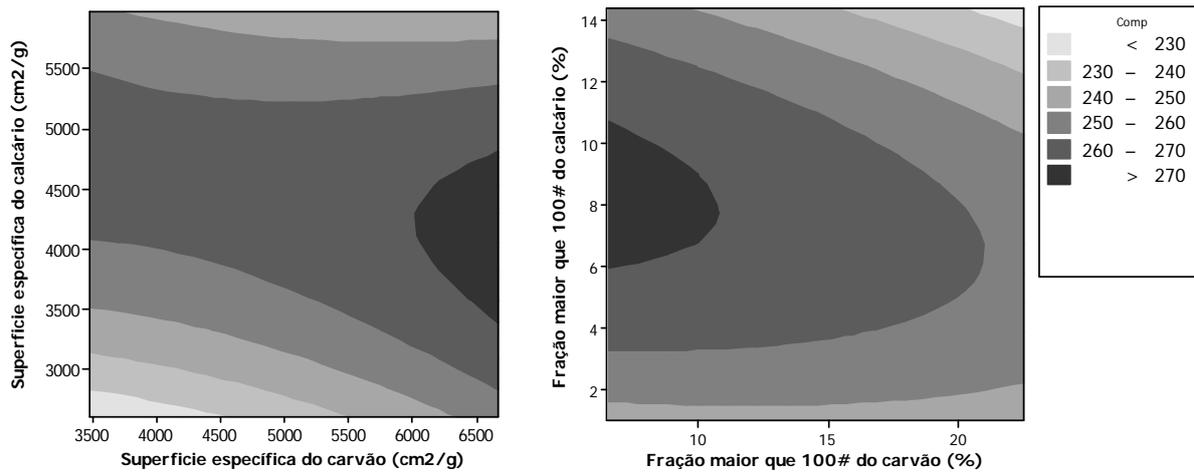


Figura 3. Resultado de distribuição granulométrica passante do carvão e calcário.

Testes de inchamento e redutibilidade foram realizados para avaliar o impacto da variação da distribuição granulométrica na qualidade das pelotas, mostrando significância da interação da granulometria do carvão com a do calcário para os testes de porosidade. A granulometria do calcário mostrou-se significativa, também, com relação à compressão após redução das pelotas queimadas. Os demais testes não mostraram relação direta entre a variação da granulometria do calcário e do carvão.

Foram feitas análise através de microscopia ótica visando explicar as relações encontradas com os resultados até o momento apresentados. A análise do experimento fatorial dos resultados mostrou uma relação significativa entre a granulometria do carvão e a magnetita, além da relação da interação da granulometria do carvão e do calcário. O poder de explicação encontrado para a formação de magnetita foi de 90,22% (R-quadrado ajustado).

Como a formação de magnetita tende a fragilizar a estrutura interna da pelota, foi feito a análise da superfície de resposta para este parâmetro. Na Figura 4 pode-se observar que o aumento da superfície específica do carvão tende a eliminar a presença de magnetita mesmo para superfícies específicas mais baixas de calcário. De forma análoga, o aumento da fração maior que 100# do carvão moído tendem a gerar uma maior formação de magnetita no interior da pelota (Figura 4).

Interação da magnetita com a Superfície específica e a Fração maior que 100#

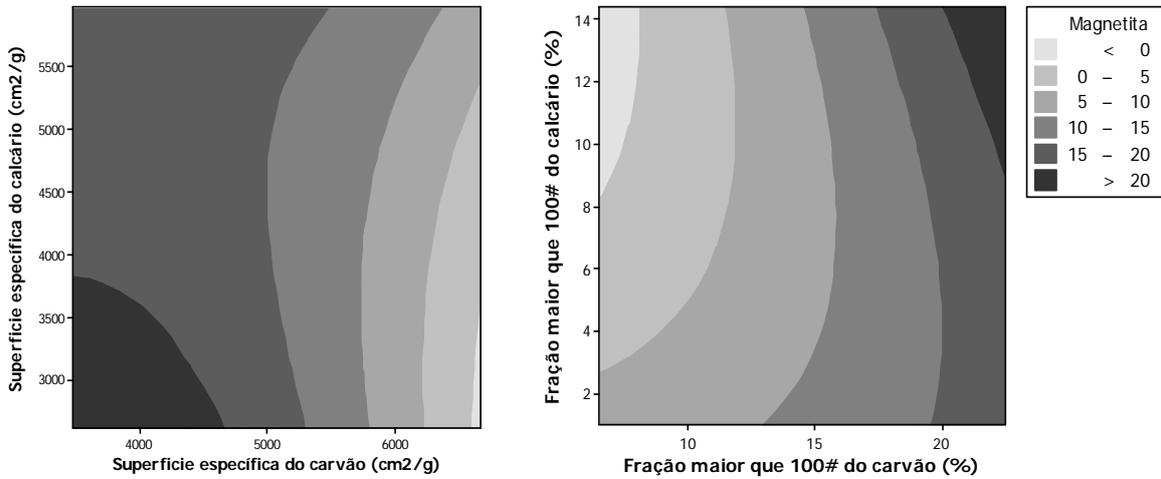


Figura 4. Superfície de Resposta da magnetita formada em relação ao carvão e calcário.

Estes resultados podem ser confirmados pela análise da macrografia das pelotas queimadas observadas na Figura 5. Nela percebe-se uma melhor distribuição dos poros nas pelotas com calcário na granulometria normal. Além desta observação é possível verificar como as pelotas com uma granulometria mais grosseira mostram uma maior formação de magnetita (área mais escura nas pelotas).

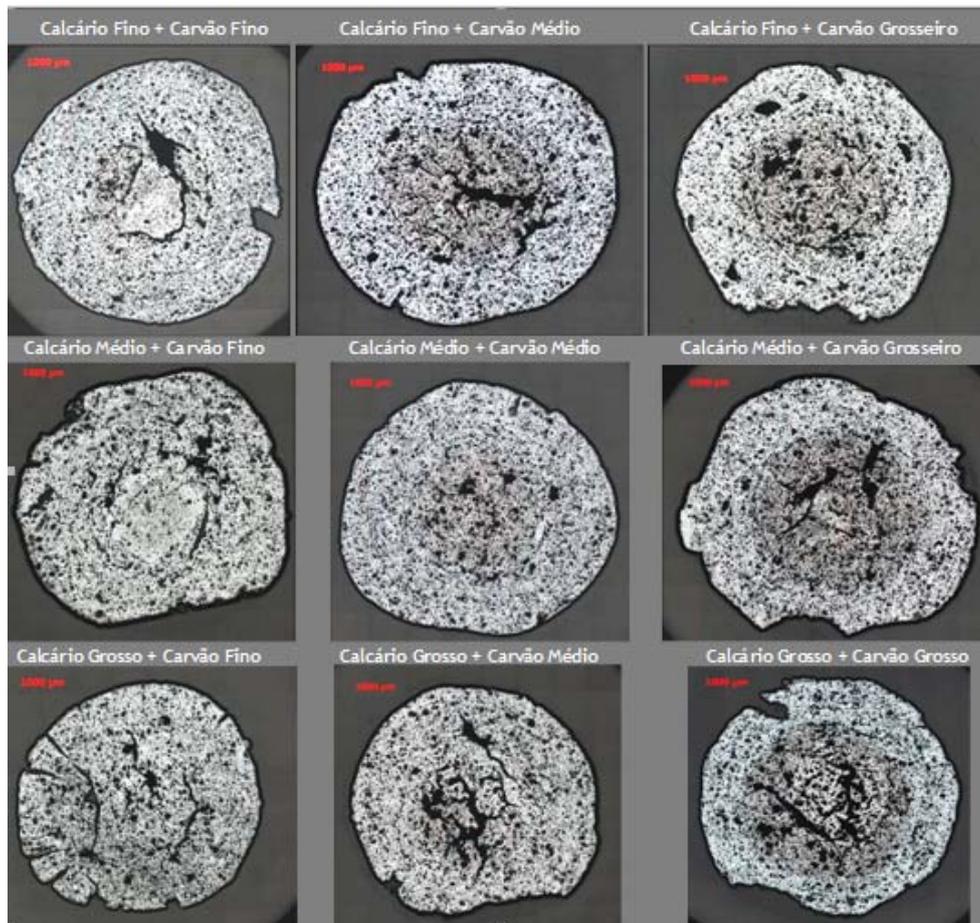


Figura 5. Macrografia das pelotas queimado pela granulometria do calcário e carvão.

As pelotas com calcário médio e carvão fino e médio apresentaram melhores resultados de compressão, resultado este derivado da menor formação de magnetita e melhor distribuição dos poros.

O motivo de o calcário fino não ter apresentado melhores resultados de compressão pode ser explicada pelo possível superaquecimento do núcleo da pelota causado pela melhor superfície de contato. Este superaquecimento é devido ao calor exotérmico de formação das cálcio-ferritas e seu adicional calor de fusão.⁽⁴⁾ Este calor aliado a melhor distribuição dos grãos de carvão devido sua melhor superfície podem resultar em temperaturas superiores, provocando a formação de uma estrutura vítrea mais frágil no centro ainda com sinais de magnetita residual (Figura 6).

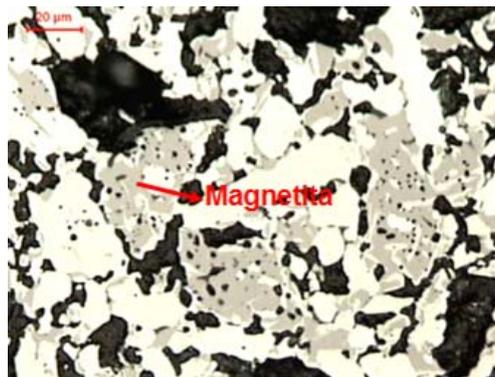


Figura 6. Micrografia do centro da pelota produzida com calcário e carvão fino – Aumento de 500X.

O aumento da granulometria do carvão, que tende a se concentrar no centro da pelota, aumentaria o aporte térmico e facilitaria a formação de magnetita, fazendo com que a estrutura vítrea durante o resfriamento impedisse a reoxidação. Isto pode ser verificado pelo aumento da magnetita aliado a granulometria do carvão crescente, independente da distribuição granulométrica do calcário (Figura 7).

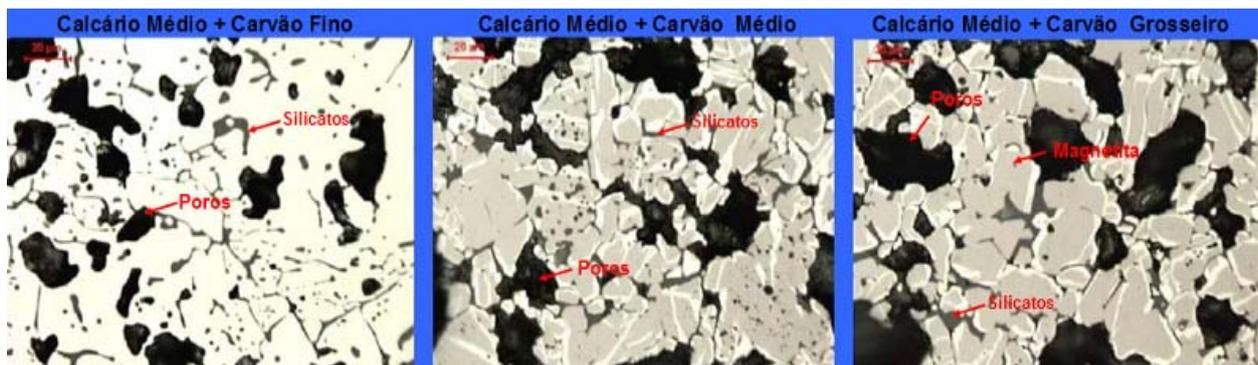


Figura 7. Região intermediária de pelotas produzidas com diferentes granulometrias de carvão. Aumento de 500X.

Com um aumento de 100x nas mesmas pelotas é possível verificar uma tendência de aumento do tamanho dos poros quando são utilizados carvões mais grosseiros (Figura 8).

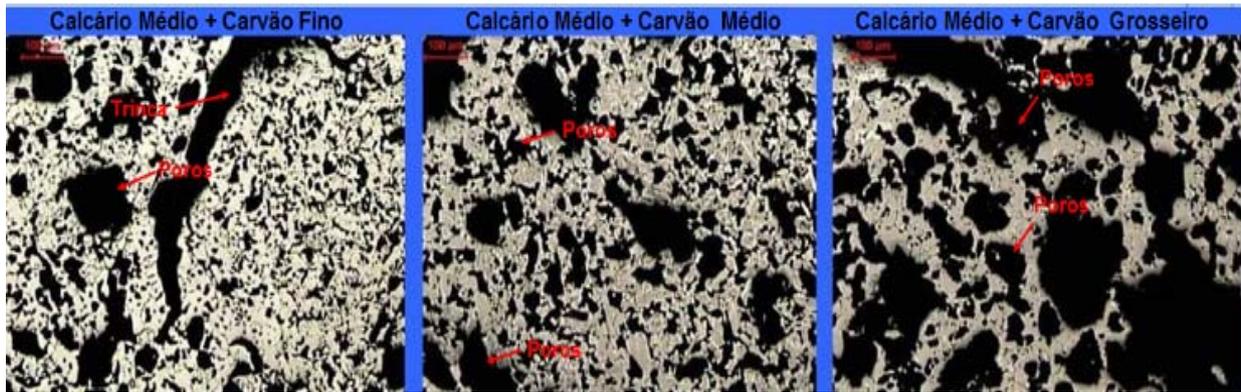


Figura 8. Região intermediária de pelotas produzidas com diferentes granulometrias de carvão. Aumento de 100X.

O calcário grosso mostrou uma maior geração de trincas internas que contribuem para fragilizar as pelotas. Isto explica os baixos valores de compressão destas pelotas queimadas. Além da geração de trincas percebe-se uma maior ocorrência de calcário não reagido na pelota quando o calcário possui uma distribuição granulométrica grosseira (Figura 9).

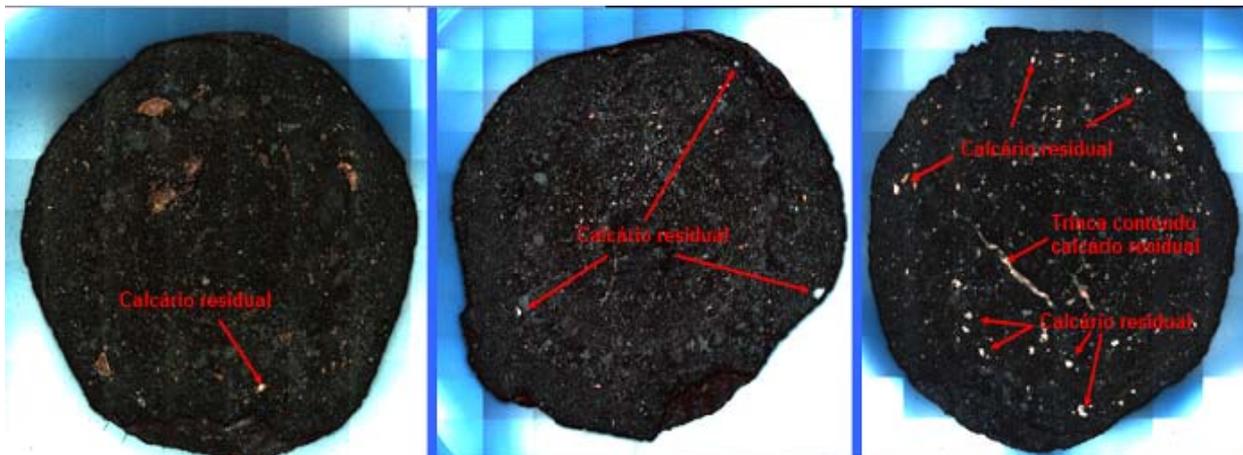


Figura 9. Pelota com granulometria de carvão grosseira e de calcário fina, normal e grosseira respectivamente.

5 CONCLUSÃO

Através dos resultados encontrados no trabalho, quando relacionamos granulometria dos insumos carvão e calcário com a característica física e metalúrgica das pelotas, relatamos uma influência significativa nos valores de compressão e formação de magnetita. Pelas condições das variáveis que foram fixadas nos testes obtivemos valores de granulometria do carvão e calcário que demonstraram melhores resultados de compressão e redução na formação de magnetita para o *pellet feed* utilizado. Para este minério a qualidade física destes insumos deverá ser:

- a superfície específica deve apresentar valores acima de 6.000 g/cm² no carvão e no calcário um a faixa entre 3.500 g/cm² a 5.000 g/cm²; e
- a fração maior que 100# não deve apresentar valores maiores que 11% para o carvão e deve estar em uma faixa entre 6% e 11% no calcário.

Na análise microscópica o resultado encontrado mostra que a granulometria do carvão tem um grande impacto na formação de magnetita, demonstrando que não

apenas a dosagem influencia na perda de resistência por este fenômeno. A granulometria grosseira do calcário demonstrou forte influência na formação de trincas internas nas pelotas.

Agradecimentos

Agradeço a todos que participaram deste trabalho em todos os momentos de sua elaboração, em especial aos empregados da Gerência de Engenharia de Processo e Automação da Samarco Mineração, em Ponta Ubu, e ao Engenheiro Doutor Henrique Turrer.

REFERÊNCIAS

- 1 Umadevi, T.; Sampath Kumar, M. G.; Kumar, S.; Prasad, C. S. G.; Ranjan, M. Influence of raw material particle size on quality of pellets. Ironmaking and Steelmaking. 2008, VOL 35 N° 5.
- 2 Costa, R. V. P.; Otimização da Resistência à Compressão de Pelotas de Minério de Ferro para Redução Direta pela Aplicação de Projeto Robusto. 2008 113 folhas. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais) – UFOP, 2008.
- 3 Fonseca, M. C.; Ferreira, H. S.; Otaviano M. M.; Perin, V.; Influência da Dosagem de Carvão na Qualidade das Pelotas Queimadas. In: 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 2009.
- 4 MEYER, Kurt. Pelletizing of Iron Ores. Germany: Springer, 1980 apud Costa, R. V. P.; Otimização da Resistência à Compressão de Pelotas de Minério de Ferro para Redução Direta pela Aplicação de Projeto Robusto. 2008.
- 5 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, BS ISO 4700:2007: Iron ores - Determination of tumble strength, Third edition, London, November 1995.
- 6 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 3271: Iron ore pellets for blast furnace and direct reduction feedstocks — Determination of the crushing strength, Third edition, London, September 2007.
- 7 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 7215: Iron ores - Determination of relative reducibility, Second edition, London, November 1995.
- 8 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 4698: Iron ore pellets for blast furnace feedstocks — Determination of the free-swelling index, Second edition, London, October 2007.