

CARACTERIZAÇÃO DE PELotas DE MINÉRIO DE FERRO POR MICROSCOPIA DIGITAL E ANÁLISE DE IMAGENS

Debora Turon Wagner ¹

Hirschel Valiente Rouco ²

Otávio da Fonseca Martins Gomes ³

Sidnei Paciornik ⁴

Maria Beatriz Vieira ⁵

Resumo

A análise microestrutural das pelotas de minério de ferro é realizada na Vale com o intuito de estudar o processo de pelotização, desenvolver produtos e avaliar sua qualidade. A Vale e a PUC-Rio estão envidando esforços para o desenvolvimento de rotinas de análise de imagens que melhorem a caracterização qualitativa e quantitativa das pelotas por meio de técnicas de microscopia digital. Com o emprego de um microscópio óptico motorizado e controlado por computador, foram automaticamente gerados mosaicos de imagens cobrindo cada pelota completamente. Estes mosaicos constituem-se em uma poderosa ferramenta de análise qualitativa da pelota como um todo e, além disso, permitem a análise quantitativa em baixa resolução e a medição do mapa de porosidade. Mosaicos em alta resolução também foram obtidos ao longo de diâmetros das pelotas. As frações de fase de hematita, ferrito, escória e poros foram automaticamente medidas a partir destas imagens, revelando a típica variação radial da microestrutura das pelotas.

Palavras-chave: Pelotas; Minério de ferro; Análise de imagem; Microscopia digital.

IRON ORE PELLET CHARACTERIZATION THROUGH DIGITAL MICROSCOPY AND IMAGE ANALYSIS

Abstract

Vale evaluates the microstructure of iron ore pellets in order to understand their characteristics and behavior in the agglomeration process, and the correlation with conventional quality parameters. Efforts on image analysis development are in progress between Vale and PUC-Rio in order to improve both the qualitative and quantitative characterization. In the present work, digital microscopy techniques were developed allowing this kind of assessment. Employing a motorized and computer controlled optical microscope, low magnification mosaic images covering complete pellet samples were automatically obtained. The mosaics provide a powerful qualitative overview of the whole sample while allowing low resolution quantitative evaluation and measurement of the porosity mapping. Higher magnification mosaics were also obtained along pellet sample diameters. From these images, hematite, ferrite, slag and pores phase fractions were automatically measured, revealing the typical radial variation expected from pellets.

Key words: Pellet; Iron ore; Image analysis; Digital microscopy.

I INTRODUÇÃO

As pelotas de minério de ferro são, junto ao sinter e ao minério granulado, as principais alternativas de composição de carga metálica em altos-fornos. Com a tendência de diminuição na oferta de granulados e a piora na qualidade química dos *sinter feeds*,

prevê-se o aumento de produção e consumo de pelotas. A Vale, como uma das maiores produtoras de pelotas no mundo, investe de modo crescente em pesquisa e desenvolvimento visando a melhoria do processo de produção e da qualidade das pelotas de minério de ferro.

¹Estudante de graduação. DCMM/PUC-Rio. R. Marquês de São Vicente 225, CP 38008, Cep 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail: deturon@gmail.com

²Físico, M.Sc. DCMM/PUC-Rio. R. Marquês de São Vicente 225, CP 38008, Cep 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail: hirschelv@gmail.com

³Engenheiro Químico, D.Sc. CETEM/MCT. Av. Pedro Calmon 900, Cep 21941-908, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: ogomes@gmail.com

⁴Engenheiro Eletrônico e Físico, D.Sc. DCMM/PUC-Rio. R. Marquês de São Vicente 225, CP 38008, Cep 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail: sidnei@puc-rio.br

⁵Geóloga. Vale. Av. Ligação 3580, Cep 34000-000, Nova Lima, MG, Brasil. E-mail: maria.beatriz.vieira@vale.com

A caracterização microestrutural das pelotas de minério de ferro contribui para a compreensão dos fenômenos de aglomeração, das propriedades das pelotas e de seu comportamento nos processos de redução nos altos-fornos. A composição mineralógica das pelotas constitui-se em um importante parâmetro a ser controlado, assim como sua porosidade e o arranjo espacial dos poros.

O microscópio óptico de luz refletida é tipicamente usado na caracterização de minérios de ferro e seus aglomerados (pelotas e sinteres), pois as fases mais comumente presentes podem ser identificadas e discriminadas por meio de suas diferentes refletâncias.⁽¹⁾ De fato, a microscopia óptica de luz refletida e a análise digital de imagens são ferramentas bastante úteis para a caracterização destes materiais. Na literatura,⁽¹⁻⁹⁾ podem ser encontrados diversos exemplos. Informações fundamentais acerca destes materiais, como mineralogia, porosidade e textura, podem ser obtidas com o emprego dessas técnicas.

Na Vale, a avaliação qualitativa da microestrutura das pelotas de minério de ferro é feita a partir da análise visual das pelotas ao microscópio óptico de luz refletida. Recentemente, o Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM), do Centro de Tecnologia em Ferrosos (CTF) da Vale, e o Laboratório de Microscopia Digital (LMD) do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM), da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio vêm trabalhando no desenvolvimento e implantação de técnicas de microscopia digital⁽¹⁰⁾ e análise de imagens, com o intuito de estabelecer rotinas para a caracterização qualitativa e quantitativa de aglomerados de minério de ferro.⁽¹⁻³⁾

As pelotas de minério de ferro podem apresentar variações na proporção de fases constituintes, no arranjo microestrutural como também na porosidade. Estas variações ocorrem, de modo geral, no sentido radial. Deste modo, a tradicional amostragem por varredura na seção polida ao microscópio deve ser evitada para que não sejam gerados resultados médios que, na verdade, mascaram as variações espaciais. Uma caracterização adequada das pelotas deve levar em consideração a identificação e medição destas variações.

No presente trabalho, foram empregadas técnicas de microscopia digital a fim de adquirir imagens mosaico⁽¹¹⁾ de amostras de pelota. Estes mosaicos foram compostos varrendo-se a seção da pelota ao longo de diâmetros ou cobrindo toda sua superfície. A partir daí, foram utilizadas rotinas de análise de imagens para identificar as fases minerais e os poros; medir as frações de fases e a porosidade; e estabelecer sistematicamente suas variações espaciais.

As imagens mosaico são muito úteis, tanto para a análise qualitativa, quanto para a quantitativa. Elas permitem uma visão completa da seção polida da amostra, de modo que as medidas assim realizadas não sofrem das limitações estatísticas e problemas de borda associados à análise de campos individuais. Por outro lado, ao se trabalhar em resoluções mais altas e, conseqüentemente, campos menores, o tamanho dos arquivos das imagens mosaico pode rapidamente tornar-se tão grandes a ponto de inviabilizar na prática o processamento destas imagens. Assim, é importante estabelecer rotinas que combinem mosaicos de baixa resolução, cobrindo completamente a seção da pelota, com mosaicos diametrais em alta resolução a fim de revelar a distribuição radial das fases e da porosidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação de Amostras

As pelotas foram cortadas ao meio e embutidas em resina epóxi. Em seguida, os blocos assim montados foram lixados e polidos, conforme o método tradicional de preparação de amostras minerais para observação ao microscópio óptico de luz refletida. Deste modo, foram obtidas seções polidas de pelotas com aproximadamente (15 x 15) mm².

2.2 Aquisição das Imagens ao Microscópio Óptico

A aquisição de imagens foi realizada em um microscópio óptico motorizado e controlado por computador Zeiss Axioplan 2 ie com uma câmera digital Zeiss AxioCam HR (1.300 x 1.030 pixels) acoplada. O software AxioVision (V4.6, Carl Zeiss Vision) foi utilizado tanto para o controle do microscópio e da câmera quanto para o processamento e análise das imagens adquiridas.

Antes da aquisição propriamente das imagens das amostras, foi utilizado um padrão de refletância de carbeto de silício para gerar imagens de fundo, uma para cada lente objetiva empregada. Essas imagens de fundo foram subsequentemente usadas em um procedimento automático de correção de fundo a fim de corrigir todas as imagens adquiridas.

A iluminação do microscópio foi mantida sempre constante pelo controle digital da contagem da lâmpada. Os parâmetros de ajuste da câmera, como sua sensibilidade, o tempo de exposição e o ajuste de branco foram otimizados inicialmente para um campo representativo de uma dada amostra e então também mantidos constantes.

As imagens mosaico que cobrem toda a superfície da seção das pelotas foram compostas a partir de várias imagens de campos parcialmente sobrepostos, obtidas com a lente objetiva de 5x (NA 0,13), apresentando uma resolução de 2,11 µm/pixel. Já os mosaicos diametrais, adquiridos em varreduras com diferentes orientações, foram montados com imagens de maior resolução (0,53 µm/pixel) de campos parcialmente sobrepostos, obtidas com a lente objetiva de 20x (NA 0,40).

Dado que a informação de cor não foi considerada fundamental para a análise das imagens, todas as imagens utilizadas neste trabalho foram adquiridas em tons de cinza, com quantização de 8 bits. Isto permitiu a redução dos requisitos de memória por um fator de três.

2.3 Processamento e Análise de Imagens

As imagens mosaico adquiridas passaram pela seguinte sequência de processamento e análise:

- delimitação, para redução do chamado efeito *halo*;⁽¹²⁾
- segmentação das fases e dos poros, considerados como uma fase para efeito de análise, pela limiarização interativa do histograma de intensidades;⁽¹³⁾ e
- medição da fração de área de cada fase presente.

As condições cuidadosamente estabelecidas para a aquisição das imagens garantiram que a intensidade da luz refletida por cada fase fosse reprodutível e que, portanto, o valor digital dos pixels correspondentes fosse estável. Assim, foi possível a utilização de limiares de intensidade fixos, efetivamente automatizando a operação de segmentação.

No caso dos mosaicos em baixa resolução, que cobrem toda a superfície das seções das pelotas, somente a porosidade foi medida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta um mosaico diametral típico de uma pelota, obtido com a resolução mais alta. A variação radial das frações de fase, especialmente dos poros, é bem evidente nesta imagem. Empregando a sequência de processamento e análise de imagens apresentada na seção anterior, as frações de fase de hematita, ferrito, escória e poros foram automaticamente medidas. Os resultados obtidos ao longo do eixo diametral são mostrados no gráfico da Figura 2. Conforme esperado, a variação radial de hematita e porosidade é claramente revelada.

A Figura 3 mostra um mosaico cobrindo toda a superfície da seção de uma pelota adquirido em mais baixa resolução, com a lente objetiva de 5x. Esta imagem é bastante útil em uma análise qualitativa realizada por um analista humano. Entretanto, a medição acurada das frações de fase não é possível devido à sua limitada resolução. Assim, no presente trabalho, somente foram obtidos resultados de porosidade deste tipo de imagem.

A imagem em pseudocores da Figura 4 consiste em um mapa de porosidade que exhibe justamente a distribuição espacial dos poros na superfície da seção polida da pelota mostrada da Figura 3. Mais uma vez, há um útil aspecto qualitativo neste tipo de mapa, ajudado, neste caso, pelas medições locais da fração de área dos poros codificada pelas cores, conforme denotado pela legenda ao lado da imagem.

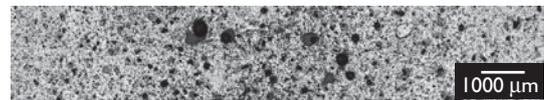


Figura 1. Mosaico em alta resolução adquirido ao longo do diâmetro de uma pelota.

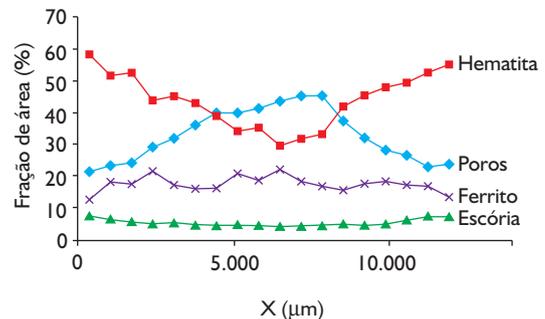


Figura 2. Variação das frações de fase, em área %, ao longo do diâmetro mostrado na Figura 1.

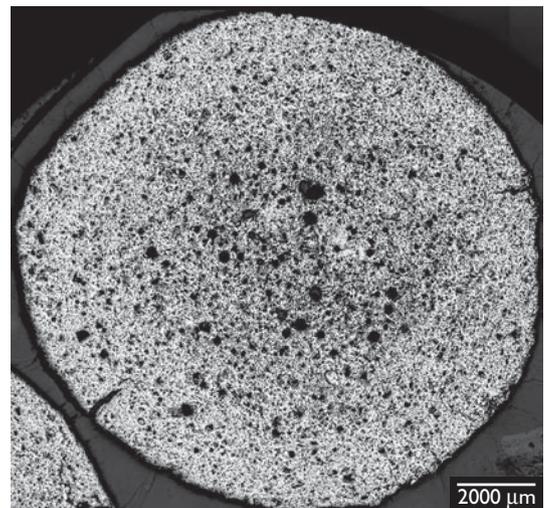


Figura 3. Mosaico em baixa resolução cobrindo toda a superfície da seção polida de uma pelota.

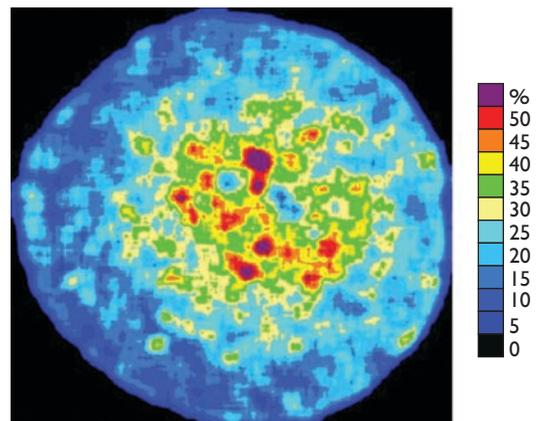


Figura 4. Mapa de porosidade obtido a partir do mosaico mostrado na Figura 3. Os valores da escala estão em fração de área local (%).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a aquisição e análise de imagens de pelotas de minério de ferro obtidas ao microscópio óptico de luz refletida.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da metodologia para a avaliação de materiais não-uniformes, tais como as pelotas de minério de ferro. É possível e prático adquirir e analisar mosaicos em baixa resolução cobrindo toda a super-

fície da seção polida equatorial de uma pelota e rapidamente obter informação qualitativa e quantitativa acerca da amostra. Quando são necessárias medidas acuradas de fases mais finamente distribuídas, é possível a construção de mosaicos diametrais em mais alta resolução. Estes mosaicos são armazenados em arquivos de tamanho ainda tratável na prática.

REFERÊNCIAS

- 1 ALVAREZ, J.C.; WAGNER, D.T.; SCHINAZI, G.; GOMES, O.D.M.; MAURÍCIO, M.H.P.; PACIORNIK, S.; VIEIRA, M.B. Qualitative and quantitative evaluation of iron ore sinters through digital microscopy. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 9., 2008, Brisbane. **Proceedings...** Carlton: AusIMM, 2008. p. 669-72.
- 2 ALVAREZ, J.C. **Uma metodologia para caracterização de sinter de minério de ferro:** microscopia digital e análise de imagens. 2008. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008.
- 3 WAGNER, D.T.; ROUCO, H.V.; GOMES, O.D.M.; PACIORNIK, S.; VIEIRA, M.B. Iron ore pellet characterization through digital microscopy. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRON ORE, 2., 2008, São Luís. **Proceedings...** São Paulo: ABM, 2008. p. 231-6.
- 4 DEBRINCAT, D.; LOO, C.E.; HUTCHENS, M.F. Effect of Iron Ore Particle Assimilation on Sinter Structure. **ISIJ International**, v. 44, n. 8, p. 1308-17, 2004.
- 5 DONSKOI, E.; SUTHERS, S.P.; FRADD, S.B.; YOUNG, J.M.; CAMPBELL, J.J.; RAYNLYN, T.D.; CLOUT, J.M.F. Utilization of optical image analysis and automatic texture classification for iron ore particle characterization. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 5, p. 461-71, 2007.
- 6 GOMES, O.D.M.; PACIORNIK, S. Iron ore quantitative characterisation through reflected light-scanning electron co-site microscopy. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 9., 2008, Brisbane. **Proceedings...** Carlton: AusIMM, 2008. p. 699-702.
- 7 GOMES, O.D.M.; PACIORNIK, S. RLM-SEM co-site microscopy applied to iron ore characterization. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRON ORE, 2., 2008, São Luís. **Proceedings...** São Paulo: ABM, 2008. p. 218-24.
- 8 LESSA, A.M.; GOMES, O.D.M.; FERREIRA, H.O.; D'ABREU, J.C.; PACIORNIK, S. Classificação automática de hematita especular e hematita porosa em *pellet feed* por análise digital de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 8., Salvador, 2007. **Anais...** São Paulo: ABM, 2007. v. 2, p. 582-88.
- 9 PIRARD, E.; LEBICHOT, S. Image analysis of iron oxides under the optical microscope. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 8., 2004, Águas de Lindóia. **Anais...** São Paulo: ICAM-BR, 2004. p. 153-156.
- 10 PACIORNIK, S.; MAURICIO, M.H.P. Digital imaging. In: VANDERVOORT, G.F. (Ed.). **Metallography and microstructures**. Materials Park: ASM International, 2004. p. 368-402. (ASM Handbook, 9).
- 11 BRADLEY, A.; WILDERMOTH, M.; MILLS, P. Virtual microscopy with extended depth of field. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL IMAGE COMPUTING: TECHNIQUES AND APPLICATIONS (DICTA 2005), Cairns, 2005. **Proceedings...** Washington: IEEE Computer Society, 2005. p. 235-42.
- 12 SUTHERLAND, D.; GOTTLIEB, P. Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. **Minerals Engineering**, v. 4, n. 7, p. 753-62, 1991.
- 13 GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Digital image processing**. 2 ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002.

Recebido em: 13/04/2009

Aprovado em: 15/05/2009

Proveniente de: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRON ORE, 2., 2008, São Luís, MA. São Paulo: ABM, 2008.