

# CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER POR MICROSCOPIA ÓTICA DIGITAL E ANÁLISE DE IMAGENS<sup>1</sup>

*Julio Cesar Alvarez Iglesias<sup>2</sup>*

*Gustavo Schinazi<sup>2</sup>*

*Otávio da Fonseca Martins Gomes<sup>3</sup>*

*Sidnei Paciornik<sup>2</sup>*

*Maria Beatriz Vieira<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Neste trabalho, propõe-se uma metodologia para a caracterização microestrutural quantitativa de sinter de minério de ferro. Amostras de sinter com cerca de 3 cm foram embutidas em resina, lixadas e polidas. Para cada seção polida, foram adquiridas imagens em mosaico cobrindo toda a área da seção (lente objetiva de 5X). Uma rotina automática analisou as imagens, medindo as frações de área de cada fase, inclusive poros. Além disso, para comparação, foram também adquiridas e analisadas cerca de 2.000 imagens de campos em mais alta resolução (objetiva de 20X). As frações de fase foram também obtidas por difratometria de raios-x utilizando o método de Rietveld. Os resultados obtidos em diferentes resoluções foram bem semelhantes para as fases hematita, magnetita e ferritos. Contudo, houve uma grande discrepância, cerca de 40% de erro relativo, nas medidas dos silicatos. Da mesma forma, os resultados independentemente obtidos por difratometria de raios-x foram consistentes com as medidas por análise de imagens, com exceção dos silicatos.

**Palavras-chave:** Sinter; Minério de ferro; Microscopia digital; Análise de imagens.

## **IRON ORE SINTER CHARACTERIZATION THROUGH DIGITAL OPTICAL MICROSCOPY AND IMAGE ANALYSIS**

### **Abstract**

A methodology for quantitative microstructural characterization of iron ore sinters was proposed. Sinter samples with  $\approx 3$  cm diameter were mounted in resin, ground and polished. For each sample, mosaic images covering the entire sample were acquired (5X objective lens). An automatic image analysis routine was employed to measure the area fraction of each phase, including pores. In addition, 2000 images were also acquired and analyzed in higher resolution (20X objective). The phase fractions were also obtained by X-ray diffraction using the Rietveld method. The results obtained from different resolutions were very similar for hematite, magnetite and ferrites. However, there was a wide variation, about 40%, in silicates fractions. Likewise, the X-ray diffraction results were consistent with the measurements carried out by image analysis, except for silicates.

**Key words:** Sinter; Iron ore; Digital microscopy; Image analysis.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.*

<sup>2</sup> *Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil – [julio.alvarez@gmail.com](mailto:julio.alvarez@gmail.com), [gustavoschinazi@gmail.com](mailto:gustavoschinazi@gmail.com), [sidnei@puc-rio.br](mailto:sidnei@puc-rio.br).*

<sup>3</sup> *Centro de Tecnologia Mineral, Brasil – [ogomes@gmail.com](mailto:ogomes@gmail.com).*

<sup>4</sup> *Centro de Tecnologia em Ferrosos (CTF), Vale - [maria.beatriz.vieira@vale.com](mailto:maria.beatriz.vieira@vale.com).*

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o uso crescente do minério de ferro e seus derivados na fabricação de bens de consumo mostra a importância deste segmento para a economia nacional e mundial. Desta forma, as empresas buscam cada vez mais o aprimoramento dos seus produtos para se manterem atuantes no mercado.

A análise quantitativa do produto das mineradoras (por exemplo, os aglomerados de minério de ferro) se transformou em foco de alta atenção devido à necessidade de estimar e controlar a qualidade do material, que depende principalmente da constituição do minério.

O Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) tem uma parceria com a Vale para desenvolver uma ferramenta de controle da qualidade dos aglomerados que ela fornece. Antigamente este controle era realizado manualmente por um técnico, observando as amostras em um microscópio e identificando as fases visualmente. No presente trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um método mais eficiente e acurado de identificação e quantificação das fases presentes.<sup>(1-3)</sup> Este método, além de outras técnicas, vai envolver fundamentalmente dois grupos de técnicas experimentais relacionadas: Microscopia Digital (MD) e Processamento e Análise de Imagens (PADI).<sup>(4)</sup>

A microscopia, em suas diversas formas, constitui-se em uma das principais técnicas analíticas empregadas na caracterização tecnológica de minérios e conseqüentemente na indústria mineral. Na literatura<sup>(1-3,5-10)</sup> podem ser encontrados diversos exemplos. A identificação e a quantificação das espécies minerais presentes, a determinação de suas associações, e a medição do espectro de liberação estão entre as principais características obtidas a partir da microscopia.

Com a microscopia pode-se obter imagens digitais de uma amostra em maior aumento, permitindo a utilização de PADI para obter medidas impossíveis de realizar manualmente. Isto confere uma maior reprodutibilidade, confiabilidade e velocidade ao processo de identificação e quantificação das espécies minerais presentes na amostra. Além disso, possibilita o uso de técnicas de reconhecimento de padrões e inteligência artificial para automatizar procedimentos de classificação.

De fato, quando se pensa na utilização de técnicas de PADI para a caracterização de materiais, vem à mente a automação, de modo que, a partir de uma amostra adequadamente preparada ou de uma imagem digital capturada, o computador forneça o resultado com pouca ou nenhuma influência do usuário. Para isto, as rotinas de PADI seguem uma seqüência padrão de etapas, através da qual pode-se ir de imagens digitais a dados quantitativos interpretados.

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia de MD e PADI para automatizar ou auxiliar a identificação e quantificação de fases de sinter de minério de ferro fornecido pela Vale.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Preparação de Amostras

Amostras de sínteres foram cortadas e embutidas em resina epóxi. Em seguida, os blocos assim montados foram lixados e polidos em politriz automática. Deste modo, foram obtidas seções polidas de sinter com cerca de 30 x 30 mm<sup>2</sup>.

Estas amostras, denominadas Sínter Fragmento, foram analisadas por microscopia óptica e análise de imagens em diferentes resoluções.

Para se fazer a comparação entre técnicas analíticas, um bolo de um sínter foi britado e homogeneizado, e foram tomadas amostras para difratometria de raios-x (DRX) e microscopia óptica e análise de imagens. Estas amostras foram chamadas Sínter Britado.

A amostra Sínter Britado para microscopia foi embutida em resina epóxi, lixada e polida, conforme a preparação tradicional. Já a amostra para DRX foi moída em moinho planetário e em moinho vibratório de barras até uma granulometria da ordem de micrômetros. A esta amostra foram adicionados 20% de fluorita para servirem como padrão interno no método de Rietveld.<sup>(11)</sup>

## 2.2 Aquisição de Imagens

A aquisição de imagens foi realizada pelo software AxioVision (V4.6, Carl Zeiss Vision) em um microscópio óptico motorizado e controlado por computador Zeiss Axioplan 2 ie com uma câmera digital Zeiss AxioCam HR (1300 x 1030 pixels).

Antes da aquisição das imagens das amostras, um padrão de refletância de carbeto de silício (SiC) foi utilizado para gerar imagens de fundo, uma para cada lente objetiva empregada. Estas 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 direto da tensão da lâmpada. Os parâmetros da câmera, como sensibilidade, tempo de exposição e ajuste de branco, foram otimizados inicialmente para um campo representativo e depois mantidos constantes.

Nos experimentos realizados, descritos nas três seções a seguir, foram adquiridas imagens de campos individuais e imagens mosaico. Utilizando-se as lentes de 5X (NA 0,13), 10X (NA 0,20) e 20X (NA 0,40), obteve-se respectivamente resoluções de 2,11; 1,05; e 0,53  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . A Figura 1 mostra a imagem de um campo da amostra Sínter Fragmento adquirida com a lente objetiva de 20X.

As imagens mosaico<sup>(3)</sup> que cobrem toda a superfície da seção polida foram compostas a partir de várias imagens de campos parcialmente sobrepostos, obtidas com a lente objetiva de 5X. Na Figura 2, pode ser observada uma imagem mosaico da amostra Sínter Fragmento composta por  $12 \times 12 = 144$  imagens.

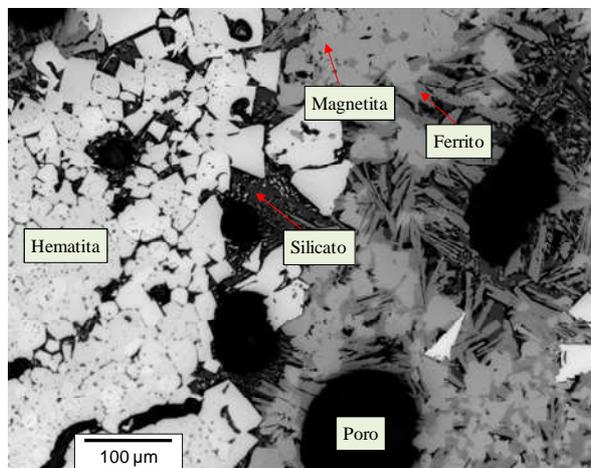
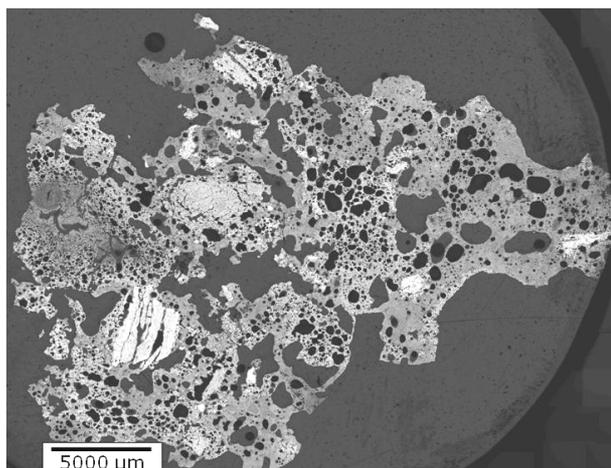


Figura 1. Imagem típica do sínter em alto aumento (Objetiva de 20X).



**Figura 2.** Imagem em mosaico de um fragmento completo de sínter (Objetiva de 5X).

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 Estudo do Efeito da Resolução**

Para avaliar o efeito da resolução na discriminação das fases presentes, uma região aleatória de teste foi escolhida na seção da amostra Sínter Fragmento. Assim, um único campo adquirido com a lente de 5X foi comparado com mosaicos compostos de 2 x 2 campos e 4 x 4 campos da mesma região, obtidos com as lentes objetivas de 10X e 20X, respectivamente.

As imagens adquiridas passaram pela seguinte seqüência de processamento e análise:

- delineação, para redução do chamado efeito halo;<sup>(12)</sup>
- segmentação das fases e dos poros, considerados como uma fase para efeito de análise, através da limiarização interativa do histograma de intensidades;<sup>(13)</sup> 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.

### **2.4 Análise Multi-Resolução**

Foi realizada também uma comparação entre um mosaico composto por imagens adquiridas com a objetiva de 5X e em um conjunto de mais de 1500 imagens de campos individuais obtidas com a objetiva de 20X, cobrindo, em ambos os casos, toda a superfície da amostra Sínter Fragmento. O processamento e análise destas imagens seguiu a mesma seqüência descrita na seção acima.

## **2.5 Comparação entre Análise de Imagens e Difractometria de Raios X**

Visando comparar os resultados obtidos por técnicas experimentais distintas e independentes, a amostra Sínter Britado foi quantificada por análise de imagens e por DRX pelo método de Rietveld.

Foram adquiridos 1.000 imagens de campos individuais em alto aumento (lente objetiva de 20X), cobrindo toda a área da seção transversal da amostra Sínter Britado. Então, usando a mesma rotina de análise de imagens empregada nos experimentos anteriormente descritos (seções 2.3 e 2.4), foram medidas as frações das fases do sínter (hematita, magnetita, ferritos e silicatos).

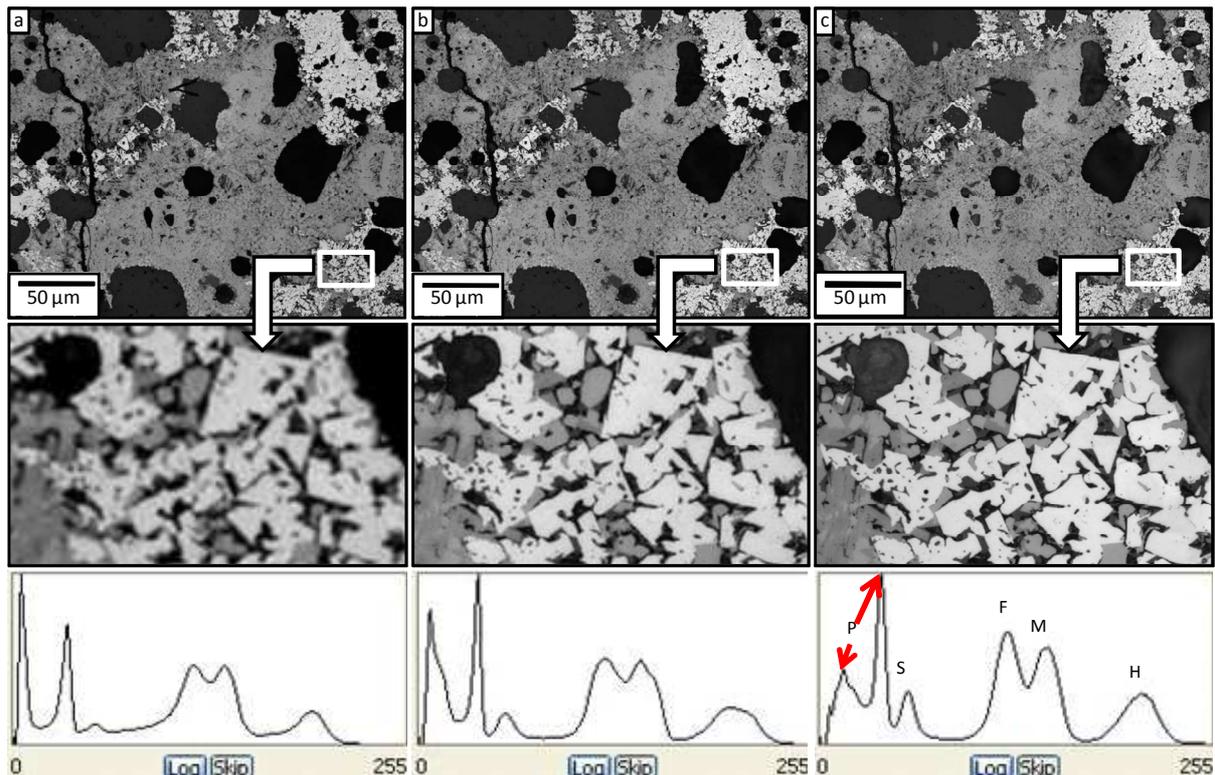
A composição mineralógica desta amostra foi também obtida pelo método de Rietveld. O difratograma de raios-x, obtido pelo método do pó, foi coletado em um equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor, nas seguintes condições de operação: radiação Co Ka (40 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de  $0,02^\circ$  ( $2\theta$ ) por passo, com tempo de contagem de 1s por passo, e coletados de  $4$  a  $80^\circ$  ( $2\theta$ ), com detector sensível à posição LynxEye. O software utilizado para o cálculo da composição foi o Bruker TOPAS R.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **3.1 Efeito da Resolução**

As imagens a 20X tem a vantagem de oferecer uma melhor resolução na quantificação das fases, mas tem a desvantagem de precisar analisar um número grande de imagens para obter um resultado representativo da composição de um sínter, que se caracteriza por uma alta heterogeneidade. Por outro lado, um mosaico a 5X proporciona a vantagem de analisar o sínter todo em uma só imagem, embora tenha o inconveniente da resolução, que pode acarretar problemas na identificação das fases menos abundantes e com microestrutura mais fina, como ferritos e silicato.

Para avaliar o efeito da resolução na discriminação das fases presentes, uma região aleatória de teste foi escolhida de cada amostra de sínter. A Figura 3 mostra imagens típicas de sínter, junto com os seus respectivos histogramas de intensidade de pixel, e visões ampliadas das regiões demarcadas em branco, destacando o efeito da resolução.



**Figura 3.** Uma mesma região do sínter em resoluções diferentes (lente objetiva): (a) 5X – campo único; (b) 10X – mosaico 2x2; (c) 20X – mosaico 4x4. Os histogramas de intensidade e uma visão ampliada de uma pequena região (retângulos brancos) também são mostrados.<sup>(1)</sup>

A aparência dos picos no histograma, correspondentes às distintas fases, torna mais clara como a resolução melhora com o aumento. As fases relevantes são identificadas no último histograma com o seguinte código: P = Poros, S = Silicato, F = Ferrito, M = Magnetita, H = Hematita. Cada imagem foi então automaticamente analisada e as frações de fase medidas são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Frações de fase (%) medidas pela análise de imagem de uma mesma região do sínter em resoluções diferentes<sup>(1)</sup>

	Hematita	Magnetita	Ferrito	Silicato	Pores
1x1 campos @5X	15,11	21,33	24,66	3,83	34,70
2x2 campos @10X	15,60	21,50	25,06	4,34	33,34
4x4 campos @20X	15,84	21,64	25,21	5,36	31,86

### 3.2 Análise Multi-Resolução

Uma mesma análise multi-resolução, foi realizada sobre três amostras distintas de sínter de minério de ferro fornecidas pela Vale. Neste trabalho só será apresentado o procedimento para uma delas

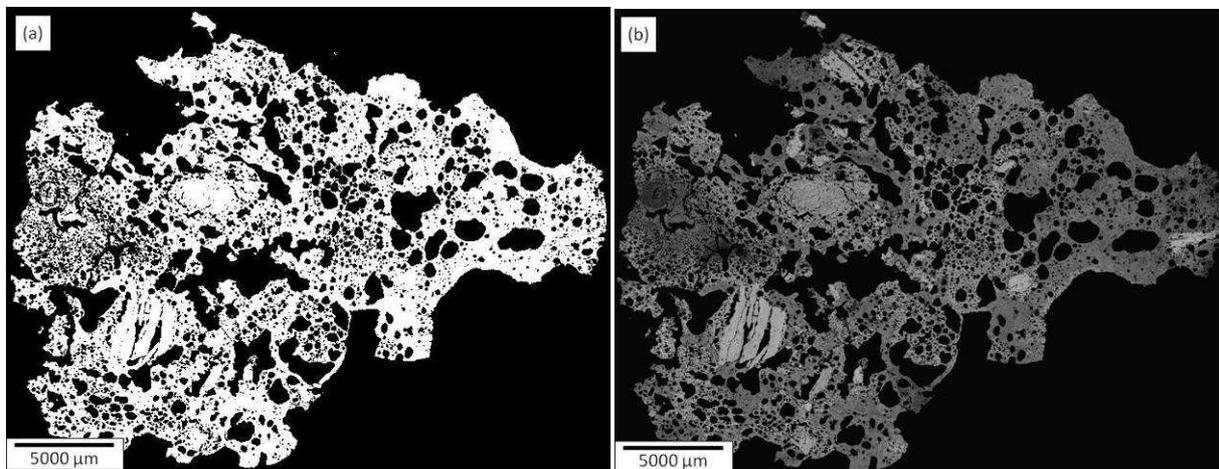
Para verificar a confiabilidade dos resultados da seção anterior, foi analisada uma amostra de sínter baseada em um mosaico em baixo aumento (objetiva de 5X) e em um conjunto de mais de 1500 imagens em alto aumento (objetiva de 20X), cobrindo, em ambos os casos, toda a superfície da amostra. As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, exemplos típicos de imagens nas duas condições.

Inicialmente, a imagem do mosaico a 5X foi analisada e as frações de fase foram medidas. Para isto, foi desenvolvida uma seqüência de PADI que está ilustrada nas Figuras 4, 5 e 6.

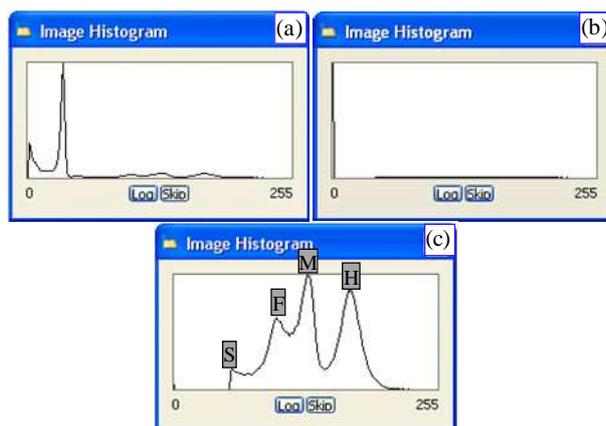
Como o objetivo é medir as frações das fases é preciso conhecer a área total de sínter e de cada fase. Assim, é necessário primeiro discriminar a região interna ao sínter, da região externa, ocupada pela resina de embutimento. A Figura 4a mostra o primeiro passo desta discriminação, obtida por segmentação interativa, escolhendo um limiar que separa poros e resina do restante das fases. Esta imagem é usada como máscara para gerar a imagem da Figura 4b, onde resina externa e poros internos recebem a tonalidade zero. Para obter a área total de sínter, incluindo poros internos, uma operação de preenchimento de buracos foi executada (Figura 5a). Pequenas aberturas na periferia da amostra foram previamente eliminadas com uma operação morfológica de fechamento.

Para calcular as frações de fase é preciso segmentar cada uma das fases, a partir do histograma de intensidades da imagem do sínter. No entanto, como mostrado na Figura 5a, como a quantidade de pixels com intensidades correspondentes à resina é muito alta, alguns dos outros picos aparecem muito pequenos, dificultando a escolha do limiar na segmentação das fases.

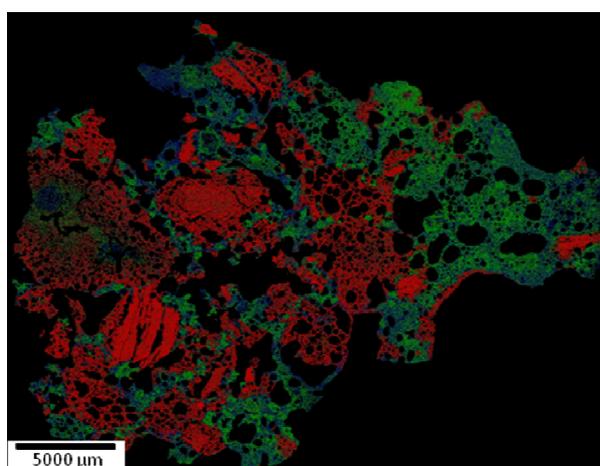
Uma solução simples pode ser obtida utilizando a imagem da Figura 4b, na qual todos os pixels correspondentes a poros e resina aparecem com tonalidade zero. O histograma desta imagem aparece na Figura 5b, com um grande pico em zero. Utilizando agora um recurso simples do software, que exclui do histograma pixels com valor zero (*Skip*) é possível visualizar com boa qualidade os picos das demais fases, Figura 5c. A segmentação interativa é usada para discriminar cada uma das cinco fases. Os resultados são mostrados em cores na Figura 6.



**Figura 4.** Passos do processamento de imagem para discriminar a superfície do sínter da **Erro!** **Fonte de referência não encontrada.** 2: (a) Mascara binária da segmentação da superfície inteira do sínter excluindo a resina; (b) superfície do sínter após um AND lógico entre a máscara binária e a imagem original da Figura 2.



**Figura 5.** Histograma do mosaico do sínter a 5X: (a) com resina; (b) sem resina e com pixels = 0; (c) sem resina e sem pixels = 0.



**Figura 6.** Fases segmentadas: Hematita = vermelho, Magnetita = verde, Ferrito = azul, Silicato = ciano, Poros = preto.

Sobre a imagem da Figura 6 são calculadas as frações de fase do sínter. Os resultados são mostrados na Tabela 2.

Como um mosaico a 20X do sínter seria uma imagem enorme ( $\approx 6$ GB em RGB) impossível de processar com os atuais recursos computacionais, capturou-se um grande conjunto de imagens individuais e contiguas em alto aumento, de forma a cobrir toda a superfície da amostra. Estas imagens foram processadas individual e automaticamente com uma rotina semelhante à usada no processamento do mosaico (delineamento seguido pela segmentação interativa com os mesmos limiares). As frações de fases do conjunto de imagens, com aumento de 20X, foram calculadas. Os resultados médios de todos os campos são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores das frações de fases (%) medidos de um mosaico completo e de um grande conjunto de imagens individuais em alto aumento cobrindo a mesma área

	Hematita	Magnetita	Ferrito	Silicato	Poros
Mosaico@5X	10,39	25,07	13,02	5,96	44,81
Campos@20X	11,47	24,37	13,39	10,62	40,01
Erro Relativo (%)	9,42	2,87	2,76	43,88	12,00

Tomando os resultados do sinter em alto aumento como referência, o erro relativo é calculado como a diferença entre as frações de fase obtidas a 5X e 20X, dividido pela fração de fase a 20X. Portanto, pode-se dizer que as frações de fase de hematita, magnetita, e ferrito podem ser medidas em um mosaico de baixo aumento com cerca de 90% de confiabilidade.

Os resultados de silicato e poros são menos confiáveis, com erros relativos maiores. Em baixo aumento, os poros são sobreestimados a custa do silicato já que ambas as fases têm tonalidades semelhantes, sobretudo quando os poros não estão cheios de resina e mostram reflexão interna, o que os faz ficarem cinza como o silicato, e não pretos. Contudo, a fração de fase combinada (poros + silicato) é bem mais exata – 50.77% em baixo aumento contra 50.63% em alto aumento, para um erro relativo do 0,27%

### 3.3 Comparação entre Técnicas Experimentais

Visando comparar resultados obtidos por técnicas experimentais distintas e independentes, realizou-se uma análise do mesmo material por MO e DRX.

Um conjunto de 1000 imagens individuais em alto aumento (lente objetiva de 20X) do Sinter Britado, foi obtido. Usando rotinas semelhantes às descritas anteriormente, as frações de fase do conjunto de imagens foram calculadas e seus resultados são mostrados na Tabela 3.

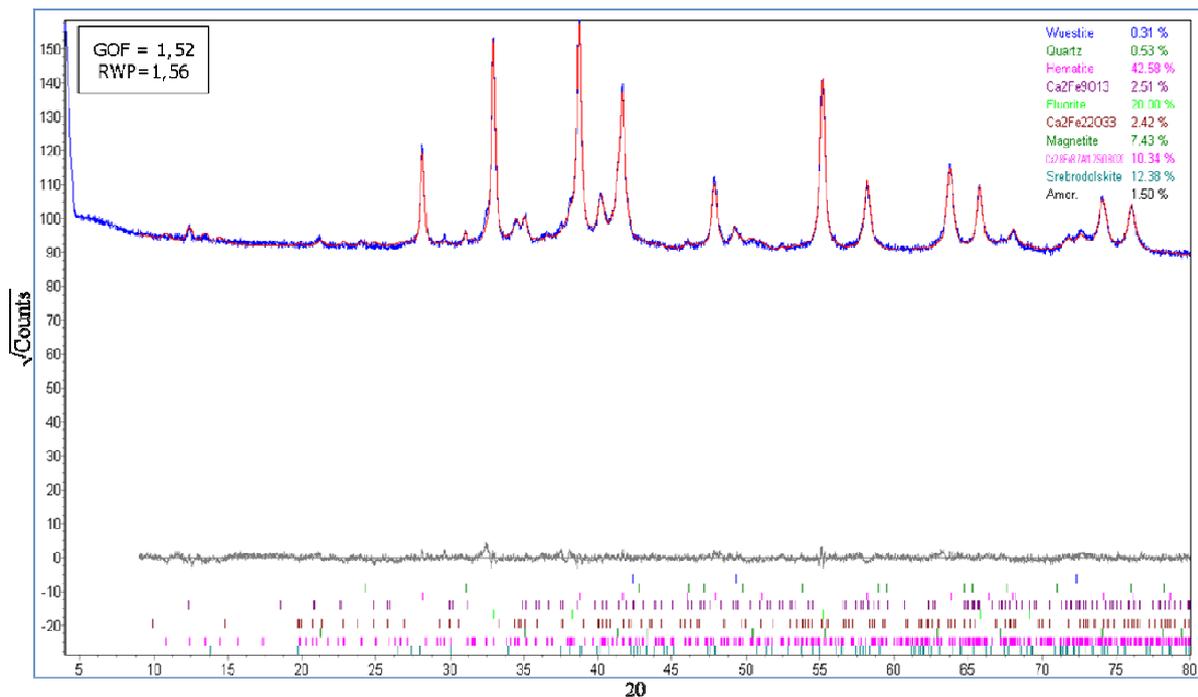
**Tabela 3.** Valores percentuais das frações de fases calculadas por MO e por DRX no Sinter Britado

	<b>Hematita</b>	<b>Magnetita</b>	<b>Ferrito</b>	<b>Silicato</b>
MO Campos@20X	57,53	9,92	24,35	8,20
DRX- Rietveld	53,23	9,95	21,64	15,19
Erro Relativo (%)	7,47	0,30	11,13	85,24

Sobre outra amostra deste mesmo sinter foi realizada difração de raios-x. O resultado da quantificação pelo método de Rietveld pode ser observado na Figura 7.

As frações de fases devem ser calculadas tendo em consideração que 20% de fluorita, como padrão interno, foi misturada no sinter para realizar DRX. Segundo a literatura, não existe uma notável diferença nas propriedades ópticas entre a wustita e a magnetita.<sup>(14)</sup> O mesmo pode ser afirmado no caso do quartzo e dos silicatos. Baseado nisto, podemos agrupar o quartzo e o  $\text{Ca}_{2,8}\text{Fe}_{8,7}\text{Al}_{1,2}\text{Si}_{0,8}\text{O}_{20}$  como a fração de fase do silicato, assim como acrescentar a wustita na fração final de magnetita. O resultado final pode ser observado na Tabela 3, mostrada anteriormente.

A comparação entre MO e DRX, apresentada na Tabela 3, mostra que, para as fases preponderantes, a diferença é menor. A diferença para o ferrito,  $\approx 11\%$ , ainda é considerada aceitável. Já no caso do silicato, o erro é bem maior.



**Figura 7.** Difratomogramas de raios-x medido (azul) e calculado (Vermelho) pelo método de Rietveld. O traço inferior mostra o erro.

Apesar das vantagens que o método de Rietveld oferece, é necessário ter alguns cuidados na hora de interpretar os resultados.<sup>(15)</sup> A influência de orientação preferencial, extinção primária e detecção não-linear devem ser reduzidas neste método. Além disso, o resultado final achado por este método pode sofrer variações significativas se outro mineral é acrescentado, eliminado ou substituído. Assim, parte das discrepâncias pode ter sido causada pela falta de alguma outra fase não incluída nesta análise.

## 5 CONCLUSÃO

Um método de microscopia digital para aquisição e processamento de imagens de sínter de minério de ferro, em microscopia óptica da luz refletida, foi desenvolvido.

Inicialmente, foi desenvolvida a metodologia para discriminar e quantificar fases em imagens de maior aumento (lente objetiva de 20X). Estas imagens dispõem de resolução espacial suficiente para revelar mesmo as fases mais finas, e permitem uma medida acurada de suas frações.

Foi também desenvolvida a metodologia de captura de imagens em mosaico. Como, em geral uma amostra representativa de sínter é relativamente grande (da ordem de centímetros), toma-se inviável capturar mosaicos em maior aumento – as imagens resultantes ocupariam gigabytes e seria praticamente impossível processá-las com recursos computacionais comuns. Assim, optou-se por obter mosaicos em baixo aumento (lente objetiva de 5X), que exigem menos memória.

Para que isto seja possível, é necessário garantir condições estáveis e reproduzíveis de aquisição das imagens ao microscópio óptico. Este é um ponto chave, que não pode ser ignorado. Garantidas estas condições, a escolha de limiares que separam as fases pode ser realizada de forma interativa, em imagens de referência, e pode ser mantida fixa para as demais imagens da amostra, efetivamente automatizando o procedimento.

Estes resultados são relevantes porque eles provêm uma metodologia para a avaliação de materiais não uniformes como o sinter de minério de ferro. É possível e prático adquirir e processar um mosaico em baixo aumento que cobre a superfície da amostra. Este tipo de imagem é muito útil para uma análise qualitativa, e também pode ser processada e analisada para medir as frações das fases predominantes, com boa exatidão.

Os resultados obtidos em maior aumento serviram de referência para a análise multi-resolução. Os resultados mostram que é possível economizar tempo e espaço de armazenamento, ao não ter que processar um conjunto grande de imagens em alto aumento para quantificar as principais fases de um sinter. O nível de confiabilidade destes resultados está próximo a 90%. Do ponto de vista do controle de qualidade durante a produção, este resultado tem grande relevância prática.

Desenvolveu-se também uma comparação entre resultados de MO em alto aumento (tomados como referência) e a técnica de difração de raios-x/Rietveld. Os resultados são similares, para algumas fases, mas ficou evidente que os resultados do ajuste pelo método de Rietveld são bastante instáveis e dependentes da identificação correta de todas as fases presentes, o que nem sempre é possível.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e da Vale.

## 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. Caracterização de pelotas de minério de ferro por microscopia digital e análise de imagens. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais (São Paulo)*, v. 5, p. 215-218, 2009.
- 4 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).
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.

- 9 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.
- 10 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.
- 11 RIETVELD, B. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography* 2, p. 65-71. 1969.
- 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.
- 14 SANBONGI, K.; OMORI, Y.; IKENO, T.; WATANABE, S.; NISHIDA, N. Standard Methods for Identifying the Microstructure of Iron Ore Sinters and Pellets. In: THE 54TH (IRON-MAKING) COMMITTEE, JAPAN SOCIETY FOR THE PROMOTION OF SCIENCE, p. 126-133. Presented at the 71st ISIJ Meeting, Tokyo (Japan), 1966.
- 15 BISH, D. L.; POST, J. E. Quantitative mineralogical analysis using the Rietveld full-pattern fitting method. *American Mineralogist*, n. 78, p. 932-940, 1993.