

CARACTERIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE AGLOMERADOS DE MINÉRIO DE FERRO

Aluno: Debora Turon Wagner

Orientador: Sidnei Paciornik

Introdução

O consumo do aço vem crescendo ao longo dos últimos 100 anos devido a sua grande aplicabilidade, com parcela cada vez maior de aço bruto produzido derivado de produtos da indústria de mineração do ferro [1]. O Brasil tem se destacado no setor minero-metalúrgico especial e essencialmente no que se refere ao ferro e aço.

As crescentes exigências de qualidade no mercado siderúrgico, as mudanças nas características das reservas disponíveis, o desenvolvimento tecnológico do setor siderúrgico e a diversidade de produtos finais colocados à disposição dos mercados consumidores tornaram as especificações dos insumos para os processos produtivos muito mais rígidos. As especificações para esta matéria-prima acompanham, em termos de restrições de qualidade, o desenvolvimento tecnológico do setor siderúrgico e dos seus produtos finais, colocados à disposição dos mercados consumidores [1].

Comercialmente, o minério de ferro pode ser encontrado na forma de pellet feed, sinter feed, granulado e pelotas. Na usina de pelotização, o pellet feed é transformado em pelotas, com tamanho médio de 11,5 mm de diâmetro [2].

O minério na forma de pelota é um insumo comercial com grande impacto econômico que precisa ser avaliado quantitativamente, pois a fração e a distribuição espacial das fases impactam as propriedades finais do produto.

A pelota é constituída basicamente por hematita, ferrito, escória – óxidos de ferro – e poros, sendo possível a presença eventual de magnetita, quartzo e calcário. Os insumos do pellet feed permitem prever quais fases estarão presentes na pelota. Já a distribuição espacial e morfologia variam de acordo com o seu cozimento e conseqüente grau de maturação.

Dentre outras características necessárias para o bom desempenho da pelota, a resistência à compressão é de extrema importância, pois as pelotas são empilhadas ao serem estocadas e transportadas. A distribuição espacial das fases e da porosidade tem impacto sobre esta propriedade. Especificamente, é preferível que os poros estejam concentrados na região central da pelota, distante da superfície, para aumentar a resistência à compressão.

Tradicionalmente, e ainda hoje nos laboratórios de controle de qualidade da Vale, a avaliação das frações de fases é feita visualmente, por um operador treinado. Esta técnica, apesar de veloz, é altamente não reprodutível e inexata. Assim, é fundamental o desenvolvimento de uma metodologia para automatizar a quantificação de fases destes aglomerados de minério de ferro.

Objetivos

Desenvolvimento de uma rotina de aquisição e processamento de imagens por Microscopia Digital através de um microscópio automático de luz refletida visando a quantificação e mapeamento de fases presentes nas pelotas.

Materiais e Métodos

Durante o desenvolvimento da metodologia que permite a quantificação automatizada de fases foi utilizado um microscópio motorizado Zeiss Axioplan 2 com câmera digital AxioCam HR (1300 x 1030 pixels), e o programa AxioVision (V4.7, Carl Zeiss Vision) para controlar o microscópio, adquirir e processar as imagens, e realizar as análises.

Para manter um padrão de iluminação, o microscópio foi utilizado na voltagem máxima. Ainda sim, os microscópios podem apresentar problemas de iluminação ou presença de sujeira nas lentes, gerando imagens que não correspondem à realidade. Para evitar esses defeitos foi adotado um padrão de reflexão de SiC e gerado uma imagem corrigida para cada aumento, que foi automaticamente utilizada como fundo para correção das imagens capturadas.

Para a observação no microscópio óptico, a pelota foi seccionada transversalmente, embutida em uma base de resina, lixada e polida. Uma amostra aproximadamente circular foi então gerada e observada.

Devido ao processo de formação das pelotas, é comum ocorrer uma variação radial na distribuição das fases presentes. Assim, é importante capturar imagens que revelem a relação posicional entre diferentes campos da amostra para, por exemplo, avaliar a variação radial da densidade de poros. Para isso, utilizou-se a metodologia de captura de imagens em mosaico [3].

A aquisição do mosaico consiste em capturar certa quantidade de campos com tamanho padrão em uma determinada região e juntar todos os campos de modo a gerar uma imagem única referente à região escolhida. Para uma dada região, a quantidade de campos varia de acordo com o tamanho de cada campo que, por sua vez, varia com o aumento. Quanto maior o aumento, maior a resolução espacial da imagem, aumentando a confiabilidade dos resultados na quantificação de fases. Por outro lado, para aumentos maiores (e campos menores), há a necessidade de capturar maior quantidade de campos, gerando imagens com centenas de Mbytes, o que torna a aquisição e processamento inviáveis em alguns casos.

Para a escolha do aumento ideal foram feitos testes, observando a mesma região da amostra, com diferentes resoluções. Assim, foram capturados mosaicos correspondentes a 1 campo a 5X, a 2x2 campos a 10X e 4x4 campos a 20X. As Figuras 1a, b e c mostram os mosaicos capturados com diferentes aumentos. Para demonstrar as conseqüências quanto à resolução para os diferentes aumentos, as Figuras 2a, b e c mostram o zoom de uma mesma região para os três aumentos. A mudança de resolução é aparente na visibilidade de detalhes nas imagens.

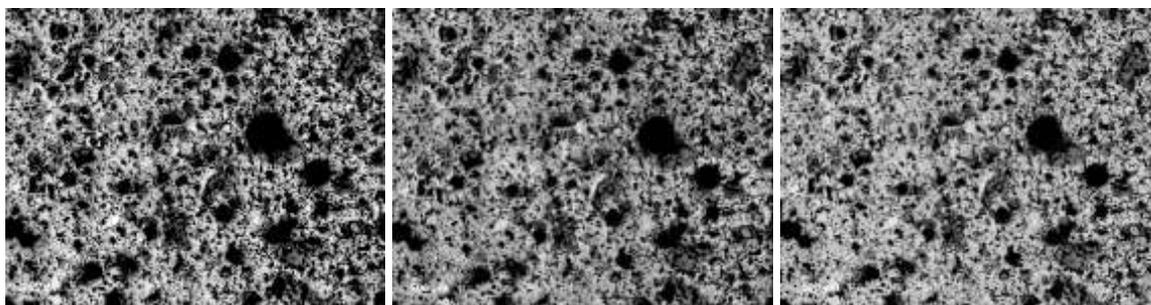


Figura 1 – Mosaicos da seção transversal da pelota referentes a uma mesma região com aumentos de (a) 5X (esquerda), (b) 10X (centro) e (c) 20X (direita).

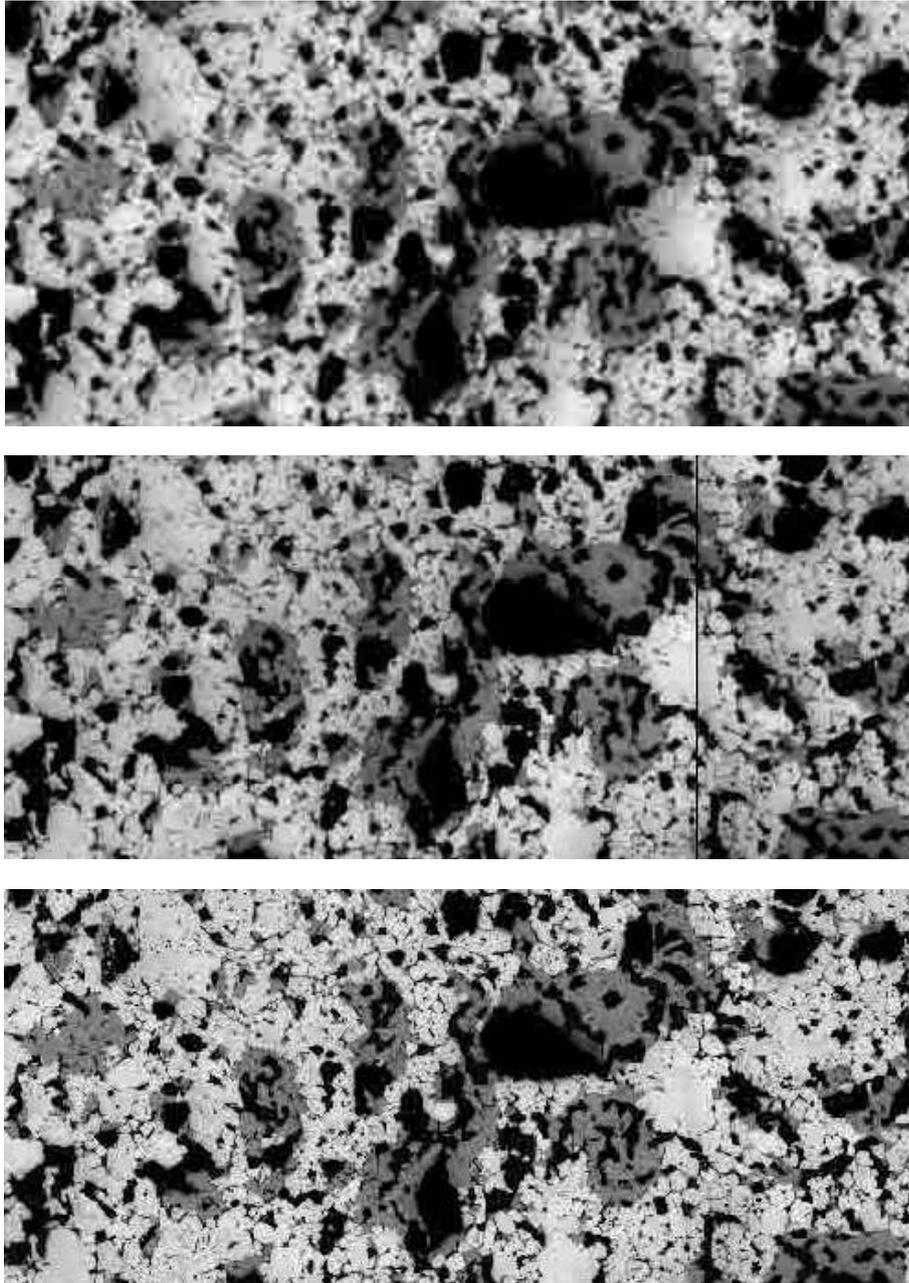


Figura 2 – Zoom da região escolhida (a) 5X, (b) 10X, (c) 20X

Resultados e Discussão

A análise de imagens foi feita em três etapas: pré-processamento, segmentação e obtenção de dados [4]. No pré-processamento foi fundamental a eliminação do efeito de transição de uma fase para outra – realce de bordas – através do comando “delineate”. A segmentação consiste em escolher os tons de corte referentes à uma fase através do histograma e da análise visual da imagem, transformando a fase selecionada em imagem binária, ou seja, a área selecionada é representada com uma cor (branco) e o que sobrou de outra cor (preto). Assim sendo, foi possível quantificar a fase – área percentual – através da imagem binária.

Cada fase possui uma faixa tonal específica. Devido a essa diferença, foi possível segmentá-las e quantificá-las. As imagens podem ser adquiridas através do microscópio em cores (RGB) ou em escala de cinza. No presente trabalho foi utilizada a escala de cinza que varia de zero a duzentos e cinquenta e cinco tons. Normalmente, através do histograma é

possível definir os limiares – tons de corte – de cada fase, pois estes correspondem aos vales. Ao analisar os histogramas de diferentes aumentos (Figura 3) constata-se que com o aumento da lente o histograma se torna mais definido, possibilitando uma melhor escolha dos tons de corte.



Figura 3 – Histogramas das imagens da Figura 1 (a) 5X, (b) 10X, (c) 20X.

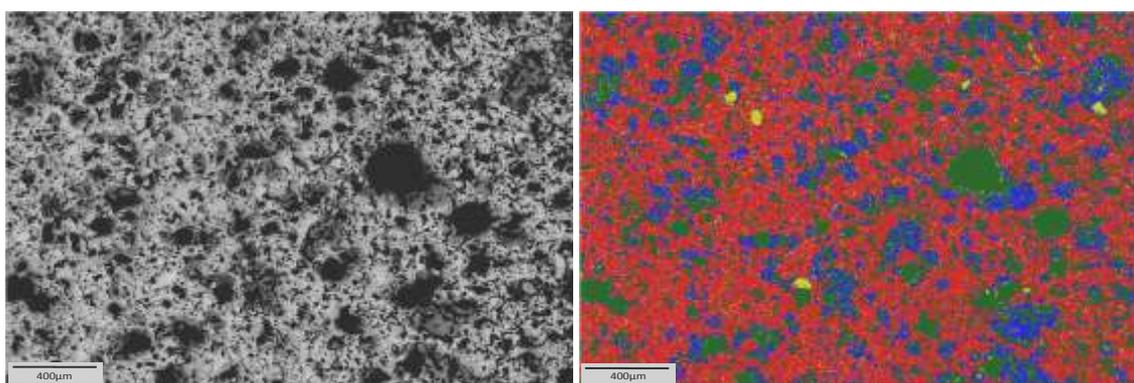


Figura 4 – Mosaico da seção transversal da pelota a 20X (a) não segmentada, (b) segmentada.

Dependendo da confiabilidade e reprodutibilidade quanto aos tons de corte utilizados para distinguir as fases, a segmentação pode ser feita de forma interativa ou automática. No presente trabalho, foi utilizada a segmentação interativa. Nos histogramas, os limites entre as fases estão indicados pelas linhas azul claro, e cada fase por uma cor distinta (poros = verde, escória = amarelo, ferritos = azul e hematita = vermelho). A Figura 4 apresenta o mosaico segmentado com cores e tons de corte apresentados no terceiro histograma da Figura 3.

Assim sendo, cada imagem binária gerada corresponde a uma fase selecionada no histograma durante a segmentação, e através dessas imagens, mediu-se a fração de área percentual correspondente a cada fase (Tabela 1).

Tabela 1 –Área percentual de cada fase, em diferentes aumentos, com respectivos tons de corte.

PELOTA	5X	10X	20X	FAIXA TONAL
HEMATITA	36.64	39.10	46.01	168-255
FERRITO	22.40	23.48	20.21	111-167
ESCÓRIA	12.79	11.04	8.64	49-110
PORO	27.62	26.36	25.04	0-48

De acordo com os histogramas e análise visual dos mosaicos obtidos em diferentes aumentos, nota-se que imagens capturadas a 20X apresentam resultados mais confiáveis do que para imagens de aumentos menores. A Tabela 1 apresenta as variações de resultados para cada fase em aumentos diferentes. Fica evidente que, devido à limitação de resolução, ocorreu uma redistribuição dos pixels em diferentes fases, comprometendo a exatidão do resultado para menores aumentos.

Isto implica que qualquer análise em baixo aumento deverá ser tratada com um enfoque mais qualitativo, demonstrando tendências, mas sem confiabilidade quantitativa. Em

contrapartida, uma visão global da amostra, em um mosaico que cubra toda a seção transversal, é extremamente valiosa. O mosaico da seção transversal de uma pelota está representado na Figura 5.

Através do mosaico da seção transversal da pelota, foi possível gerar um mapa global referente à fase desejada, tendo em conta a limitação de exatidão discutida acima. Como exemplo, a Figura 6 mostra um mapa que ilustra a distribuição espacial da porosidade na seção transversal da pelota apresentada na Figura 5. As cores da legendas representam a fração de área dos poros.

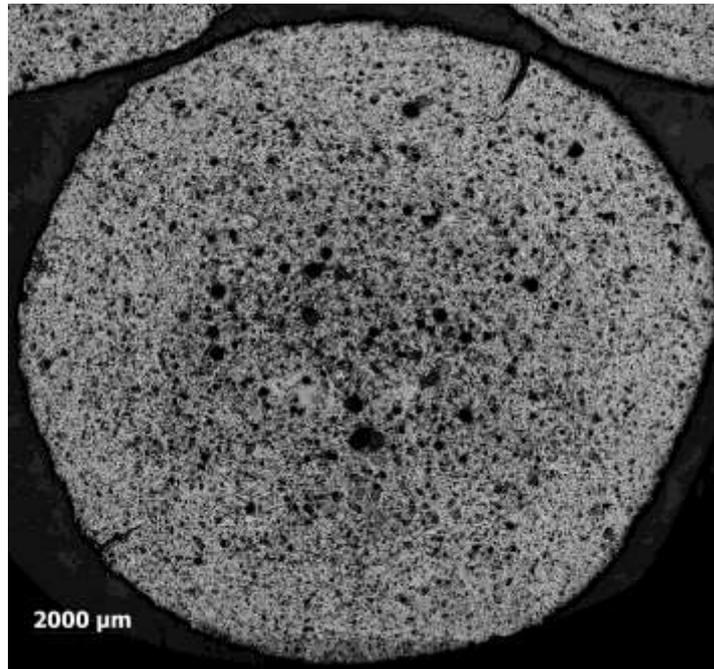


Figura 5 – Mosaico da seção transversal da Pelota a 5X.

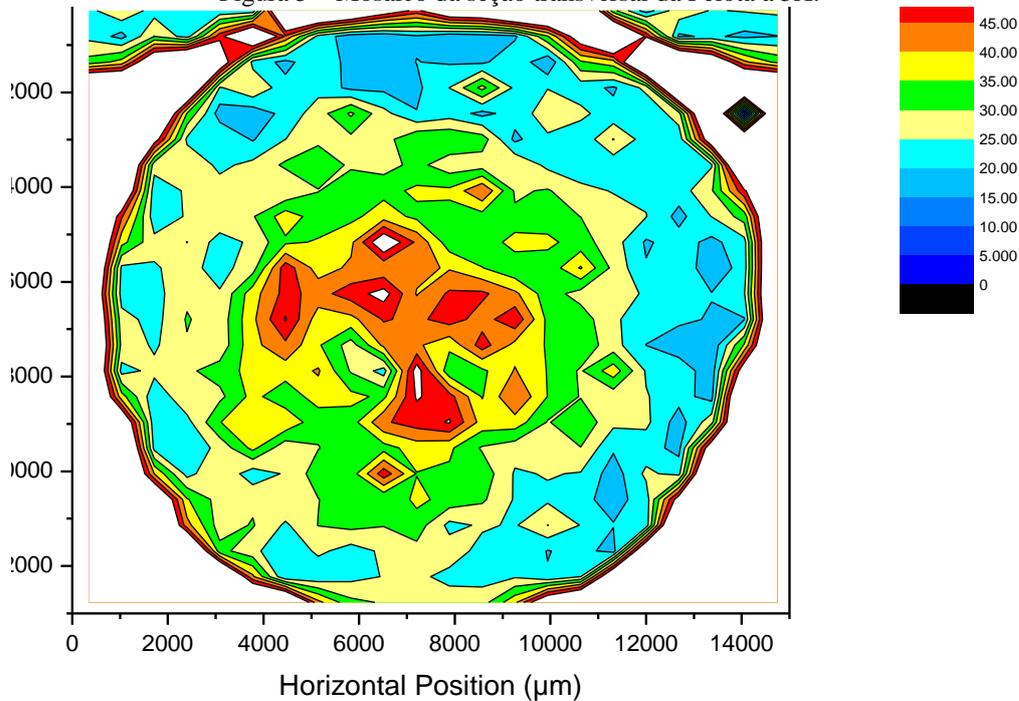


Figura 6 – Mapa de porosidade da seção transversal da Pelota a 5X.

Para uma análise quantitativa, a alternativa encontrada ao mosaico da seção transversal foi a obtenção dos mosaicos de varredura diametral, pois podem ser adquiridos a 20X já que requerem uma menor quantidade de campos capturados.

A Figura 7 mostra um dos mosaicos obtidos (26 campos na horizontal e 4 campos na vertical). A largura da imagem corresponde a um diâmetro da pelota analisada.

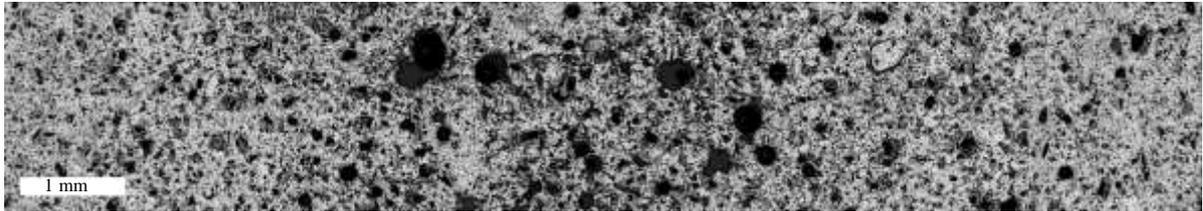


Figura 7 – Mosaico diametral horizontal da Pelota a 20X.

A Figura 8 mostra a distribuição espacial das fases presentes ao longo deste diâmetro. Cada ponto do gráfico é a média dos resultados para os 4 campos ao longo da direção vertical naquela coordenada horizontal. Como esperado, uma variação sistemática radial é claramente visível para as frações de hematita e poros e, em menor escala, para ferrite e escória. Amostras de pelotas provenientes de minas do sul e do norte do Brasil foram usadas neste estudo, e demonstraram heterogeneidade microestrutural de acordo com a procedência.

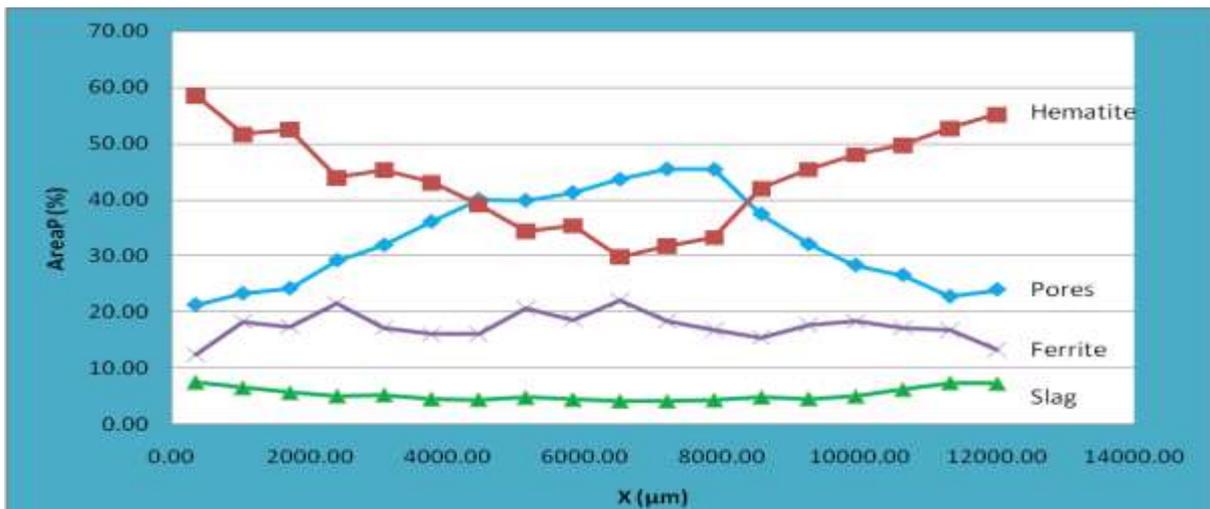


Figura 8 – Variação das frações de fases ao longo do diâmetro da pelota mostrada na Figura 6.

Para garantir uma maior confiabilidade nos resultados, para cada pelota foram feitos dois mosaicos diametraes, ortogonais entre si.

Conclusões

Um procedimento de microscopia digital para a quantificação de fases em pelotas de minério de ferro foi desenvolvido. Este procedimento é essencialmente automático e permite revelar a distribuição espacial radial das fases presentes, de maneira quantitativa se realizado a 20X.

Constatou-se também a possibilidade de avaliar semi-quantitativamente ou qualitativamente mosaicos da seção transversal a 5X, uma vez que se tem conhecimento do erro obtido em análises sob baixos aumentos. Mapeamento do posicionamento espacial de uma fase de interesse é possível de ser processada já que o mosaico foi adquirido a 5X.

Apesar da grande heterogeneidade entre pelotas de diferentes origens, a metodologia desenvolvida se mostrou robusta, podendo ser aplicada a diferentes situações, com pouca interferência do operador.

Agradecimentos

Agradeço aos alunos Gustavo Schinazi, Júlio Cezar e Hirschel Valiente, da Pontifícia Universidade Católica e aos cooperadores do projeto de minério de ferro em parceria com a Vale, Marcos Henrique, Otávio Gomes e Maria Beatriz Vieira.

Agradeço em especial ao Hirschel pelo fornecimento de alguns dados, como o mapa de porosidade, e ao meu orientador – Sidnei – por toda paciência e experiência que me passou ao longo do projeto. Agradeço também ao CNPq por acreditar no meu projeto e por financiá-lo.

Referências

- 1 - Santos, L.D. **Geologia e Mineralogia de minérios de ferro**. In: Minério de Ferro - Processos de obtenção e sua utilização na siderurgia. Ass. Brasileira de Metalurgia e Materiais (curso), Belo Horizonte, 2004.
- 2 - <http://www.vale.com/vale/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=39> – consultado em 07/08/2008.
- 3 - 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, p. 235-242.
- 4 - Paciornik, S.; Mauricio, M.H.P. Digital Imaging. In: VANDERVOORT, G.F. (Ed.). **ASM Handbook, Vol. 9: Metallography and Microstructures**. Materials Park: ASM International, 2004, p. 368-402.

Apêndice – Rotina de Processamento e Análise de Imagens

No desenvolvimento da rotina de automatização do processo, alguns passos foram seguidos de acordo com a disponibilidade do programa utilizado. A rotina pode ser analisada através da Figura 9.

Como citado anteriormente, foi utilizado o comando “delineate” para realce de bordas, com parâmetros fixos de “Threshold” = 3 e “size” = 3.

Em seguida, foi utilizado o comando que possibilita a segmentação, que é chamado de “Threshold interactive”. Esse comando se repete por quatro vezes uma vez que é necessário segmentar as quatro fases presentes na amostra.

Em seguida, o comando “Load measurement properties” foi ativado para carregar o arquivo que contem o tipo de medida escolhida – área percentual – para que as imagens binárias geradas fossem processadas.

Após o carregamento, se iniciou o processamento e medida de cada fase separadamente na imagem. Para que sejam criadas tabelas de valores separadas referentes a cada fase, o comando que inicia esse processamento – “Start measurement” – precisou ser carregado quatro vezes.

Os valores gerados foram organizados em forma de colunas. As colunas correspondentes às fases foram adicionadas a um arquivo único com o objetivo de criar uma tabela de dados. O comando “Join Table Columns” foi carregado quatro vezes por ter como função a junção de colunas.

Para analisar um mosaico, por exemplo, é preciso processar as várias imagens que o formam. A rotina criada mede as quatro fases contidas em uma imagem para então medir a próxima imagem. Assim sendo, foi preciso adicionar os dados gerados a cada imagem à tabela através do comando “Append Data Table”.

Toda vez que a rotina é executada, uma janela se abre no processamento da primeira imagem, possibilitando a escolha do destino de gravação do arquivo que contém os dados. O arquivo gerado tem formato “csv” e pode ser aberto através do programa Excel.

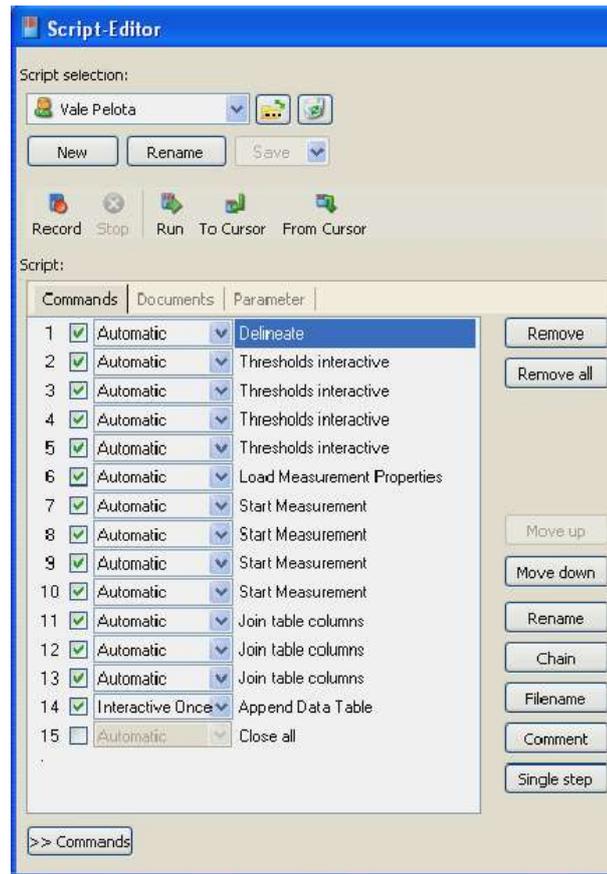


Figura 9 – Rotina para processamento do mosaico.