

# 1

## Introdução

O ferro é o metal mais usado pela sociedade devido à alta disponibilidade, pelas propriedades físicas (dutilidade, maleabilidade, resistência mecânica, etc.), por sua importância na produção de aço e ferro fundido, assim como pelas suas muitas aplicações.

O uso do ferro vem desde a antiguidade. Provavelmente a primeira vez que o homem fez contato com o ferro metálico foi sob a forma de meteoritos, daí a etimologia da palavra siderurgia, cujo radical latino *sider* significa estrela ou astro. No antigo Egito foram descobertos ornamentos de ferro datados de cerca de 4000 A.C., também na pirâmide de Gizé foram achadas peças datadas de 2900 A.C. A primeira indústria do ferro apareceu ao sul do Cáucaso, 1700 A.C., entre os Hititas. Também, na Assíria, foram encontradas ferramentas de aço que datavam de 700 anos A.C.[1]

Na atualidade, o uso crescente do aço e do ferro fundido na fabricação de produtos de consumo evidencia a importância da indústria metalúrgica para a economia nacional e global. Em contrapartida, a qualidade do minério de ferro disponível vem diminuindo ao longo dos anos. Portanto, as empresas de mineração tem se esforçado para aumentar a produção e melhorar seus produtos, a fim de manter e aperfeiçoar o seu desempenho no mercado.

O minério de ferro é um material policristalino que passou por vários processos naturais complexos. Estes processos ocorreram durante tempos geológicos, devido aos efeitos da pressão, às mudanças de temperatura, à recristalização e à erosão, dando origem a diversas características intrínsecas, e conseqüentemente, a um comportamento industrial variável.[2]

Assim, o minério de ferro é normalmente utilizado de duas formas: minérios granulados e minérios aglomerados. Os granulados (entre 25 mm e 6 mm) são adicionados diretamente nos fornos de redução, enquanto os aglomerados são os minérios finos que devido à sua granulometria necessitam de aglomeração. Daí surgem as denominações *sinter-feed* (entre 6,35 mm e 0,15 mm) e *pellet-feed* (menos de 0,15 mm) que identificam as frações usadas nos processos de sinterização e pelotização, respectivamente.[3]

Devido ao grande interesse econômico, bem como o seu desempenho

durante o processo, a caracterização de cada uma destas frações adquire grande importância. No entanto, não existe um método universal para isto. De fato, este é um problema complexo, uma vez que são diversos os atributos que caracterizam forma, textura, trama ou porosidade, assim como as maneiras como são combinados em cada caso.[4]

Os minerais carreadores de ferro mais comuns (hematita, magnetita e goethita) podem ser identificados visualmente no Microscópio de Luz Refletida (MLR) através de suas refletâncias distintas.[5] Assim, a caracterização qualitativa de minérios de ferro é geralmente realizada através de avaliação visual no MLR.

Na indústria mineral, a caracterização microestrutural (mineralógica e textural) do minério de ferro e seus aglomerados é tradicionalmente realizada por operadores humanos, pela observação de amostras ao MLR, para identificar as fases presentes e estimar suas frações. Esse é um procedimento rotineiro, realizado algumas vezes por dia e conseqüentemente suscetível a falhas decorrentes da fadiga humana, além de erros aleatórios diversos. Deste modo, tem havido um interesse crescente no desenvolvimento de sistemas automáticos de análise quantitativa que possam conferir maior reprodutibilidade, confiabilidade e velocidade.

Por outro lado, sistemas automáticos de análise digital de imagens são capazes de identificar hematita, magnetita e goethita pelas suas tonalidades em imagens obtidas pelo MLR. Estes sistemas têm a vantagem de serem mais velozes, práticos e reprodutíveis do que um operador humano. Nos últimos anos, algumas metodologias foram desenvolvidas para realizar a caracterização mineralógica de minérios de ferro através de sistemas de análise de imagens.[6, 7, 8, 9]

A grande maioria dos minérios de ferro brasileiros é essencialmente hematítica, geralmente envolvendo outros minerais como magnetita, goethita e minerais de ganga, principalmente quartzo. No entanto, estes minérios apresentam grande diversidade de microestruturas. A hematita, por exemplo, pode ser classificada como lobular, lamelar, granular, microcristalina ou martita.

O tamanho, a forma e a distribuição dos cristais de hematita podem influenciar na redutibilidade e resistência mecânica dos aglomerados. Por exemplo, hematitas granular e lamelar aumentam a resistência mecânica dos aglomerados, mas reduzem sua porosidade e sua redutibilidade. Já a hematita martítica age no sentido oposto, aumentando a porosidade e redutibilidade dos aglomerados, mas reduzindo sua resistência mecânica.[2, 10, 11] Assim, a determinação das características texturais da hematita certamente contribui para um melhor conhecimento dos minérios de ferro, abrindo novas possibilidades a fim de

aprimorar seu processamento.[12]

A hematita é um mineral fortemente anisotrópico. Ela apresenta pleocroísmo de reflexão (birrefletância), ou seja, sua refletância e, consequentemente, o seu brilho na imagem mudam com diferentes orientações dos cristais em relação ao plano de incidência da luz.[5] Essa variação de brilho é sutil, mas é perceptível ao olho humano treinado no MLR.

Por sua vez, o uso combinado de um polarizador e um analisador no MLR gera variações de brilho e cores devido à anisotropia.[13] Esta abordagem pode ser usada para obter imagens que apresentam um contraste suficiente para diferenciar os cristais.

Como já constatado, os minérios de ferro podem ter uma estrutura muito complexa, com a associação de diferentes minerais e texturas. De tal modo, não é muito difícil imaginar que criar um algoritmo de análise de imagens capaz de identificar e caracterizar todas as formas de hematita é um grande desafio. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia de aquisição, processamento e análise de imagens no MLR para:

- (i) Segmentar cristais de hematita compacta (granular, lamelar e lobular) no minério de ferro em amostras ricas neste mineral;
- (ii) Medir tamanho de cristais de hematita compacta e;
- (iii) Medir os cristais de hematita compacta visando a sua classificação segundo sua morfologia.

O grupo de pesquisa em Microscopia Digital (MD) do DEMa/PUC-Rio está tentando desenvolver uma metodologia de classificação automática de tipos de hematita através de duas abordagens diferentes, analítica e sintética. A primeira é objeto de estudo deste trabalho, já a segunda será desenvolvida por outro integrante do grupo como parte da sua dissertação de mestrado.

O método sintético consiste em empregar parâmetros de textura com o objetivo de identificar tipos texturais de hematita não compacta (martita e microcristalina). Com este fim, as imagens são analisadas em *textels* (elementos de textura), dos quais são extraídos os parâmetros de textura. Estes parâmetros de textura são empregados como atributos no sistema de classificação.

Por sua vez, o método analítico combina diversas imagens de um mesmo campo, obtidas com e sem polarização. A imagem sem polarização permite separar a hematita das demais fases, a partir de seu brilho. As imagens com polarização permitem encontrar as fronteiras entre os cristais de hematita. Uma vez separados os cristais de hematita, estes são medidos e classificados segundo sua morfologia.[2, 13]

O método analítico tem como característica fundamental o reconhecimento individual de cada cristal de hematita, porém o método é ineficiente na identificação dos cristais das fases não compactas. É assim que o método sintético visa complementar esta deficiência, criando, no conjunto, uma metodologia de classificação automática dos cinco tipos de hematita.

A presente tese está organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste desta introdução.

O segundo capítulo (“Revisão Bibliográfica”) traz uma retrospectiva do minério de ferro, sua importância econômica, sua composição e sua microestrutura. Ao mesmo tempo, expõe o conteúdo teórico das diversas técnicas experimentais envolvidas no trabalho e descreve algumas técnicas que vêm sendo estudadas.

O terceiro capítulo (“Materiais e Métodos”) descreve o mecanismo de preparação das amostras de minério de ferro. Por sua vez, apresenta as etapas experimentais, assim como os equipamentos e técnicas usadas na análise destas amostras. Neste capítulo, são também descritas as técnicas de identificação, medição e classificação dos cristais de hematita.

O quarto capítulo (“Resultados e Discussões”) apresenta e discute os resultados. Neste capítulo, são expostas as vantagens e desvantagens de cada técnica experimental, assim como sua eficiência na identificação de cristais de hematita.

Finalmente, o quinto capítulo (“Conclusões”) apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

*Cumprir comentar, nesta introdução, sobre uma característica um tanto peculiar da estrutura do presente trabalho. Para atingir os objetivos listados acima foram desenvolvidos diferentes métodos de microscopia digital, envolvendo a criação de rotinas sofisticadas de processamento e análise de imagens. Assim, parte dos métodos “utilizados” foram, na verdade, “desenvolvidos” no decorrer do trabalho. Por esta razão, os conteúdos dos capítulos de Materiais e Métodos e de Resultados muitas vezes se misturam e retroalimentam, gerando uma estrutura um tanto fora do padrão.*