



CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE FERRO ESPECULARÍTICO

Ariella Vianna Fontes

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Otávio da Fonseca Martins Gomes

Rio de Janeiro

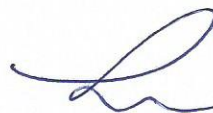
Março de 2013

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE FERRO ESPECULARÍTICO

Ariella Vianna Fontes

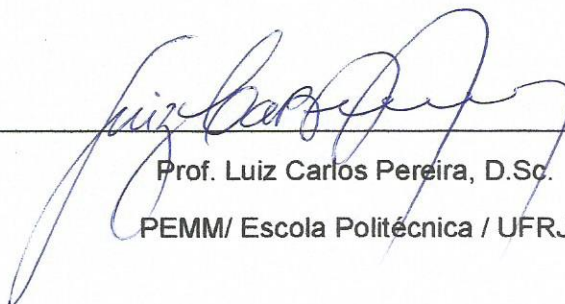
PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA DE MATERIAIS.

Examinado por:



Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, D.Sc.-

Orientador



Prof. Luiz Carlos Pereira, D.Sc.

PEMM/ Escola Politécnica / UFRJ



Reiner Neumann, D.Sc.

Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2013

Fontes, Ariella Vianna

Caracterização Tecnológica de Minério de Ferro Especularítico/ Ariella Vianna Fontes Fontes. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

X, 70, p.: i1. ; 29,7 cm.

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Otávio da Fonseca Martins Gomes

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Materiais, 2013.

Referências Bibliográficas: p 66-70.

1. Especularita. 2. Caracterização. 3. Microscopia Ótica. 4. Análise de Imagens. I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Materiais. III. Estudo da Caracterização Tecnológica de Minério de Ferro Especularítico.

Aos meus pais e amada filha Maria Clara.

Agradecimentos

Ao meu pai Lúcio e minha mãe Shirlane, que me apoiaram incondicionalmente em todas as minhas escolhas. Por serem exemplos de dedicação e sabedoria, sempre me incentivando a seguir em frente e conquistar meus objetivos. Com eles aprendi que é possível realizar sonhos, razão pela qual cheguei até aqui.

À minha filha Maria, pela sua compreensão em meus momentos de ausência, por todo seu amor e carinho que me deram forças para seguir em frente.

Ao meu irmão Bernardo, que sempre me ajudou nos momentos que precisei.

Ao meu namorado Rafael, pelo companheirismo e dedicação. Sempre, incentivando minhas escolhas, paciente com minhas inquietações e entusiasmado com meu trabalho. São inúmeros os motivos para lhe agradecer. Certamente não seria da mesma forma sem ele ao meu lado.

Aos amigos Felipe, Marina e Fernando por dividir durante esses anos ansiedades, sonhos e conhecimentos. Por não me deixar desanimar nas horas de dificuldades, pela amizade e momentos únicos que serão sempre lembrados.

Ao Otávio Gomes, pela orientação, ensinamentos e oportunidades ao longo desses anos, sem a qual este trabalho não teria sido realizado.

À professora Renata Simão, por ser uma amiga a quem devo grande parte da minha conquista. Uma pessoa brilhante que trabalha com amor, pesquisando, orientando, e ensinando.

Ao professor Luís Marcelo, pelos ensinamentos, desde o período em que fui sua aluna, monitora até as etapas desse projeto. As orientações dadas foram fundamentais para a finalização deste trabalho.

Ao Reiner, por toda atenção, sempre disposto a ajudar contribuindo imensamente para realização deste projeto.

Aos meus sogros Cláudio e Gina, pelo apoio e palavras de motivação, sempre torcendo pelas minhas conquistas.

Aos meus melhores amigos, que compreenderam minha ausência, me incentivando e contribuindo de alguma forma nesta etapa da minha vida.

Aos amigos do CETEM e do LTM, em especial ao Rangler, sempre solícito e pronto a ajudar.

À Atlantica Mining pelo fornecimento da amostra para o estudo.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia de Materiais.

Caracterização Tecnológica de Minério de Ferro Especularítico

Ariella Vianna Fontes

Março/ 2013

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Otávio da Fonseca Martins Gomes

Curso: Engenharia de Materiais

A specularita é uma forma de hematita composta por flocos lamelares que, devido a essa morfologia, tem algumas aplicações com maior valor de mercado do que o concentrado de minério de ferro para produção de aço. O presente trabalho apresenta uma caracterização tecnológica preliminar de um minério de ferro, com o fim de confirmar seu caráter specularítico e propor uma rota de processo. A cominuição foi feita com o britador de rolos para evitar a fragmentação excessiva com perda da estrutura em lamelas. Para a concentração, foi empregado o separador magnético de baixa e alta intensidades. A análise microestrutural foi realizada por microscopia ótica de luz refletida através do uso combinado de imagens de campo claro e sob luz circularmente polarizada. Os resultados obtidos mostraram que o minério estudado é realmente specularítico e que sua concentração e liberação são possíveis.

Palavras-chave: specularita, caracterização, microscopia ótica, análise de imagens.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer.

Technological Characterization of Micaceous Iron Ore

Ariella Vianna Fontes

March/ 2013

Advisors: Luís Marcelo Marques Tavares

Otávio da Fonseca Martins Gomes

Course: Materials engineering

Specularite, also known as micaceous iron ore, is a form of hematite composed of lamellar flakes. Due to this morphology it has a few uses with higher market value than the concentrated iron ore steel production. This paper presents a preliminary technological characterization for an iron ore, in order to confirm its specular characteristics and indicate a process route. Comminution was conducted with the roll crusher to avoid excessive generation of fines and the loss of lamellar structure. A high intensity magnetic separator was employed in order to concentrate the samples. Reflected light microscopy was used to perform the microstructural analysis, by combining bright field images and circularly polarizes lights. The results showed that the ore studied is actually predominantly specularite and its concentration is possible.

Keywords: specularite, characterization, optical microscopy, image analysis.

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Minério de Ferro	3
2.1.1. Especularita	6
2.2. Caracterização Tecnológica	7
2.2.1. Aspectos Gerais.....	7
2.2.2. Classificação granulométrica	9
2.2.3. Cominuição.....	11
2.2.3.1. Britador de Mandíbulas	12
2.2.3.2. Britador de Rolos	14
2.2.4. Concentração de Minério de Ferro	15
2.2.5. Difração de Raios-X (DRX)	18
2.2.6. Picnometria.....	20
2.2.7. Microscopia.....	20
2.2.7.1. Microscopia Ótica.....	20
2.2.7.1.1. Campo claro e Campo escuro	21
2.2.7.1.2. Polarização	22
2.2.7.1.3. Polarização Circular	23
2.2.7.1.4. Auto Foco.....	26
2.2.7.1.5. Aquisição Automática de Imagens	27
2.2.8. Reconhecimento de Padrões e Classificação	28
3. Procedimento Experimental	32
3.1. Cominuição	33
3.2. Classificação granulométrica	35
3.3. Concentração do Minério de Ferro	36
3.4. Difração de raios-x (DRX).....	36
3.5. Picnometria	37

3.6. Aquisição de Imagens	38
3.7. Análise microestrutural qualitativa	39
3.8. Análise microestrutural quantitativa	39
4. Resultados e Discussão	41
4.1. Avaliação da Cominuição	41
4.2. Concentração	43
4.2.1. Difração de Raios-X (DRX)	44
4.2.2. Picnometria.....	47
4.3. Análise microestrutural	49
4.3.1. Análise microestrutural qualitativa	49
4.3.2. Análise microestrutural quantitativa	64
5. Conclusões.....	65
6. Referências Bibliográficas	66

1. Introdução

O minério de ferro representa uma importante parcela na economia mundial e nacional, principalmente como matéria-prima para o aço, que é largamente utilizado em diversos setores. Mesmo com a crise econômica, o preço do minério de ferro continua atraente. A competitividade deste mercado tem ampliado o interesse da indústria em aumentar a produção e aprimorar a qualidade de seus produtos. Neste sentido, tem-se investido cada vez mais na caracterização do minério de ferro, visando especialmente correlacionar propriedades microestruturais com parâmetros de lavra, beneficiamento mineral e processos siderúrgicos. “A caracterização de minérios é uma etapa fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, pois fornece ao engenheiro os subsídios mineralógicos e texturais necessários ao correto dimensionamento da rota de processo, otimizando o rendimento global de uma planta” (Neumann et al., 2004: 55). A caracterização permite a determinação de propriedades físicas e químicas de minérios atingindo, de acordo com a aplicação, uma otimização da qualidade com o menor custo associado.

Os minérios de ferro brasileiros são majoritariamente hematíticos, constituídos basicamente por hematita, magnetita, goethita, além de alguns minerais de ganga, principalmente quartzo. Todavia, podem apresentar diferentes texturas (Fontes & Gomes, 2012)

Nos anos 90, técnicos da Vale S.A. desenvolveram uma classificação para texturas de hematita baseada somente em aspectos microestruturais (____,1998). Foram definidas cinco classes: granular, lamelar, lobular, martita e microcristalina. Nos dias de hoje, esta classificação é utilizada pela Vale e outras empresas para a caracterização de minérios de ferro brasileiros.

Os diferentes tipos texturais de hematita afetam diretamente os processos de beneficiamento e aglomeração do minério de ferro, assim como a qualidade dos sínters e pelotas (Libaneo et al., 2001; Vieira et al., 2003; Ribeiro & Vieira, 2004). A especularita (hematita lamelar) é um dos minerais-minérios que contribui para a melhoria das qualidades físicas das pelotas de minério de ferro, influenciando sua produtividade e manuseio. A grande influência no desempenho dos processos industriais e nas propriedades físicas dos produtos de minério de ferro justifica a importância da determinação da especularita (Pereira et al., 2003).

Contudo, a especularita tem uma aplicação com maior valor agregado, em pigmentos anti-corrosivos. Suas propriedades permitem resultados expressivos na adesão, tolerância à umidade e resistência a abrasão, aumentando significativamente a vida útil do revestimento sem causar danos ao ambiente (www.santafegoldcorp.com, 2009). A aplicação da especularita como pigmento anti-corrosivo é vasta, como por exemplo seu emprego em pontes, plataformas de petróleo, dutos, dentre outras estruturas de aço.

As jazidas de minério de ferro especularítico são raras e se encontram em posse de poucas empresas no mercado mundial. A Europa e Ásia consomem mais de 80% da produção de especularita, que, devido aos benefícios trazidos com suas propriedades, à dificuldade de encontrar jazidas, e aos altos custos de produção, possuem preço elevado. Enquanto o minério de ferro custa aproximadamente 150\$/t, a especularita para pigmento custa mais de 1000\$/t (www.indexmundi.com, 2013). Apesar do alto custo da especularita, fatores ambientais e econômicos estão resultando na mudança do uso do zinco em revestimentos anticorrosivos em estruturas metálicas para o uso do pigmento especularítico.

A Mina de Borda da Mata, localizada em Sergipe, pertencente à Atlantica Mining é uma promissora jazida de minério de ferro com característica especularítica.

O objetivo deste trabalho é uma caracterização tecnológica preliminar deste minério visando verificar a presença de especularita e sugerir um rota para sua concentração.

2. Revisão Bibliográfica

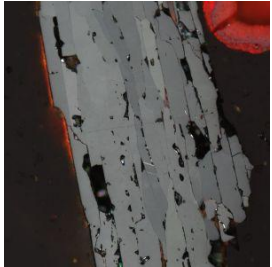
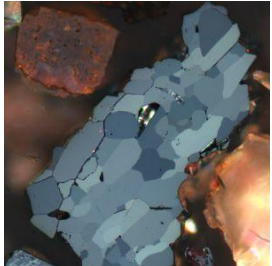
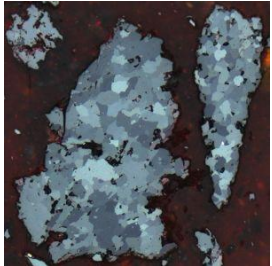
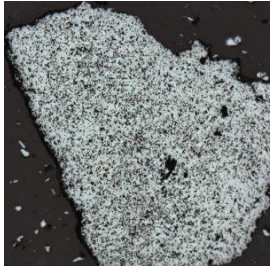
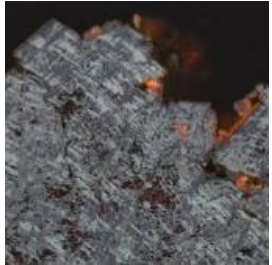
2.1. Minério de Ferro

A contribuição econômica referente à importação/ exportação do minério de ferro demonstra sua importância no cenário mundial. O Brasil possui uma das cinco maiores reservas de minério de ferro do mundo mostrando sua importância dentro deste contexto. A aplicação do aço em diversos setores, tais como na construção civil, indústria de máquinas e equipamentos, traduz a importância das pesquisas desenvolvidas visando melhorar o beneficiamento do minério de ferro. O processo de obtenção do aço depende fortemente da pelletização, ou seja, da aglomeração do minério de ferro conferindo características adequadas para a etapa seguinte (redução). A competitividade na produção de aço coloca a qualidade do minério de ferro como um fator primordial, levando ao interesse pela sua caracterização tecnológica.

As diferentes morfologias da hematita são características importantes no processo de pelletização e na qualidade das pelotas produzidas (Lessa et al., 2007). Por exemplo, hematitas lamelar e granular aumentam a resistência mecânica das pelotas, mas reduzem sua porosidade e sua redutibilidade. Já a hematita martítica age no sentido oposto, aumentando a porosidade e redutibilidade das pelotas, mas reduzindo sua resistência mecânica.

A Tabela 1 apresenta a tipologia de texturas de hematita desenvolvida pela Vale (____, 1998), listando as principais características de cada classe e mostrando imagens típicas.

Tabela 1: Classes de Hematita (Adaptado de Vale, 1998.)

Classe	Características	Imagem típica
Lamelar	– Cristais inequidimensionais, hábito tabular. – Contatos retilíneos. – Cristais compactos	
Granular	– Formatos regulares equidimensionais. – Contatos retilíneos e junções trípticas. – Cristais compactos.	
Lobular	– Formatos irregulares inequidimensionais. – Contatos irregulares, geralmente imbricados.	
Microcristalina	– Cristais muito pequenos (< 0,01 mm). – Textura porosa. – Contatos pouco desenvolvidos.	
Martita	– Hematita com hábito de magnetita. – Oxidação segundo os planos cristalográficos da magnetita. – Geralmente porosa.	

2.1.1. Especularita

A hematita especular possui características específicas que permitem a fabricação de tintas anticorrosivas, fornecendo uma proteção duradoura para estruturas metálicas em ambientes muito agressivos, como o ambiente marinho e o industrial (Giúdice & Benítez, 2000).

O hábito cristalino da especularita permite sua fratura em clivagem com fragmentos semelhantes à de placas muito finas, ou seja, lamelas, produzindo assim uma melhor ação protetora. A Figura 01 mostra uma imagem de especularita observada ao microscópio ótico.



Figura 01 – Flocos de especularita observados ao microscópio ótico. Largura da Imagem: 0,150 mm (Fonte: <http://myweb.tiscali.co.uk/tonyjewell/kellymine/paint.html>, 2012)

Diversas estruturas são protegidas por alguma forma de revestimento de óxido de ferro especularítico. Quando uma tinta baseada em óxido de ferro especularítico é aplicada em uma determinada superfície, as partículas de pigmento são orientadas em múltiplas camadas paralelas ao substrato, se intercalando e sobrepondo. Não tendo uma forma lamelar, a orientação e foliação do pigmento no interior do filme de tinta é

claramente impossível (Figura 02). Pigmentos contendo grandes proporções de partículas granulares não conseguem formar uma barreira multicamadas contra umidade e poluentes assim como efetivamente preservar o adesivo contra radiação UV proveniente da luz do sol (Giúdice & Benítez, 2000).

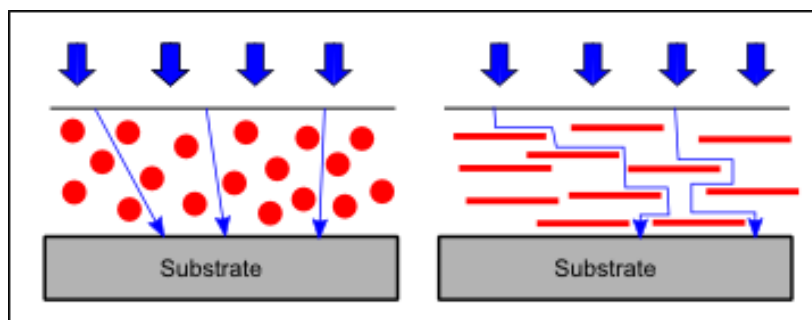


Figura 02 - Estrutura dos revestimentos de tinta. À esquerda observa-se o revestimento de tinta com pigmento de partículas esféricas (vermelho), mostrando que a luz ultravioleta e a água penetram facilmente até o substrato a ser protegido. À direita está uma camada de tinta com pigmentos especularíticos e pode ser visto que a penetração é muito mais difícil, devido ao efeito da vedação dos flocos sobrepostos.
(Fonte: <http://myweb.tiscali.co.uk/tonyjewell/kellymine/paint.html>, 2012)

2.2. Caracterização Tecnológica

2.2.1. Aspectos Gerais

A caracterização tecnológica permite conhecer as principais propriedades químicas e físicas de determinado minério. De posse de informações como densidade, propriedades magnéticas, refração e reflexão da luz, etc., é possível indicar uma rota de processo adequada de acordo com as características e necessidades do mercado. A alteração de pequenas propriedades no material pode mudar a eficiência no processo de beneficiamento e por isso a caracterização tecnológica vem ganhando espaço no contexto da indústria mineral.

“A maneira de se caracterizar uma amostra de minério varia muito com a própria mineralogia e as propriedades inerentes ao minério, bem como os objetivos e a abrangência da caracterização, com as possíveis rotas de processamento, e com a disponibilidade de tempo, capacidade analítica e recursos financeiros” (Neumann et al., 2004: 55).

Para o aproveitamento ótimo de um recurso mineral, a caracterização tecnológica se divide, de forma geral, em quatro grandes estágios. Estes abrangem desde a identificação do mineral de interesse até sua quantificação e análise de liberação, mostrando a eficiência da rota de processo escolhida.

Os principais estágios de caracterização estão descritos na Figura 03.

Fracionamento da Amostra	•Separação por densidade, susceptibilidade magnética e classificação granulométrica.
Identificação das Fases	•Utilização de técnicas analíticas tais como Difração de raios-x, Microscopia ótica e eletrônica de varredura para identificação mineralógica.
Quantificação dos Minerais	•A análise quantitativa é feita normalmente após a concentração do mineral de interesse.
Liberação do Mineral	•Esta etapa é a principal, mostrando a eficiência na liberação do mineral de interesse. Um dos métodos mais utilizados para obtenção desses resultados é a análise de imagens.

Figura 03 – Principais estágios de caracterização.(Referência: Neumann et al., 2004)

As técnicas utilizadas em cada etapa variam de acordo com o objetivo do trabalho, as propriedades do mineral analisado e resultados desejáveis. O exemplo de um fluxograma para caracterização tecnológica pode ser observado na Figura 04:

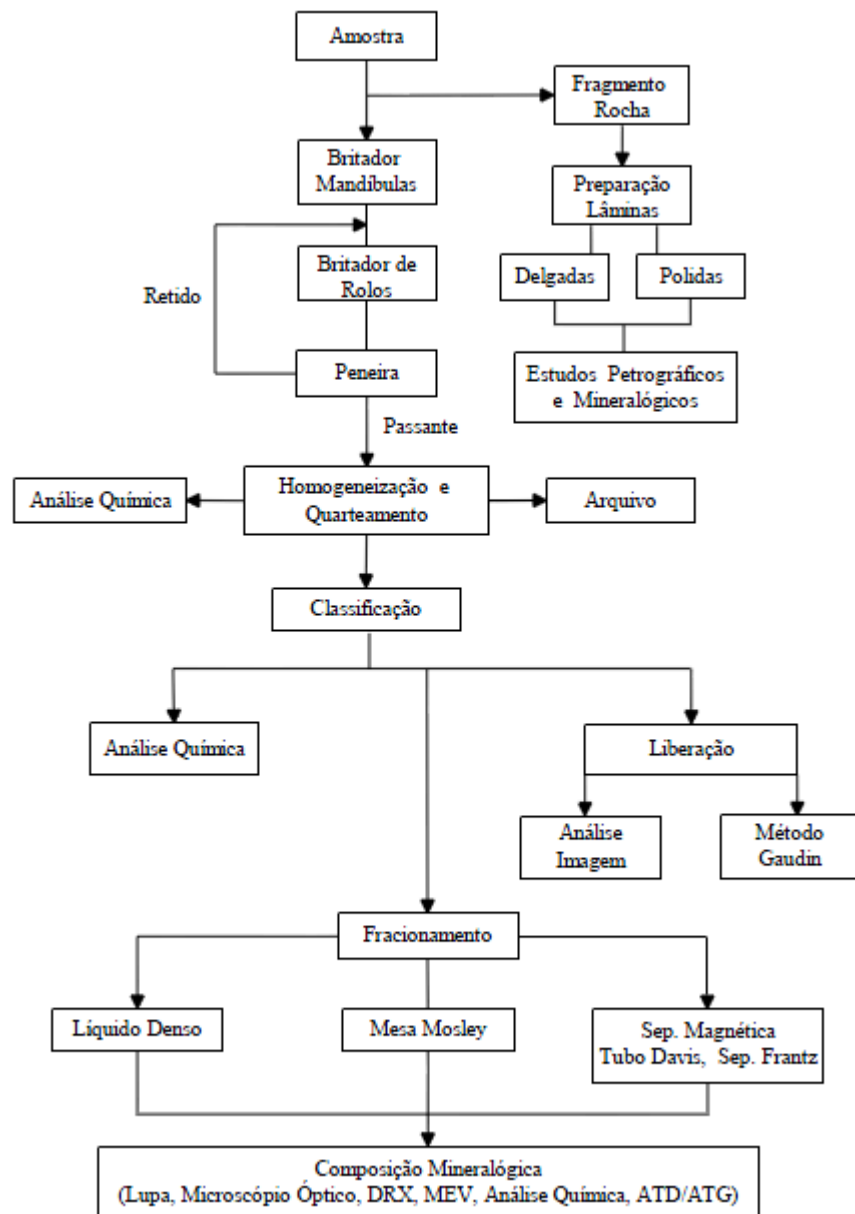


Figura 04 – Exemplo de fluxograma para caracterização tecnológica de minérios.
(Referência: Neumann et al., 2004)

2.2.2. Classificação granulométrica

O minério de ferro na forma de rocha é, normalmente, sujeito a uma primeira etapa a britagem, permitindo adequar a granulometria para realização das etapas seguintes. As características dos britadores utilizados serão descritas no próximo tópico.

Após a britagem, a amostra é homogeneizada e quarteada (Quarteador Jones) para obter uma fração representativa para as demais etapas.

A classificação granulométrica a seco é muito utilizada, apesar do peneiramento a úmido ser mais eficiente. As aberturas das peneiras comumente utilizadas variam entre 3,35 mm e 0,053 mm.

O peneiramento a seco é feito no equipamento denominado Ro-Tap, que possui um princípio simples de funcionamento. Uma alíquota representativa da amostra é colocada na primeira peneira da série (maior abertura) e levada ao equipamento que irá vibrar durante um determinado tempo permitindo que a amostra passe pelas peneiras que possuem abertura maior que as partículas daquela fração.



Figura 05 – Ro-Tap (peneiramento a seco). (Fonte: www.test-sieve.com)

A análise granulométrica permite conhecer a distribuição dos tamanhos de partículas de uma determinada amostra (Figura 06).

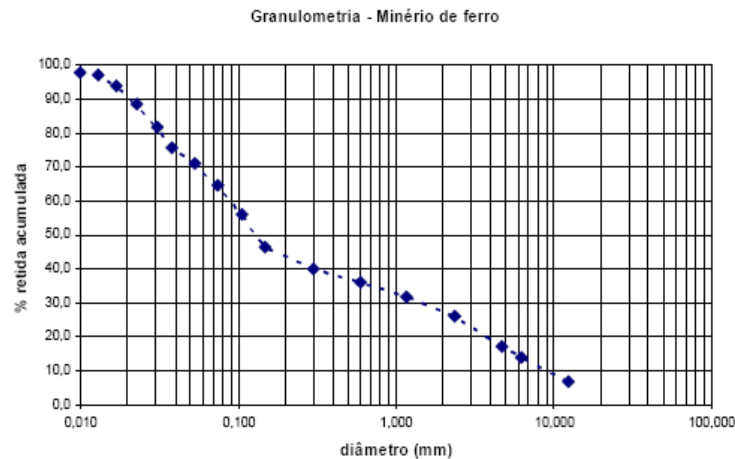


Figura 06- Análise granulométrica de uma amostra de minério de ferro (Referência: Neumann et al., 2004)

2.2.3. Cominuição

A cominuição de um material é uma etapa muito importante para a futura caracterização do mineral de interesse, que no presente trabalho, é o minério contendo a hematita especular. A fragmentação é feita mecanicamente através do impacto ou compressão, com a finalidade de liberar o mineral de interesse, na maioria das vezes agrupado com outros materiais (minerais de ganga).

Os processos de cominuição podem ser agrupados em três etapas:

- *Etapa de Lavra* – Consiste na retirada do minério ou rocha da natureza.
- *Etapa de Britagem* – Permite reduzir a granulometria do material, tornando-a adequada para alimentar o moinho.
- *Etapa de Moagem* – O fino produto obtido após essa etapa facilita etapas posteriores, tal como a concentração dos minérios de interesse.

A britagem possui diversos estágios e dependendo da granulometria da alimentação, será classificada em primária, secundária, terciária ou quaternária. A Tabela 02 mostra os estágios de britagem de acordo com o tamanho máximo das partículas de alimentação.

Tabela 2: Classificação dos estágios de britagem (Referência: Figueira et al., 2004)

Estágio de Britagem	Tamanho Máximo de Alimentação (mm)	Tamanho Máximo de Produção (mm)
Britagem Primária	1000	100,0
Britagem Secundária	100	10,0
Britagem Terciária	10	1,0
Britagem Quaternária	5	0,8

Na Britagem primária, as rochas extraídas das minas alimentam o britador em uma operação realizada a seco. Esta etapa visa permitir o transporte e a preparação para a cominuição fina. A etapa posterior da britagem primária é denominada Britagem secundária, na qual a granulometria da alimentação é mais fina. Assim o produto gerado que é mais fino, torna-se adequado à moagem.

2.2.3.1. Britador de Mandíbulas

Utilizado no estágio de primária ou secundária, o Britador de Mandíbulas possui como princípio de funcionamento a movimentação de uma mandíbula de forma que o impacto irá cominuir o material de alimentação.

A especificação dos britadores de mandíbulas é feita em função da abertura da alimentação. A Figura 07 mostra de forma esquemática um britador de mandíbulas. A Tabela 3 mostra as principais características de um britador de mandíbulas.

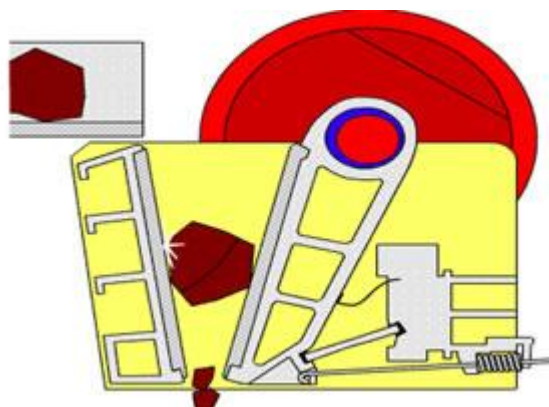


Figura 07 – Esquema de um britador de mandíbulas (<http://www.hjcrusher.com.pt/2-jaw-crusher-1.html>)

Tabela 3: Características do Britador de Mandíbulas (Referência: Figueira et al., 2004)

Características Consideráveis	Britador de Mandíbulas
Capacidade	Bom para capacidades baixas e médias (1000t/h)
Granulometria do Produto	Recomendado quando é indesejável grande quantidade de finos no produto. O <i>top size</i> do produto é alto para materiais lamelares.
Características Mecânicas da Rocha	Sem restrição
Grau de Redução. Valores Usuais Médios	Em torno de 5:1
Modo de Alimentação	Exige alimentador
Estratificação da Rocha	Pouco adequado para materiais com tendência a produzir partículas lamelares.

2.2.3.2. Britador de Rolos

Os britadores de rolos podem se enquadrar dentro da britagem primária ou secundária e variam de acordo com o revestimento dos rolos. Seu princípio é baseado em um par de rolos lisos (ou um rolo dentado) que ao se movimentar em sentidos opostos permite a compressão e cisalhamento das partículas gerando como produto partículas fragmentadas. Geralmente é utilizado em mineradoras para cominuir rochas de média ou baixa dureza. Uma limitação deste equipamento é a pequena quantidade de produto gerado em relação ao seu custo de manutenção. A Figura 08 mostra um par de rolos lisos.

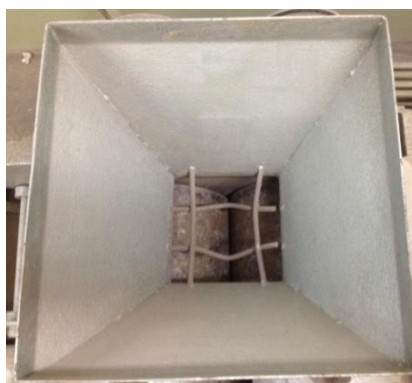


Figura 08 – Par de rolos lisos do britador de rolos DENVER 10"x11" do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) – UFRJ

Seu funcionamento consiste em alimentar o britador com o material que irá passar por dois rolos de giro sobre um eixo, fragmentando-o por compressão. A distância entre os rolos é um dos parâmetros possíveis de se ajustar e permitirá o controle do tamanho máximo das partículas de alimentação a serem cominuídas e, conseqüentemente, do produto, visto que a redução geralmente é de 4:1 (<http://www.hjcrusher.com.pt/2-roll-crusher-6.html>). Molas permitem o alívio do equipamento quando partículas muito tenazes ou com granulometria inadequada

caem na alimentação, permitindo que os rolos se afastem, não danificando o equipamento. A Figura 09 mostra o funcionamento esquemático do britador de rolos.

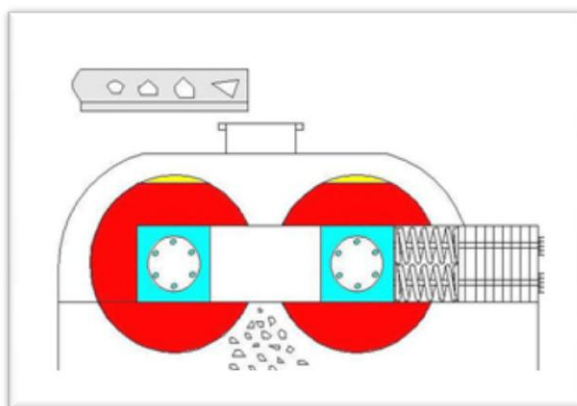


Figura 09 – Esquema de um britador de rolos lisos. (Fonte:

<http://www.hjcrusher.com.pt/2-roll-crusher-6.html>)

Este britador é capaz de gerar um produto final com distribuição de tamanho fino. Uma característica relevante do produto gerado é o formato das partículas, que possuem característica lamelar.

2.2.4. Concentração de Minério de Ferro

Existem diversas técnicas que permitem, de acordo com as características do minério, separar o minério de interesse da ganga. A técnica de concentração magnética de alta intensidade foi utilizada no presente trabalho. Esta etapa fornece indicadores para as condições de operação industrial de acordo com a resposta obtida no processo de concentração.

A concentração de um minério consiste em separar o mineral de interesse da ganga. Os minerais possuem diferentes propriedades e, conseqüentemente, diversas são as técnicas existentes. Por exemplo, ao aplicar um campo magnético externo os minerais fornecem diferentes respostas. Diversas são as formas de concentrar um minério, porém no caso dos minérios hematíticos, a baixa susceptibilidade magnética

torna necessária a aplicação de métodos de concentração de alta intensidade (Oliveira, 2006).

A concentração magnética consiste basicamente em aplicar um campo magnético que irá atrair as partículas com esse caráter. A alimentação do sistema é feita pela parte superior de um cadinho, que possui um campo magnético externo aplicado, onde as partículas com caráter magnético ficarão retidas na matriz e as demais partículas irão passar junto com o fluxo de água. Após a retirada do campo magnético aplicado, as partículas que estavam atraídas são liberadas da influência do campo e conseqüentemente resgatadas. Para partículas com granulometria fina, utiliza-se a concentração a úmido devido à sua eficiência.

Materiais paramagnéticos variam sua magnetização de acordo com o campo aplicado e são atraídos, desta forma separando-se dos materiais diamagnéticos (no presente trabalho, a ganga) que são repelidos. A resposta de um material ao campo magnético aplicado depende de uma propriedade denominada, susceptibilidade magnética. Materiais paramagnéticos possuem baixa susceptibilidade magnética, mas positiva, e materiais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa (Sampaio & Luz, 2004).

A recuperação dos produtos após a concentração depende de algumas variáveis do processo, tais como intensidade do campo magnético aplicado e a taxa de alimentação. A intensidade do campo magnético aplicado pode ser controlado variando a corrente e deverá estar de acordo com a susceptibilidade do mineral de interesse (Lage, 2010). Baixos campos magnéticos são aplicados para materiais com alta susceptibilidade magnética, enquanto altos campos magnéticos devem ser aplicados para materiais paramagnéticos. Outra variável de importante controle é a taxa de alimentação, ou seja, a velocidade e o fluxo com que as partículas vão passar pelo campo magnético aplicado. É desejável um baixo fluxo, pois as partículas

magnéticas situadas no interior do fluxo podem ser arrastadas junto com as partículas não magnéticas (engaiolamento), não sendo atraídas pelo campo e consequentemente reduzindo a eficiência do processo (Sampaio & Luz, 2004). A magnetita presente nos minérios de ferro possui um caráter ferromagnético e, consequentemente, elevado nível de magnetização e, por isso, é necessária sua retirada com um ímã permanente antes de concentrar a hematita (paramagnético). A Tabela 04 mostra os valores de referência para aplicação do campo magnético externo.

Tabela 04: Relação dos principais minerais com propriedades magnéticas (Fonte catalogada: Catálogo Eriez Magnetics) (Referência: Luz & Sampaio, 2004)

Grupo 1 - Ferromagnéticos - Faixa de Campo de 0,05 a 0,5 T		
Ferro	Magnetita	
Grupo 2 - Magnéticos - Faixa de Campo de 0,5 a 1 T		
Ilmenita	Pirrotita	Franklenita
Grupo 3 -Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo de 1 a 1,8 T		
Hematita	Mica	Calcopirita
Siderita	Molibdenita	Molibdenita
Rodonita	Cerargirita	Talco
Limonita	Huebnerita	Titanita
Braunita	Wolframita	Calcocita
Corindon	Bornita	Cinábrio
Pirolusita	Apatita	Gesso
Manganita	Tetrahedrita	Zincita
Calamina	Willemita	Ortoclássio
Esfarelita	Cerussita	Epidoto
Siderita	Dolomita	Fluorita
Rodocrosita	Psilomelana	Augita
Granada	Arsenopirita	Hornblenda
Serpentinita		
Grupo 4 - Muito Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo acima de 1,8 T		
Pirita	Serpentinita	Cobalita
Smithsonita	Nicolita	Safira
Esfalerita	Diopsidio	Cassiterita
Estibinita	Turmalina	Ortoclássio
Criolita	Cuprita	Dolomita
Enargita	Galena	Spinélio
Berílio	Whiterita	Rubi
Magnesita	Crisocola	Covelita
Azurita	Rutilo	Feldspato
Gesso	Mica	Zircão
Malaquita		
Grupo 5 - Não Magnéticos e Diamagnéticos		
Barita	Corindon	Apatita
Bismuto	Topázio	Aragonita
Calcita	Galena	Grafita
Fluorita	Antimônio	

2.2.5. Difração de Raios-X (DRX)

A identificação e quantificação dos minerais podem ser feitas utilizando diversas técnicas. Um dos métodos mais utilizados devido a sua versatilidade é a difração de raios-x.

A difração de raios-x baseia-se na Lei de Bragg: $\lambda = 2d \sin\theta$, onde λ é o comprimento de onda da fonte de raios X utilizado, d são distâncias interplanares (hkl) e θ é o ângulo de reflexão (Neumann et al., 2004). A Figura 10 ilustra a Lei de Bragg, onde um conjunto de ondas eletromagnéticas incide com um ângulo θ em um conjunto de planos (hkl) espaçados de d unidades (Alves et al., 2005). O feixe de onda refletido sofrerá um atraso de acordo com a diferença de caminho percorrida relacionada com as distâncias interplanares d , sendo esta específica para cada mineral. O difratograma resultante da análise, mostrado na Figura 11, é baseado no número de fótons difratados na unidade de tempo contado pelo detector em determinada posição (Alves et al., 2005). Para que a difração aconteça em diferentes distâncias interplanares, os raios X possuem seus ângulos de incidência variados, permitindo analisar os diversos planos do retículo cristalino. A Figura 12 mostra uma representação esquemática de um difratômetro de raios-x básico para método do pó.

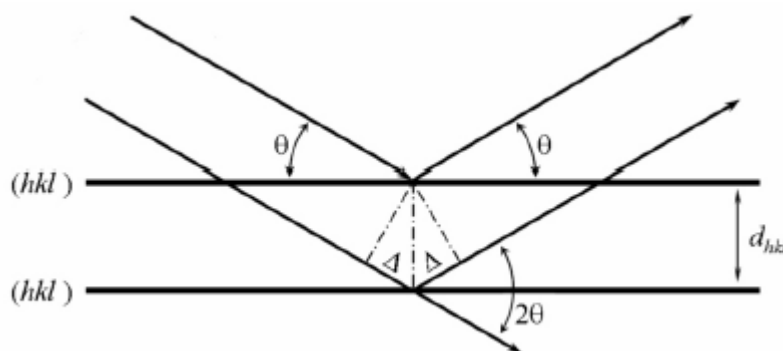


Figura 10 – Ilustração da Lei de Bragg. (Referência: Alves et al.,2005)

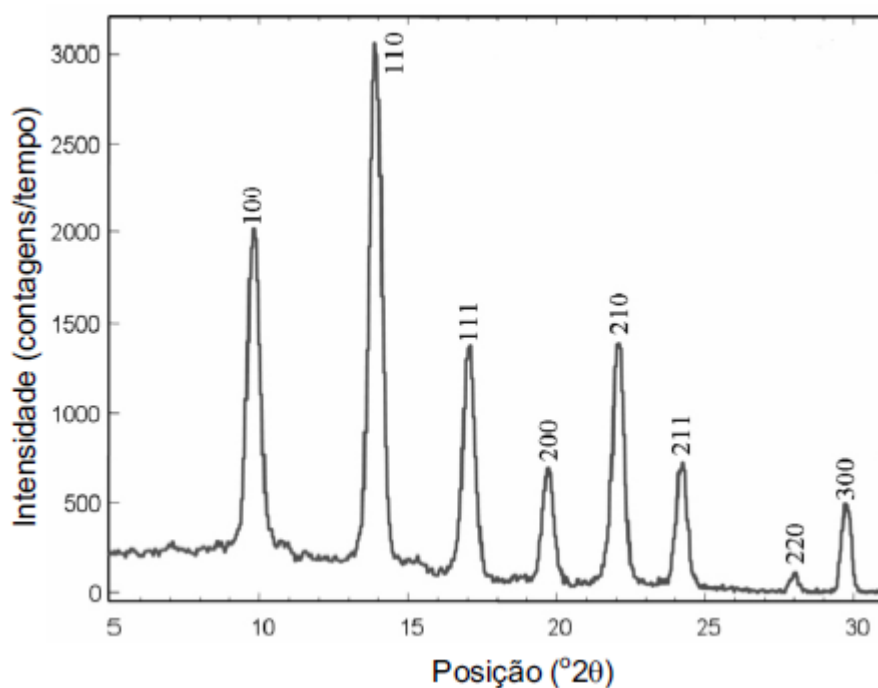


Figura 11 – Ilustração de um difratograma de raios X com picos de difração referentes a diferentes planos (hkl). (Referência: Alves et al., 2005)

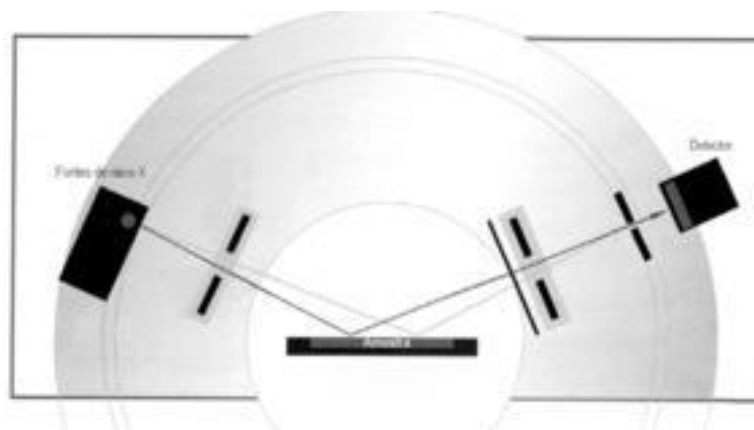


Figura 12 – Representação esquemática de um difratômetro de raios X básico para método do pó (cortesia de Bruker AXS, Inc.) (Referência: Neumann et al., 2004)

Geralmente as interpretações dos difratogramas são feitas pelas ferramentas de busca dos *softwares* (Neumann et al., 2004). O método de Rietveld é uma técnica robusta para análise quantitativa de fases minerais, através da difração de raios X

(König et al., 2002), e consiste basicamente em ajustar o espectro experimental com o espectro teórico de um mineral. Após a preparação das amostras, todas as medidas e cálculos podem ser feitos automaticamente (König et al., 2002).

2.2.6. Picnometria

A massa específica é uma importante propriedade física que permite a caracterização dos materiais, sendo muito utilizada no controle de qualidade de produtos industriais.

A picnometria é uma técnica largamente utilizada na determinação da massa específica dos sólidos e consiste basicamente nas medidas de deslocamento de fluidos. Seu princípio consiste em determinar a razão entre a massa e o volume envolvido pelo fluido que circunda o sólido.

2.2.7. Microscopia

A microscopia óptica (MO) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) são ferramentas largamente empregadas para caracterização de minérios, concentrados e rejeitos na indústria mineral.

2.2.7.1. Microscopia Ótica

A Microscopia Óptica é amplamente utilizada na identificação de minerais. A grosso modo, existem dois modos de funcionamento do Microscópio Óptico: Modo reflexão, no qual a luz incidente reflete na superfície analisada e o Modo transmissão, no qual a luz atravessa o material, o qual deve ser extremamente fino. A magnificação pode chegar a 2000 vezes com resolução da ordem de 0,5 μm .

2.2.7.1.1. Campo claro e Campo escuro

No microscópio, a luz atravessa a lente atingindo a superfície do material, refletindo e retornando para a lente. Todos os raios deveriam atingir na superfície e retornar para a lente, mas os raios que incidem na região de relevo (irregularidades) terão sua trajetória desviada da lente, saindo oblíquos, e não serão capturados. Os pontos da amostra que refletem a luz para fora da lente ficam escuros, pois não há luz capturada para formar a imagem. As irregularidades podem ser associadas a diferentes refletâncias.



Figura 13 – Notas de aula da disciplina Microscopia Quantitativa (Fonte: www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant, 2009)

No campo escuro, a maior parte da luz que é refletida não é capturada pela lente e somente alguns pontos irão refletir a luz para dentro da lente. A imagem global é escura com pontos brilhantes.

Os campos claro e escuro não possuem imagens totalmente o postas, pois estas dependem do relevo da amostra e do ângulo de entrada da luz. No campo claro, a intensidade da luz irá saturar alguns pontos e pequenos detalhes de contraste não são observados. No campo escuro, esses pequenos detalhes ficarão brilhantes.

2.2.7.1.2. Polarização

Diversas propriedades físicas dos materiais dependem da organização em escala atômica. As propriedades ópticas são fortemente dependentes da estrutura cristalina. O material isotrópico irá responder à luz de maneira relativamente uniforme em qualquer direção, possuindo um único índice de refração independente da direção que a luz está incidindo, propagando ou refletindo na superfície do material. As propriedades são, portanto, equivalentes em todas as direções.

O material anisotrópico não possui estrutura simétrica. Suas propriedades vão variar de acordo com a direção. A interação da luz com o material irá depender da direção de incidência em relação ao eixo principal da estrutura. A luz ao entrar alinhada com o eixo óptico do material, encontra apenas um índice de refração, propagando sem dificuldade pelo material. Entretanto, quando a luz interage em uma direção que não é a do eixo óptico, encontra dois índices de refração diferentes, com velocidades e direções diferentes.

A interferência só ocorre para ondas que possuem a mesma polarização, ou seja, devem oscilar no mesmo plano. A onda despolarizada ao incidir em um cristal anisotrópico birrefringente, ou seja, com dois índices de refração, será dividida em duas ondas com trajetórias diferentes, cada um oscilando em um plano (um ortogonal ao outro). O atraso entre as ondas que saem do material depende da espessura do material, do ângulo e do índice de refração do material (birrefringência).

A polarização é determinada pelo plano de oscilação do campo elétrico. O polarizador é um objeto capaz de selecionar um plano de oscilação. O polarizador permite determinar o plano de polarização da luz incidente, deixando passar apenas a luz alinhada com a orientação do polarizador e bloqueando o plano ortogonal.

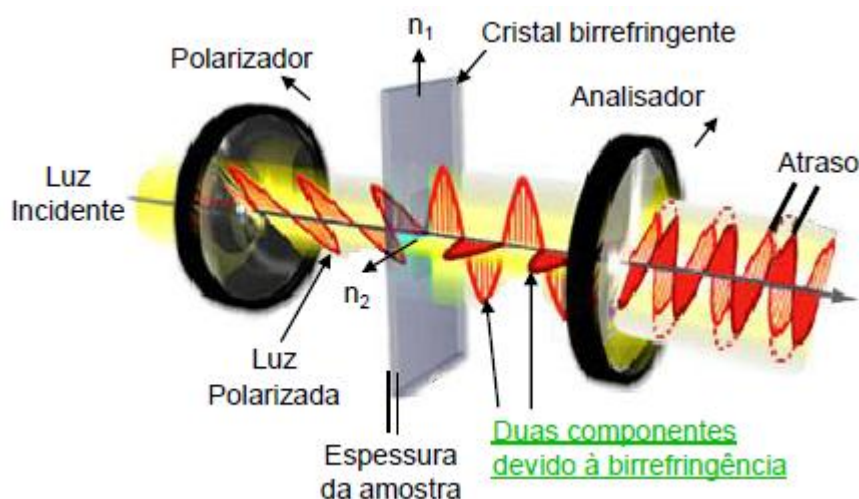


Figura 14 - Polarização linear. (Fonte: www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant, 2009)

A hematita é um mineral fortemente anisotrópico. Ela apresenta bi-refletância (Criddle & Stanley, 1993), isto é, sua refletância sob luz polarizada e, conseqüentemente seu brilho nas imagens, varia segundo a orientação dos cristais. Essa variação é sutil, mas perceptível para um observador treinado, ao microscópio ótico de luz refletida.

Por outro lado, o uso combinado de polarizador e analisador semi-cruzados proporciona notáveis variações de brilho e cor devido à anisotropia (Gribble & Hall, 1992). Assim, essa configuração pode ser explorada para gerar imagens com contraste suficiente para discriminar os cristais de hematita (Iglesias et al., 2011). As imagens são geradas com um polarizador e analisador semi-cruzados em ângulos simétricos em torno de um ponto de extinção.

2.2.7.1.3. Polarização Circular

A luz circularmente polarizada consiste em uma onda de luz cujo vetor campo elétrico descreve uma trajetória helicoidal (Figura 15), daí a denominação polarização circular (Higgins, 2010). Na literatura, são encontrados alguns trabalhos nas áreas

biológica, de materiais e mineral (Oldenbourg & Mei, 1995; Glazer et al., 1996; Higgins, 2010), envolvendo microscopia ótica com polarização circular em luz transmitida.

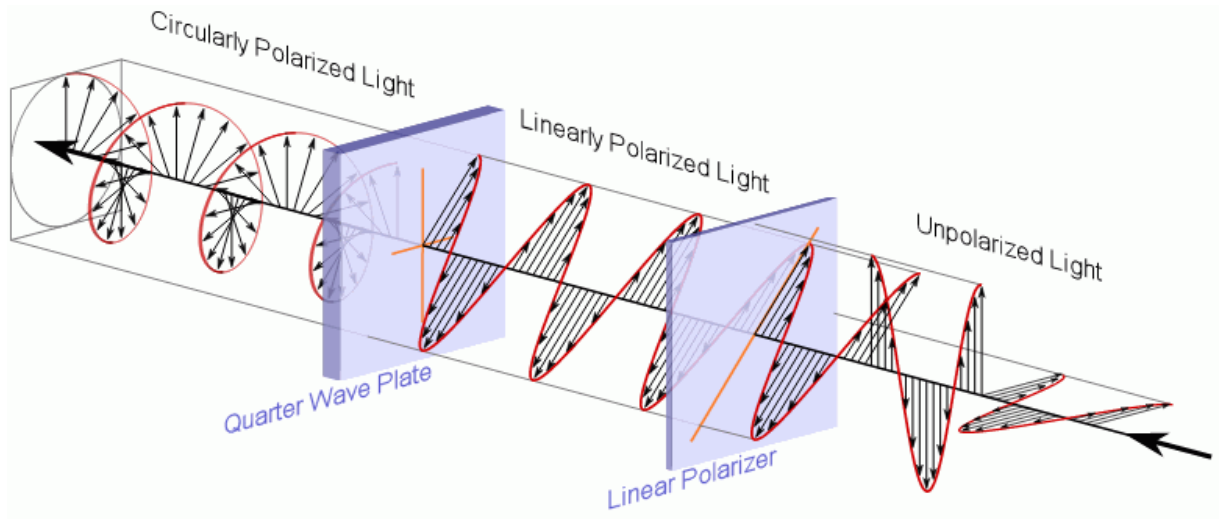


Figura 15 - Polarização circular. (Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Circular_polarizer).

O sistema ótico de polarização circular do microscópio do CETEM foi montado para luz refletida, segundo a configuração descrita por Danz & Gretscher (2004). O polarizador, o analisador e duas placas de um quarto de onda foram postos em um refletor. Ambos os lados do refletor, entrada e saída de luz, são constituídos por uma combinação de polarizador e placa de um quarto de onda, fixados transversalmente.

Deste modo, a luz não-polarizada passa pelo polarizador, tornando-se linearmente polarizada. Então, a luz linearmente polarizada incide na primeira placa de um quarto de onda, orientada com um ângulo de 45° em relação ao plano de polarização da luz incidente. Essa placa divide a luz em duas componentes com uma diferença de fase de 90° . A combinação dessas duas ondas linearmente polarizadas, de mesma amplitude e defasadas de 90° , resulta em uma onda circularmente polarizada, como mostrado na Figura 15.

A luz circularmente polarizada incide na amostra e é refletida. Em seguida, a luz refletida passa pela segunda placa de um quarto de onda, que é orientada ortogonalmente à primeira. A segunda placa converte a luz circularmente polarizada em linearmente polarizada, com uma orientação diferente daquela do polarizador. Em seguida, essa luz passa pelo analisador e segue para a câmera.

Na imagem resultante da polarização circular, não há ponto de extinção, pois todas as orientações de polarização estão presentes. Assim, há maior contraste. Além disso, as cores não variam com a rotação da amostra.

A Figura 16 mostra três imagens do mesmo campo de uma amostra de minério de ferro.

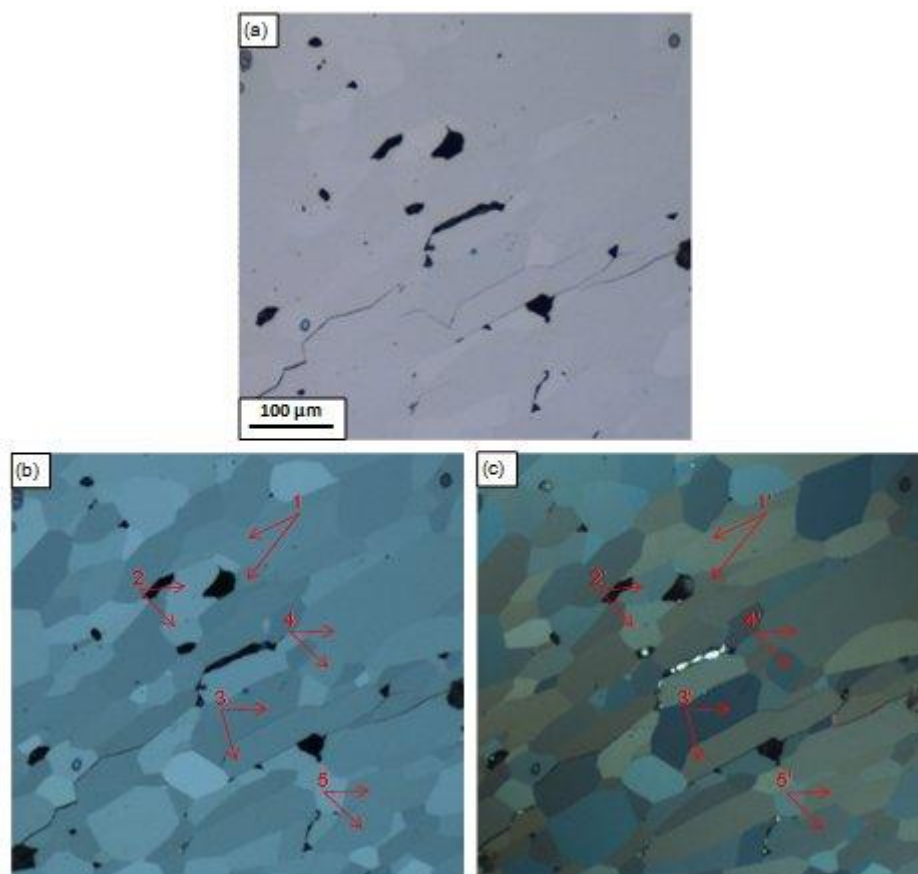


Figura 16 - Região de hematita observada em (a) de campo claro, (b) polarização linear (LPOL), (c) de polarização circular (CPOL). (Fonte: Iglesias, 2012)

As setas apontam aos cristais para os quais CPOL fornece um contraste muito forte, sendo evidente sua vantagem sobre LPOL. Cristais com brilho semelhante na imagem LPOL são claramente discriminados sob CPOL.

2.2.7.1.4. Auto Foco

O ponto de foco ótimo está relacionado à maximização do contraste e à melhor definição das bandas do histograma da imagem. O auto foco permite eliminar a influência do operador na determinação do foco, além de possibilitar a varredura da amostra no plano x-y de uma amostra compensando variações de altura (Paciornik, 2010).

A partir da medição do contraste, é possível determinar o ponto de foco ótimo. Sendo assim, o autofoco se baseia na medida de “nitidez”, isto é, do contraste e da intensidade de bordas, de uma imagem. (Augusto, 2012) O princípio consiste em medir a “nitidez” da imagem em um determinado ponto, movendo para um outro ponto consequente e medindo novamente a “nitidez”. O foco é otimizado variando a posição da amostra no eixo z. Assim, diversos pontos podem ter a “nitidez” medida e ajustada comparando com a “nitidez” dos pontos anteriores. Este procedimento se torna possível graças à integração do hardware do microscópio, que permite a motorização da platina no eixo z, com o software do computador, tornando o processo automatizado (Iglesias, 2008).

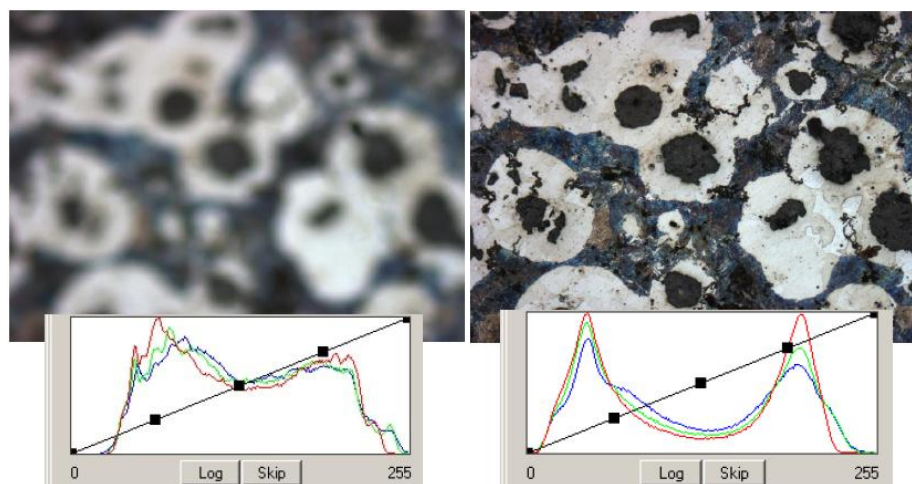


Figura 17 – Imagens antes (a) e após (b) o procedimento de Autofoco. (Fonte: www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant, 2009)

2.2.7.1.5. Aquisição Automática de Imagens

A aquisição automática de imagens permite diminuir significativamente o tempo de captura dos campos das amostras além de não gerar erros devido à operação manual. Uma grande região da amostra pode ser varrida, com campos adjacentes e parcialmente sobrepostos permitindo a montagem de mosaicos.

A Figura 18 mostra a dinâmica de uma rotina de aquisição automática de imagens denominada LMD Captura. Esta rotina foi desenvolvida no Laboratório de Processamento Digital de Imagens (LPDI) da PUC-Rio e seu funcionamento consiste na captura de imagens distribuídas uniformemente em uma região delimitada pelo operador. Inicialmente, duas posições x-y opostas são fornecidas como dado de entrada. Assim, a rotina calcula a área de interesse e a quantidade máxima de imagens igualmente espaçadas dentro desta área. A platina desloca-se no plano x-y à medida que as imagens vão sendo adquiridas em posições previamente calculadas, conforme o caminho percorrido mostrado na Figura 18-d. Além disso, a cada posição

x-y de um campo, é realizado o procedimento de autofoco, tornando o processo prático e facilmente reproduzível (Augusto, 2012).

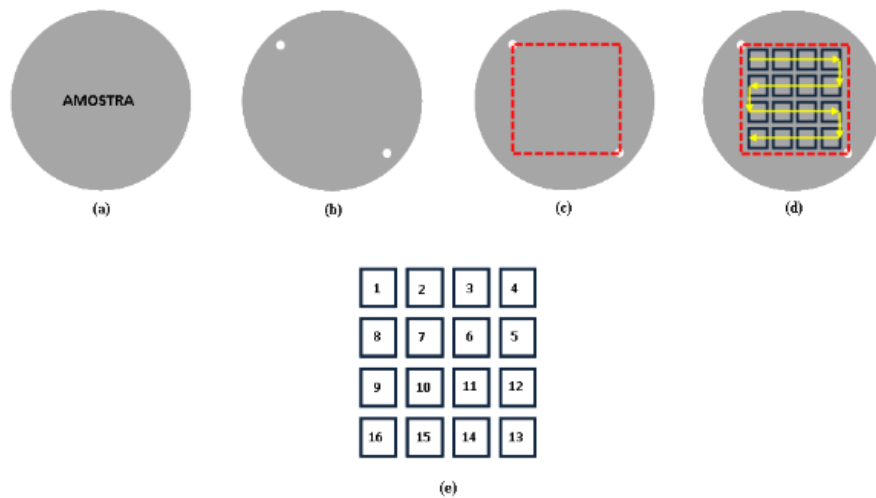


Figura 18 – LMD Captura: (a) Amostra; (b) Dados de entrada da rotina de aquisição automática: 2 coordenadas x-y ; (c) Área delimitada e calculada pela rotina; (d) Aquisição de imagens igualmente espaçadas entre si dentro da região delimitada; (e) Número máximo de imagens adquiridas na região de interesse, numeradas na figura conforme a ordem de aquisição. (Fonte: Augusto, 2012)

2.2.8. Reconhecimento de Padrões e Classificação

A caracterização microestrutural dos minérios de ferro e seus aglomerados é realizada na indústria, tradicionalmente, por exame visual. Técnicos treinados avaliam as amostras em um microscópio de luz refletida para identificar minerais e fases texturais, e estimar suas frações. Este procedimento é subjetivo e, consequentemente, suscetível a erros aleatórios e sistemáticos (Fontes & Gomes, 2012). Nos últimos anos, algumas metodologias para a caracterização automática de minério de ferro por meio de análise digital de imagens, conferindo maior rapidez, reprodutibilidade e confiabilidade, foram desenvolvidas, tais como Pirard e Lebichot (2004), Donskoi et al. (2007), Gomes e Paciornik (2008a, b), Iglesias et al. (2011) e Gomes et al. (2012b).

A hematita é um mineral fortemente anisotrópico. O uso combinado de um polarizador e de um analisador no microscópio de luz refletida aumenta o brilho e cor variações devido a anisotropia (Gribble e Hall, 1992). Esta última configuração pode fornecer imagens que apresentam contraste suficiente para diferenciar os grãos e consequentemente revelam os tipos de hematita (Iglesias et al., 2011).

A metodologia para classificação automática de tipos de hematita texturais desenvolvida por Fontes & Gomes, 2012, utiliza parâmetros de textura como recursos para a classificação *textels* hematita em uma das cinco classes pré-definidas (granular, lamelar, lobular, martita e microcristalina).

Embora não exista uma definição formal de textura, intuitivamente, denota propriedades intrínsecas de regiões como a suavidade, rugosidade e regularidade (Gonzalez e Woods, 2002). A visão humana é capaz de reconhecer e distinguir facilmente textura. No entanto, é muito mais difícil de caracterizar a textura com alguns parâmetros definidas matematicamente em um sistema de visão computacional (Jähne, 2002).

Computacionalmente, caracteriza-se textura através de parâmetros definidos a partir da variação dos níveis de intensidade no interior de regiões ou *textels*. *Textel* (elemento de textura) é a unidade fundamental de uma textura, assim como do pixel é a unidade básica de uma imagem. Vale ressaltar que o termo textura pode é utilizado com significados diferentes em diferentes contextos. Em Ciência dos Materiais, textura está geralmente relacionada com a distribuição de orientações cristalográficas dos cristalitos em materiais policristalinos (Gomes et al., 2012a).

A caracterização da textura de acordo com a metodologia de Fontes & Gomes (2012) foi baseada nos parâmetros de Haralick (Haralick et al., 1973). Assim, uma técnica clássica para a caracterização da textura em imagens de sensoriamento

remoto foi utilizada para identificar diferentes classes de textura microestrutural da hematita.

Os parâmetros de Haralick são medidas estatísticas da co-ocorrência de pixels vizinhos. Diferentemente das medidas estatísticas de ocorrência, as medidas de co-ocorrência empregam a probabilidade de ocorrência de pares de valores em pixels vizinhos em diferentes orientações. Geralmente, os primeiros vizinhos em uma vizinhança tipo 8 são considerados, mas distâncias maiores também podem ser usadas. Também é comum a empregar a média e a variância dos parâmetros Haralick calculado em todas as orientações, se as características direcionais não forem importantes.

Reconhecimento de padrões pode ser usado para classificar objetos (pixels, fases, textels, etc) em imagens. No entanto, suas aplicações podem ser tão variadas quanto os objetos em questão. Análise digital de imagens é, neste caso, uma ferramenta para extrair características, isto é, para medir características dos objetos.

Classificação supervisionada é uma técnica de reconhecimento de padrões que atribui uma classe a um objeto desconhecido através de uma medida de semelhança entre este objeto e um conjunto de objetos conhecidos previamente identificados (conjunto de treinamento). Um procedimento de classificação supervisionada compreende três fases: treinamento, validação e classificação. Na fase de treinamento, um conjunto conhecido de objetos, o conjunto de treinamento, é usado para construir uma base de conhecimento. Atributos selecionados são medidos para cada objeto, estabelecendo um espaço de características, onde cada objeto é representado por um vetor, chamado padrão. Um método de decisão, o classificador, atribui a cada objeto de uma das classes previamente definidas (Fontes & Gomes, 2012).

A etapa de validação ou teste calcula o desempenho do sistema de classificação, considerando também a sua capacidade de generalização. Vários métodos de validação são descritos na literatura (Toussaint, 1974).

A escolha de características adequadas para a classificação deve ser feita com base na observação de objetos conhecidos e suas classes. O desafio é escolher características que podem agrupar objetos da mesma classe, aceitando a sua variabilidade intrínseca e, ao mesmo tempo, proporcionar uma discriminação máxima entre as classes. Na prática, um único atributo é raramente suficiente para distinguir entre três ou mais classes e o espaço de características é multidimensional.

O processo de classificação foi supervisionado e do método de decisão foi um classificador de Bayes (Duda et al., 2001). Na construção do sistema, centenas de textels foram extraídos de algumas imagens de cada classe de hematita para compor o conjunto de treinamento. A validação foi realizada através de métodos de autovalidação e validação cruzada. A dimensionalidade do espaço de características foi reduzida para quatro, através da técnica clássica de Análise Discriminante Linear (Fisher, 1936), usando no ambiente Matlab a *toolbox* para a Redução de Dimensionalidade fornecida por van der Maaten (2012).

3. Procedimento Experimental

No presente trabalho são realizadas as principais etapas necessárias para caracterização da especularita. Assim, por meio de uma rota de processo escolhida, obtém-se a indicação qualitativa do caráter especularítico na amostra de minério de ferro de Borda da Mata.

Dessa forma, torna-se possível avaliar a eficiência da rota de processo estabelecida para a caracterização microestrutural, além de indicar, para posterior estudo, uma faixa de liberação da hematita.

A Figura 19 mostra a sequência de etapas adotadas:



Figura 19 – Sequência da etapas adotadas na Caracterização.

3.1. Cominuição

A primeira etapa do desenvolvimento deste projeto constituiu na britagem primária de um bloco de rocha pesando 11,1kg de minério Borda da Mata, fornecido pela mineradora Atlantica Mining (Figura 20). Tal processo permite adequar a granulometria do material para as etapas seguintes.

Na britagem primária foi utilizado o Britador de Mandíbulas. Sua especificação é dada em função do mecanismo de acionamento da mandíbula, da sua capacidade e tamanho máximo da alimentação. O britador de mandíbulas utilizado foi um DENVER 5"x6" que possui uma alavanca realizando um movimento pendular (Figura 21 e 22).

A britagem secundária é definida pelo tamanho máximo da alimentação, sendo esta da ordem de 100mm. O britador de rolos objetivou a redução de tamanho do material, permitindo que o seu produto siga para a etapa de britagem terciária ou moagem, além de já permitir fazer algumas considerações relativas à distribuição granulométrica. O britador de rolos utilizado foi um DENVER 10"x6" (Figura 23) e a alimentação é definida pela distância de separação entre os rolos. O britador de rolos foi escolhido para a etapa de britagem secundária devido à característica lamelar do produto gerado. A especularita possui o formato lamelar e, por isso, não desejava-se que as lamelas fossem quebradas. Optou-se por não moer a amostra após a britagem secundária, para que a caracterização microestrutural fosse mais adequada, não sendo mascarada por partículas lamelares fragmentadas indevidamente.

As etapas de britagem permitem a preparação da amostra de acordo com o objetivo do projeto.

No primeiro momento, todo material passou pela britagem primária necessária a adequação da granulometria para alimentar o britador de rolos.



Figura 20 – Rocha de Minério de Ferro Borda da Mata fornecida pela mineradora Atlantica Mining



Figura 21 – Britador de Mandíbulas DENVER 5"x6" utilizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM)- UFRJ



Figura 22 – Amostra de Minério de Ferro após a britagem primária.

Com a granulometria adequada à alimentação do britador de rolos, a britagem secundária foi realizada. Todo o produto da britagem primária alimentou o britador de rolos, gerando um produto com granulometria mais fina, adequada a etapa de concentração e análise microestrutural.



Figura 23 – Britador de Rolos DENVER 10"x11" utilizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFRJ

3.2. Classificação granulométrica

Diversas são as séries de peneiras que podem ser utilizadas no peneiramento. A escolha das aberturas das peneiras utilizadas no presente trabalho seguiu o padrão utilizado pela mineradora Atlantica Mining para classificação granulométrica de hematita (Figura 24). O peneiramento a seco foi feito no Ro-Tap e permitiu classificar uma alíquota representativa da amostra quarteada em suas diversas classes de tamanho (Figura 25).

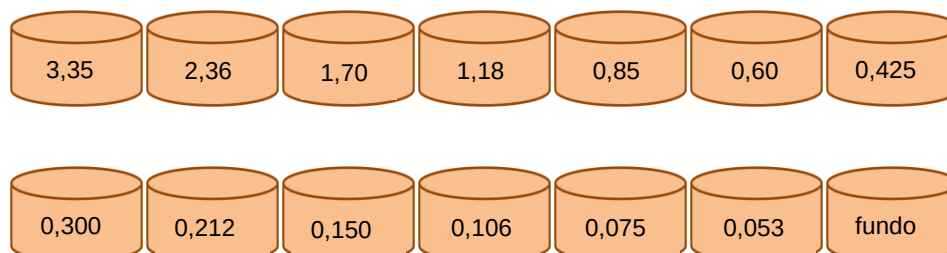


Figura 24 – Abertura de peneiras utilizadas de acordo com a abertura em mm.



Figura 25 – Amostra quarteada após a britagem secundária.

3.3. Concentração do Minério de Ferro

Primeiramente foi realizada a separação magnética de baixa intensidade, usando um imã de mão, gerando um produto com forte caráter magnético e outro com fraco caráter magnético.

O produto com fraco caráter magnético (contendo a hematita) foi concentrado utilizando a técnica de concentração magnética de alta intensidade a úmido. O separador magnético é dotado de uma matriz com esferas de aço medindo 1/4, 1/2 e 7/8 de polegada. A tensão usada no separador magnético foi de 118V, obtendo-se após a concentração, o produto magnético e o não magnético da concentração de alta intensidade. A concentração foi realizada para as frações retidas em 0,450 mm, 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm e 0,075mm.

3.4. Difração de raios-x (DRX)

As alíquotas para análise quantitativa por DRX foram moídas em gral de ágata, montada no suporte do tipo backload (para redução de orientação preferencial) e analisada no difratômetro de raios X. As análises por DRX, pelo método do pó, foram executadas em um equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor, nas seguintes condições

de operação: radiação Co K α (40kV/40mA), com passo de 0,02° 2 Θ , tempo de contagem de 184 segundos por passo com detector linear sensível à posição do tipo *silicon drift* LynxEye, coletados de 5 a 105° 2 Θ . A interpretação qualitativa de espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados relacional PDF04+ (ICDD, 2012) em software Bruker-AXS Diffrac^{Plus}. O tempo total de aquisição de cada espectro, para esta etapa do trabalho, foi de aproximadamente 90 minutos.

Análises quantitativas, a partir dos dados de raios X, foram calculadas pelo método de refinamento de espectro multifásico total (método de Rietveld), com software Bruker-AXS Topas, v. 4.2. As informações de estruturas cristalinas das fases refinadas são oriundas do banco de estruturas cristalinas da Bruker-AXS.

3.5. Picnometria

A medida de massa específica dos sólidos foi feita pela técnica de picnometria, que é uma forma rápida e simples de estimar semi-quantitativamente a concentração do mineral de interesse. A fórmula utilizada nos cálculos é

$$\rho_s = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \rho_f$$

na qual:

ρ_s = Densidade do sólido

M_1 = Peso do picnômetro seco

M_2 = Peso do picnômetro + amostra

M_3 = Peso do picnômetro + amostra + fluido

M_4 = Peso do picnômetro + fluido

3.6. Aquisição de Imagens

No presente trabalho, utilizou-se o microscópio ótico de luz refletida em campo claro (BF), sob luz linearmente polarizada com polarizador e analisador semi-cruzados (LPOL) e sob luz circularmente polarizada (CPOL).

Cinco amostras dos produtos obtidos após as concentrações de baixa e alta intensidade de alíquotas representativas das frações retidas em 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm e 0,075 mm foram embutidas a frio em resina epóxi, desbastadas e polidas usando suspensão de diamante em politriz automática, de acordo com a preparação convencional de minérios em partículas.

A aquisição de Imagens foi realizada no microscópio ótico Zeiss AxioImager M2m, dotado de câmera digital e uma platina motorizada. O software utilizado na aquisição foi o Zeiss AxioVision, que controla praticamente todas as funções do microscópio, exceto a colocação e rotação dos analisadores lineares e manuseio das amostras.

O processo de aquisição de imagens utilizou as lentes objetiva de 5x, 10x e 20x de aumento, focalização automática e varredura da amostra automática. Foram adquiridas três imagens por campo: a imagem de campo claro (BF) e a imagem com polarizadores semi-cruzados em um ângulo de $+10^\circ$ do ponto de extinção (POL+10) e sob luz circularmente polarizada (CPOL). A resolução das imagens para lente de 5x, 10x e 20x é de 1,08 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 0,54 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ e 0,27 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ respectivamente.

Antes da aquisição das imagens das amostras, um padrão de refletância de carboneto de silício (SiC) foi utilizado para gerar imagens de fundo. Essa imagem de fundo foi subsequentemente usada em um procedimento automático de correção de fundo, a fim de corrigir irregularidades na iluminação e outros defeitos de aquisição, em todas as imagens adquiridas.

3.7. Análise microestrutural qualitativa

Foram adquiridas 3 imagens (BF, LPOL+10 e CPOL) de 36 campos distintos em cada amostra com as seguintes faixas de tamanho: retida em 0,300mm, 0,212mm, 0,150mm, 0,106mm, 0,075mm, totalizando $3 \times 36 \times 5 = 540$ imagens para cada aumento utilizado (5x, 10x e 20x)

A análise microestrutural foi realizada de forma qualitativa a partir da observação das amostras ao microscópio e das imagens adquiridas.

3.8. Análise microestrutural quantitativa

As imagens utilizadas na classificação foram adquiridas em campo claro e CPOL. Foi analisado um textel para cada pixel de hematita, onde o pixel é o centro do textel. Como há centenas de milhares de pixels de hematita em cada imagem, no total, foram analisados na fração retida em 0,300mm, 0,150mm e 0,075mm do concentrado da separação magnética de alta intensidade mais de 12×10^6 , 19×10^6 e 11×10^6 textels respectivamente. O resultado da fração do tipo de hematita é medido por área (pixels).

O procedimento para análise de imagem e classificação foram desenvolvidos e implementados no ambiente Matlab. Seguiu-se uma rotina simples e clássica, que compreendeu a seguinte sequência de etapas de análise de imagem:

- operação delineação da imagem de campo claro, tornando-o mais adequado para o processo de segmentação subsequente;
- segmentação de regiões de hematita através de limiarização do histograma dos níveis de cinza;

- operação lógica AND entre a imagem de luz polarizada circular e a imagem binária segmentada de hematita, de modo a delimitar as regiões de hematita dentro da imagem de luz polarizada;

- extração de características;

- classificação.

O objetivo da segmentação foi apenas para distinguir as regiões de hematita do resto da imagem. Portanto, a imagem binária segmentada foi usada como uma máscara para delimitar as regiões de hematita no interior da imagem de luz polarizada circular. Na imagem resultante, textels quadrados foram definidos e os parâmetros de descrição da textura foram extraídos a partir deles para ser utilizada como funções de classificação.

4. Resultados e Discussão

Nessa seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do presente estudo. Em primeiro lugar, serão analisados os resultados da análise de distribuição granulométrica após a britagem secundária, revelando uma análise preliminar do comportamento do minério de ferro Borda da Mata. Em seguida, serão discutidas as influências das classes de tamanhos na concentração do mineral de interesse: a hematita. Por fim, é mostrada a análise microestrutural qualitativa da especularita. Para isso, será mostrada a influência do método de aquisição de imagens na observação dos parâmetros utilizados na determinação da especularita.

4.1. Avaliação da Cominuição

Uma amostra de rocha pesando 11,1 kg, fornecida pela Atlantica Mining, proveniente da região Borda da Mata (Sergipe) teve seu tamanho inicialmente reduzido em um britador de mandíbulas. Na segunda etapa da cominuição, o produto da britagem primária alimentou o britador de rolos. O produto obtido foi quarteado utilizando o quarteador Jones, obtendo assim uma alíquota representativa de 1208g. Em seguida o produto foi peneirado a seco no Ro-Tap durante 15 minutos obtendo as frações mássicas retidas nas granulometrias dadas na Tabela 05.

Tabela 05 – Fração mássica retida e passante cumulativo em função da abertura das peneiras.

Granulometria (mm)	% retido	% passante cumulativo
3,350	9,84	90,16
2,360	10,17	79,99
1,700	10,01	69,98
1,180	9,23	60,75
0,850	7,94	52,80
0,600	6,75	46,06
0,425	5,76	40,30
0,300	6,16	34,14
0,212	5,02	29,11
0,150	5,88	23,24
0,106	5,27	17,97
0,075	4,28	13,69
0,053	4,02	9,67
Fundo	9,67	0

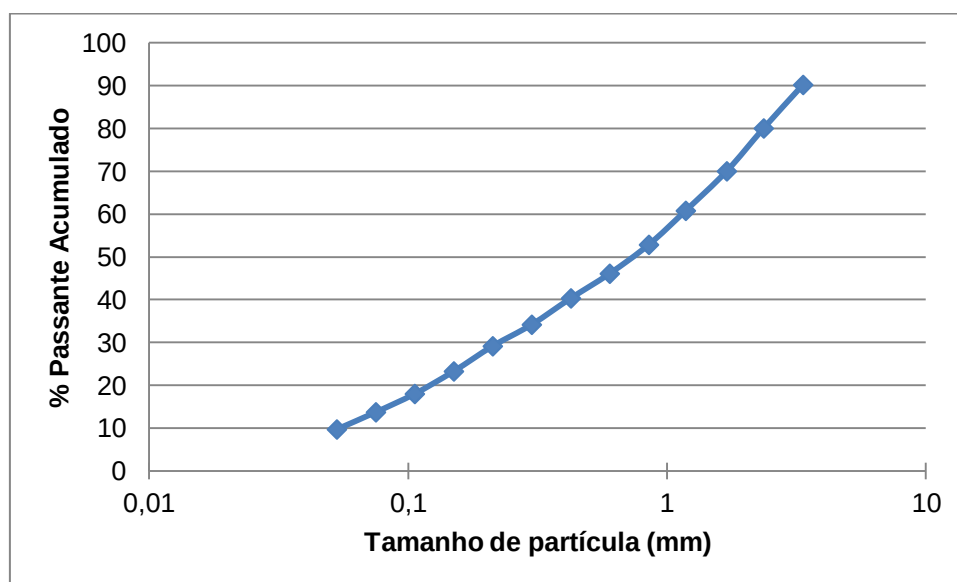


Figura 26 – Distribuição granulométrica da amostra representativa de minério de ferro Borda da Mata após a cominuição no britador de rolos.

A Figura 26 apresenta a curva obtida para o percentual de material passante acumulado em função da abertura da peneira para toda a série de peneiras utilizada. Verifica-se que mesmo em uma etapa de britagem secundária, que tem por característica não gerar muitas partículas finas em seu produto, o percentual de partículas menores que 0,150mm geradas ficou em torno de 23%. Esse comportamento se justifica pelas características intrínsecas do minério Borda da Mata, que não possui elevada resistência à fragmentação. Apenas 36,38% do material britado se encontra nas faixas de tamanho utilizadas na concentração do mineral de interesse.

4.2. Concentração

Os produtos obtidos após a concentração das amostras referentes às alíquotas de tamanho de partículas retidas nas peneiras de 0,300mm, 0,212mm, 0,150mm, 0,106mm, 0,075mm estão apresentadas na Tabela 06.

Tabela 06 – Fração mássica do produto obtido após a concentração da amostra de Minério de Ferro Borda da Mata

Granulometria (mm)	Produto concentrado da separação de baixa intensidade (%)	Produto concentrado da separação de alta intensidade (%)	Produto não magnético (%)
0,300	29,95	37,02	32,57
0,212	23,02	44,02	32,31
0,150	18,38	30,37	50,87
0,106	12,84	39,35	47,67
0,075	11,01	43,47	45,09

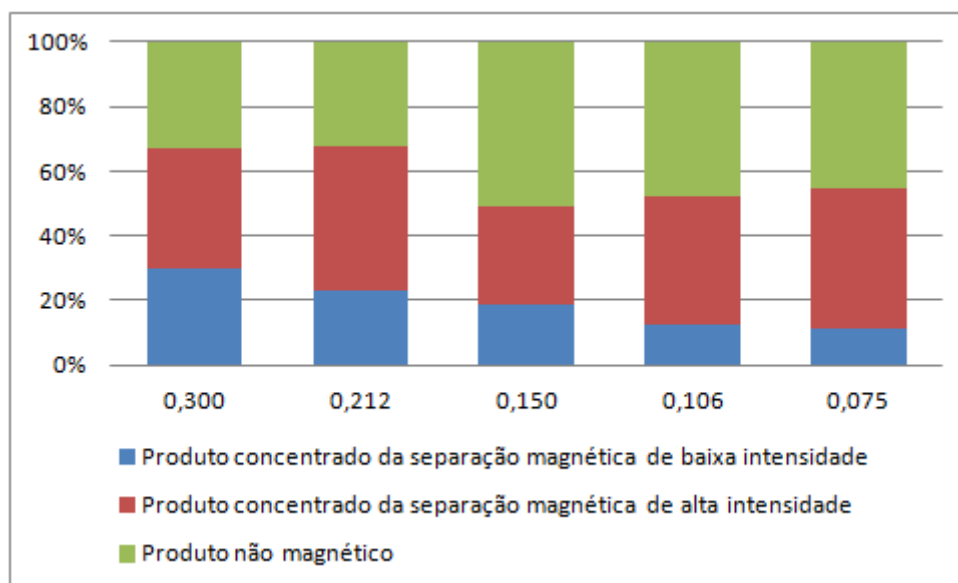


Figura 27 – Distribuição das frações em massa em função dos processos de separação magnética.

Como primeira análise, a Figura 27 mostra o percentual de material ferromagnético, predominantemente magnetita, assim como o percentual de material predominantemente paramagnético (produto concentrado da separação de alta intensidade) e produto não magnético presentes em cada faixa granulométrica analisada. Observa-se, o decréscimo do percentual do produto concentrado da separação de baixa intensidade com a diminuição da granulometria e o aumento dos concentrados da separação magnética de alta intensidade e não magnético até atingirem a granulometria mais fina.

4.2.1. Difração de Raios-X (DRX)

As Figuras 28 e 29 mostram os espectros da difração de raios-X referente à cabeça e à fração retida em 0,106 mm, respectivamente.

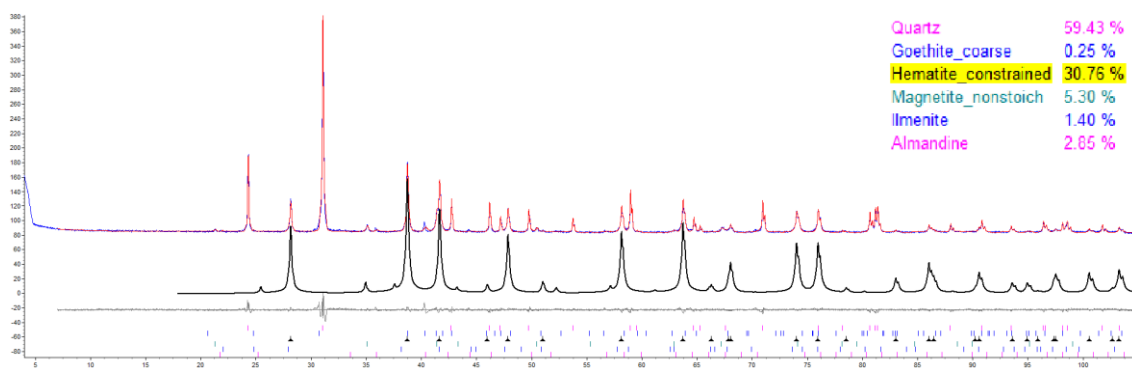


Figura 28 – Espectro da difração de raios-x referente à cabeça.

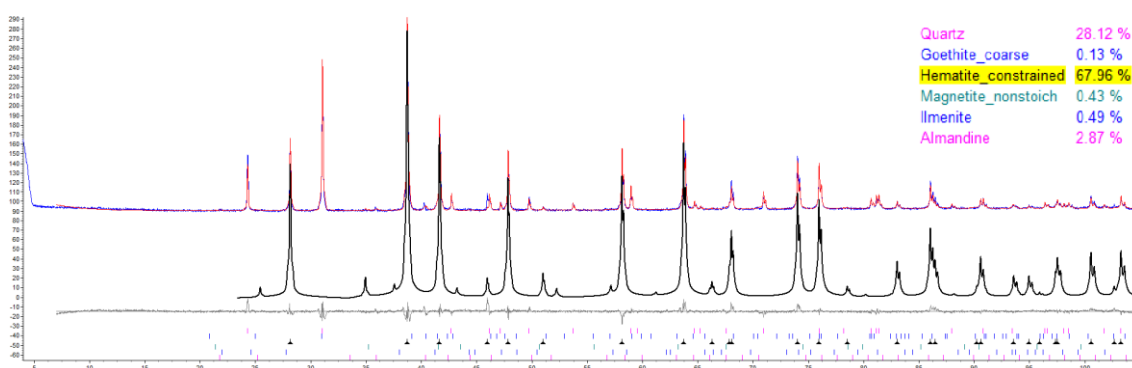


Figura 29 – Espectro da difração de raios-x referente à fração concentrada da separação magnética de alta intensidade retida em 0,106 mm

As Tabelas 07, 08 e 09 mostram a análise quantitativa, utilizando o método de Rietveld, para as fases obtidas no espectro das alíquotas referentes à cabeça e a cada produto gerado na concentração magnética das frações retidas em 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm e 0,075 mm.

Tabela 07 – Análise quantitativa das fases presentes nas alíquotas referentes ao produto concentrado da separação magnética de baixa intensidade das frações retidas em 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm e 0,075 mm

	Fração retida em 0,300 mm	Fração retida em 0,212 mm	Fração retida em 0,150 mm	Fração retida em 0,106 mm	Fração retida em 0,075 mm
Quartzo	13,5	6,9	4,9	4,1	3,5
Goethita	0,1	0,1	0,2	0,7	0,3
Hematita	34,8	34,4	40,2	41,8	48,7
Magnetita	46,3	53,9	49,5	47,4	41,3
Ilmenita	4,3	4,0	4,9	5,9	6,3
Almandina	0,9	0,7	0,4	0,1	0,0

Tabela 08 – Análise quantitativa das fases presentes nas alíquotas referentes à cabeça e do produto concentrado na separação magnética de alta intensidade das frações retidas em 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm e 0,075 mm

	Cabeça	Fração retida em 0,300 mm	Fração retida em 0,212 mm	Fração retida em 0,150 mm	Fração retida em 0,106 mm	Fração retida em 0,075 mm
Quartzo	59,4	66,8	57,7	36,2	28,1	22,7
Goethita	0,3	0,3	0,5	0,2	0,1	0,5
Hematita	30,8	28,9	38,1	58,7	68,0	73,4
Magnetita	5,3	0,2	0,2	0,6	0,4	0,3
Ilmenita	1,4	0,6	0,8	2,3	0,5	1,8
Almandina	2,9	3,2	2,6	2,1	2,9	1,4

Tabela 09 – Análise quantitativa das fases presentes nas alíquotas referentes ao produto concentrado na separação magnética de alta intensidade das frações retidas em 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm e 0,075 mm

	Fração retida em 0,300 mm	Fração retida em 0,212 mm	Fração retida em 0,150 mm	Fração retida em 0,106 mm	Fração retida em 0,075 mm
Quartzo	88,3	92,8	87,6	95,5	91,8
Goethita	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1
Hematita	10,7	6,9	11,9	4,5	8,0
Magnetita	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1
Ilmenita	0,4	0,1	0,0	0,0	0,1
Almandina	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0

De acordo com a análise quantitativa feita por DRX, algumas considerações podem ser feitas após as concentrações magnéticas de baixa e alta intensidade das alíquotas retidas nas frações de 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106mm e 0,075mm: observou-se no produto concentrado da separação de baixa intensidade a predominância de magnetita e hematita; o produto concentrado da separação magnética de alta intensidade apresentou o teor de hematita crescente conforme a granulometria foi reduzida e o produto não magnético apresentou teor de quartzo (mineral não magnético) acima de 85% em todas as alíquotas analisadas.

4.2.2. Picnometria

Os resultados calculados no ensaio de picnometria estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados das medidas de massa específica dos sólidos calculadas pela técnica de picnometria

Granulometria (mm)	Massa específica do produto concentrado de alta intensidade (g/cm ³)	Massa específica do produto não magnético (g/cm ³)
0,300	3,21	2,81
0,212	3,88	2,76
0,150	3,83	3,53
0,106	4,36	2,75
0,075	4,14	2,75

O valor de referência para a massa específica é de 5,3 g/cm³ para a hematita e 2,62 g/cm³ para o quartzo (fonte: www.sormakmine.com). Para realizar os cálculos das concentrações, considerou-se como aproximação que a amostra é composta basicamente de quartzo, magnetita e hematita. A Tabela 11 mostra os teores dos minerais magnéticos e não magnéticos de acordo com os cálculos da massa específica por picnometria.

Tabela 11 – Teores minerais magnéticos e não magnéticos estimados indiretamente por picnometria

Granulometria (mm)	Produto concentrado da separação de alta intensidade		Produto não magnético da separação de alta intensidade	
	Teor de minerais não magnéticos (%)	Teor de minerais magnéticos (%)	Teor de minerais não magnéticos (%)	Teor de minerais magnéticos (%)
0,300	65,1	34,9	88,6	11,4
0,212	36,6	63,4	92,0	8,0
0,150	38,4	61,6	50,1	49,9
0,106	21,6	78,4	92,7	7,2
0,075	28,0	72,0	92,7	7,2

Observando os teores de hematita e quartzo calculados pela técnica de picnometria para os produtos da separação magnética de alta intensidade, notam-se valores das concentrações coerentes com os obtidos pela técnica de DRX (Tabela 08). As diferenças encontradas podem estar relacionadas com as aproximações feitas no cálculo dos teores das concentrações por picnometria, assim como por se tratar de uma técnica em que mede o volume, onde o líquido ao penetrar nos poros não conectados das partículas pode alterar o volume e influenciar no resultado final da massa específica calculada.

4.3. Análise microestrutural

4.3.1. Análise microestrutural qualitativa

A hematita destaca-se por sua maior refletância, maior brilho nas imagens BF. Já nas imagens sob luz polarizada pode-se observar os cristais individuais de hematita e sua orientação, especialmente, através das diferentes cores que eles apresentam nas imagens CPOL. Desta forma, o uso combinado de BF e CPOL, ou alternativamente LPOL+10, proporciona contraste suficiente entre os cristais de hematita, permitindo sua discriminação. Assim, observando-se a forma dos cristais de hematita pode-se facilmente identificar as classes de hematita definidas na Tabela 01.

A Figura 30 mostra imagens de um campo da seção polida do concentrado da separação magnética de baixa intensidade. De acordo com o resultado da difração de raios-x, estão presentes hematita e magnetita. Os padrões adotados neste trabalho (Tabela 01) permitem facilmente a identificação da martita, não transformada completamente em magnetita, em todos os campos das imagens adquiridas em CPOL. A martita é uma hematita com hábito de magnetita e por isso foi concentrada na separação magnética de baixa intensidade. Isto justifica as duas fases encontradas

no espectro de DRX. A Figura 31 mostra uma típica partícula de martita identificada apenas na imagem em CPOL, evidenciando a dificuldade de distinção das texturas da hematita em campo claro.

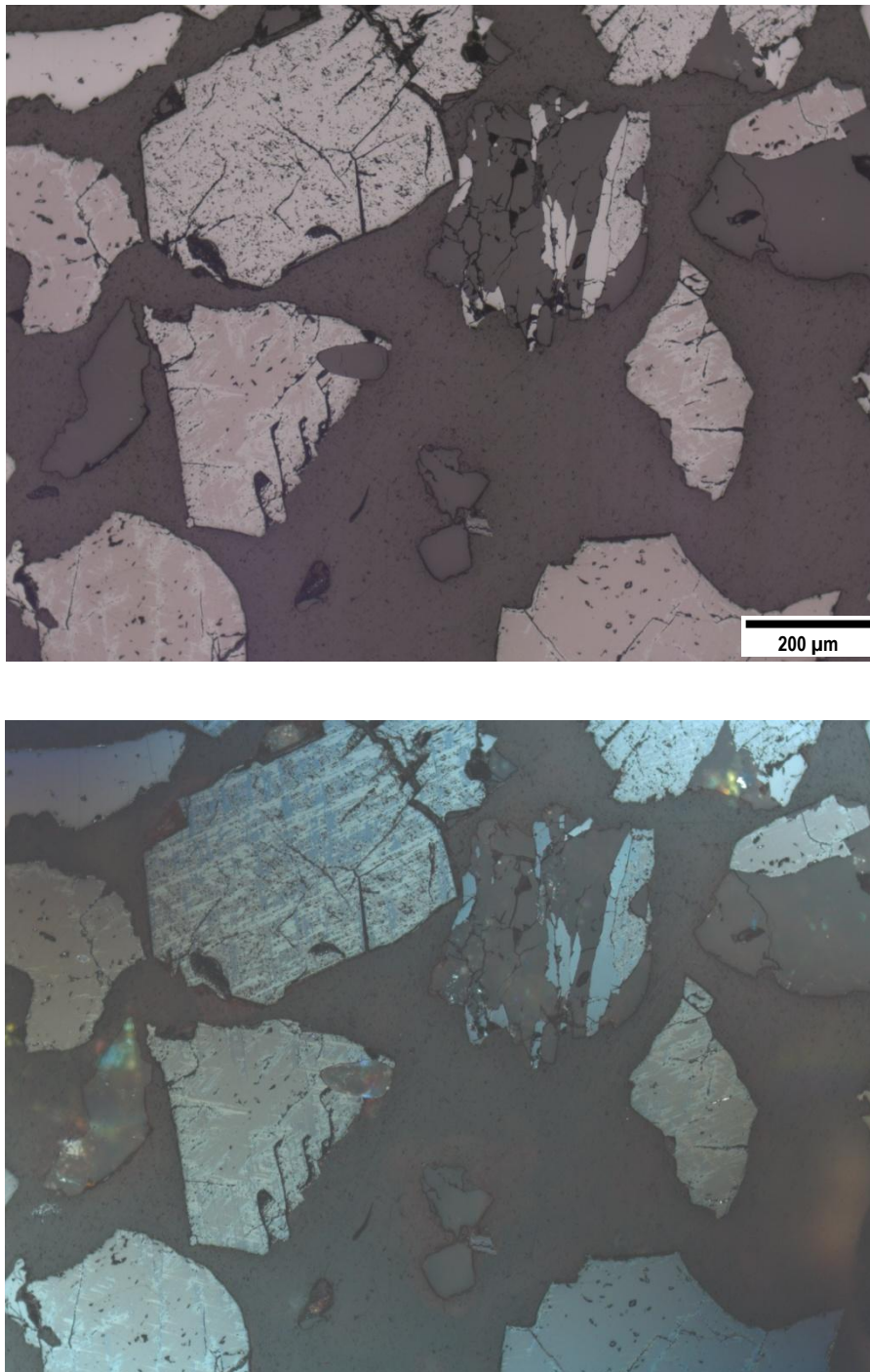


Figura 30 – Imagens de um campo da seção polida do produto concentrado da separação de baixa intensidade (fração retida em 0,300 mm) observado com aumento de 10x em (a) BF, (b) CPOL.

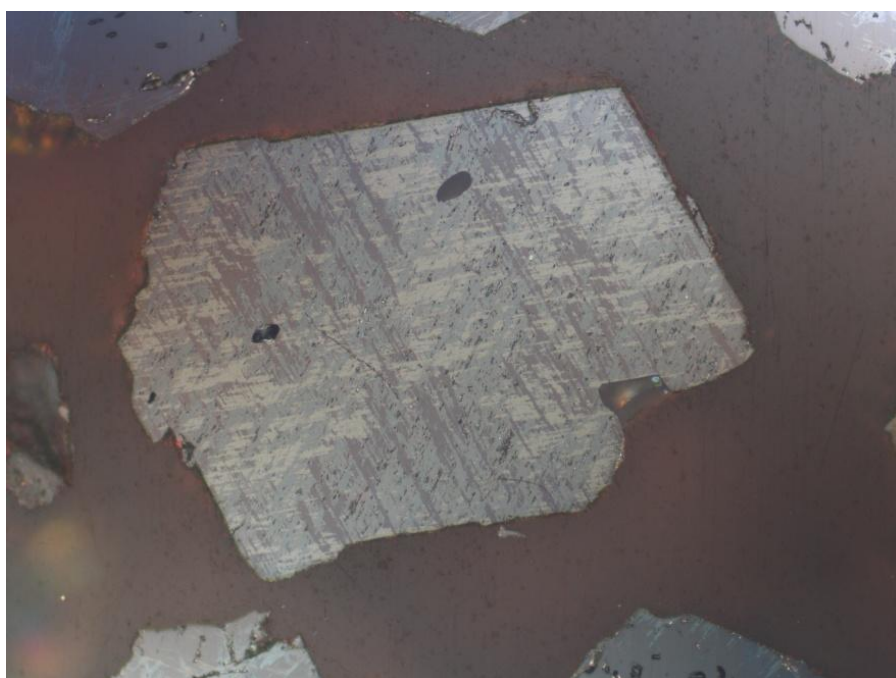
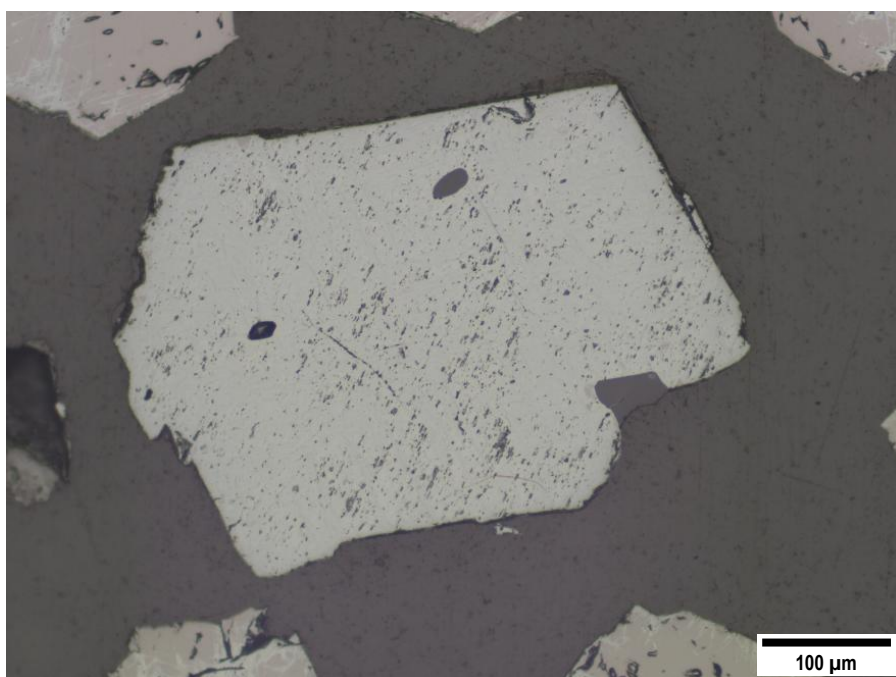


Figura 31 – Partícula de martita da seção polida do produto concentrado da separação de baixa intensidade (fração retida em 0,300 mm) observado com aumento de 20x em (a) BF, (b) CPOL.

Observou-se que o produto do concentrado da separação magnética de baixa intensidade em frações mais grossas é composto basicamente por magnetita e martita, além de partículas mistas, como circulado na Figura 32, deixando claro a não

liberação total da hematita. A indicação em vermelho mostra uma partícula mista de martita e especularita.

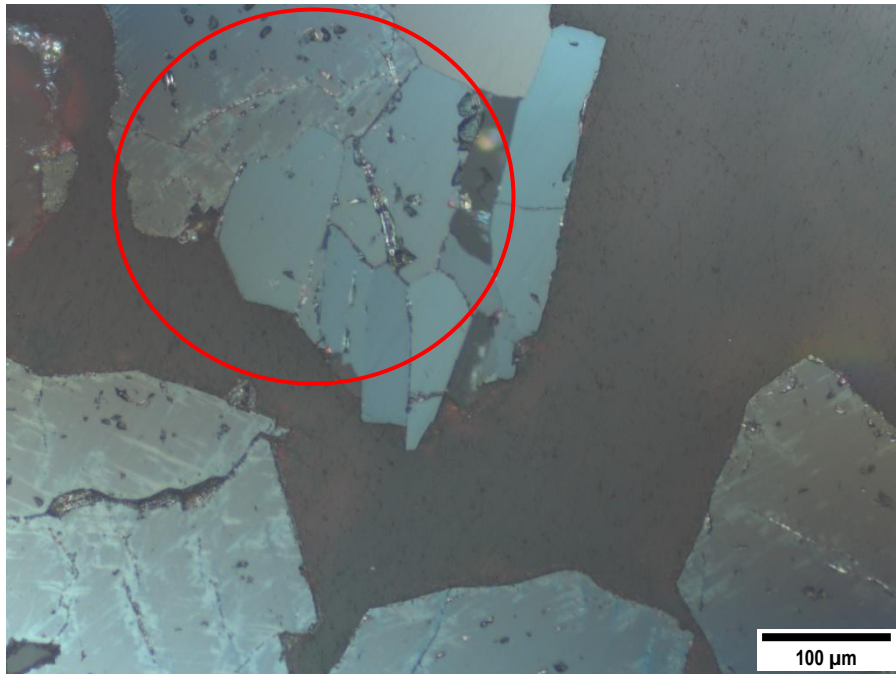


Figura 32 – Partícula mista de martita e hematita lamelar da seção polida do produto concentrado da separação de baixa intensidade (fração retida em 0,300 mm) observado com aumento de 20x em CPOL.

Na fração retida em 0,300 mm do concentrado magnético de alta intensidade, a hematita ocorre principalmente em partículas mistas e é predominantemente lamelar. Seus grãos são alongados e, dentro de cada partícula, apresentam orientação cristalina similar, conforme pode ser observado na Figura 33 que mostra imagens BF e CPOL de um campo típico da seção polida desta fração do concentrado.

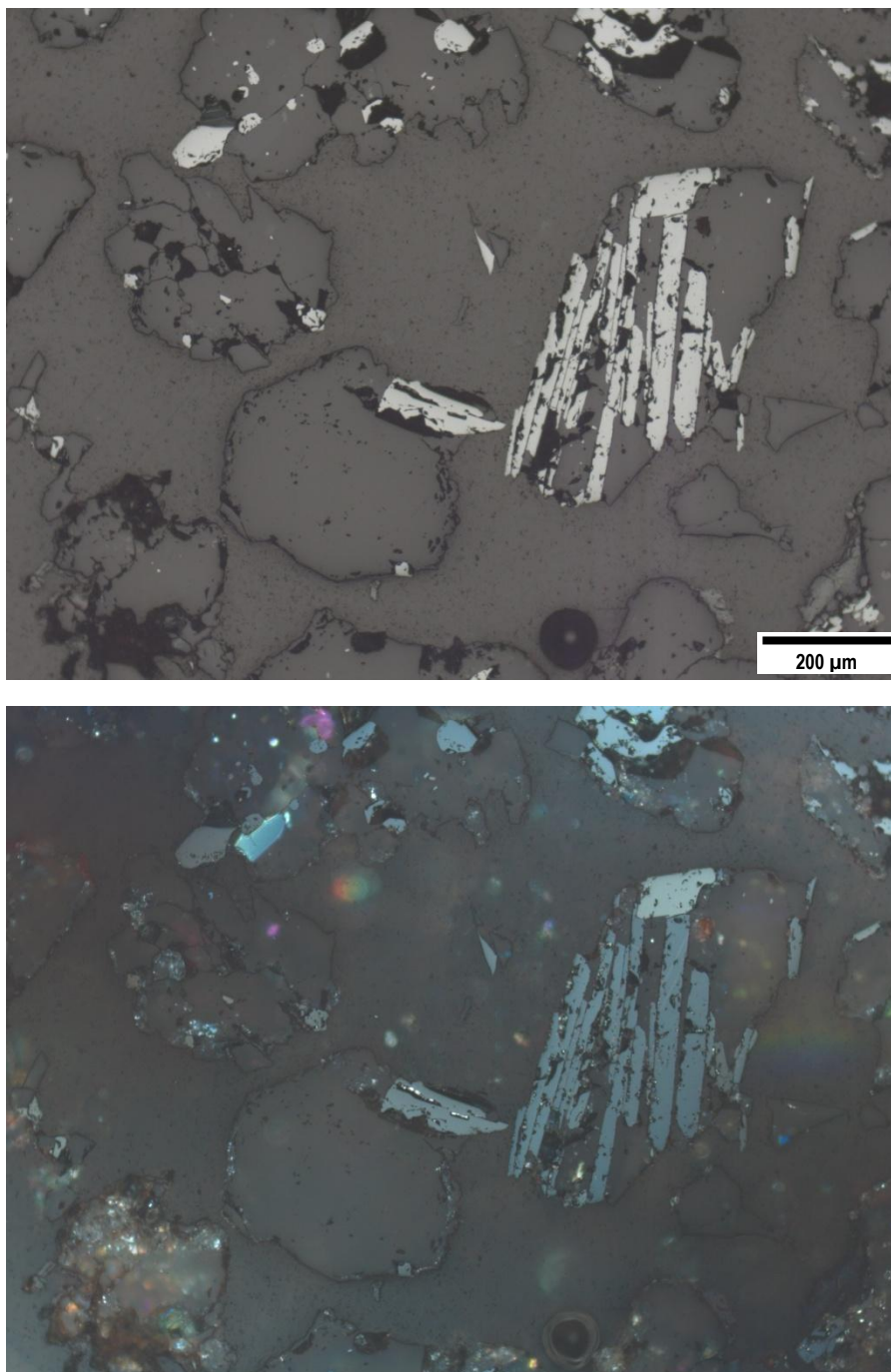


Figura 33 – Imagens de um campo da seção polida do concentrado (fração retida em 0,300 mm) observado com aumento de 10x em (a) BF, (b) CPOL.

As setas em vermelho nas Figuras 34 e 35 mostram exemplos de partículas pertencentes às classes de hematita não lamelar: hematita microcristalina, lobular e martita.

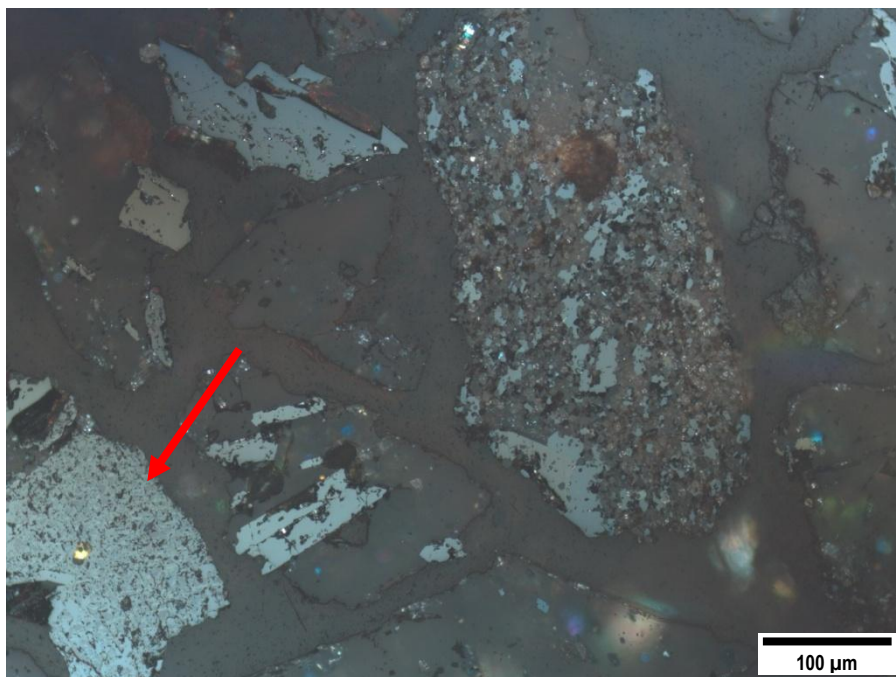


Figura 34 – Partícula de hematita microcristalina da seção polida do produto concentrado da separação de alta intensidade (fração retida em 0,300 mm) observado com aumento de 20x em CPOL.

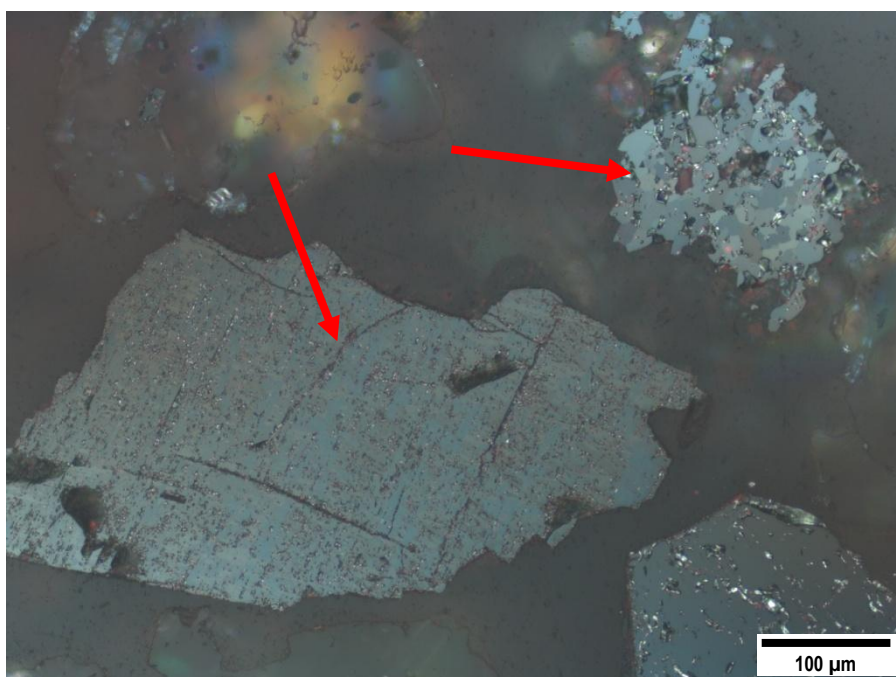


Figura 35 – Partícula de martita e hematita lobular da seção polida do produto concentrado da separação de alta intensidade (fração retida em 0,300 mm) observado com aumento de 20x em CPOL.

Na fração retida em 0,212 mm do concentrado magnético de alta intensidade, também nota-se a predominância de hematita lamelar. Todavia, já podem ser observadas algumas partículas liberadas. A Figura 36 mostra imagens BF e CPOL de um campo típico da seção polida desta fração do concentrado.

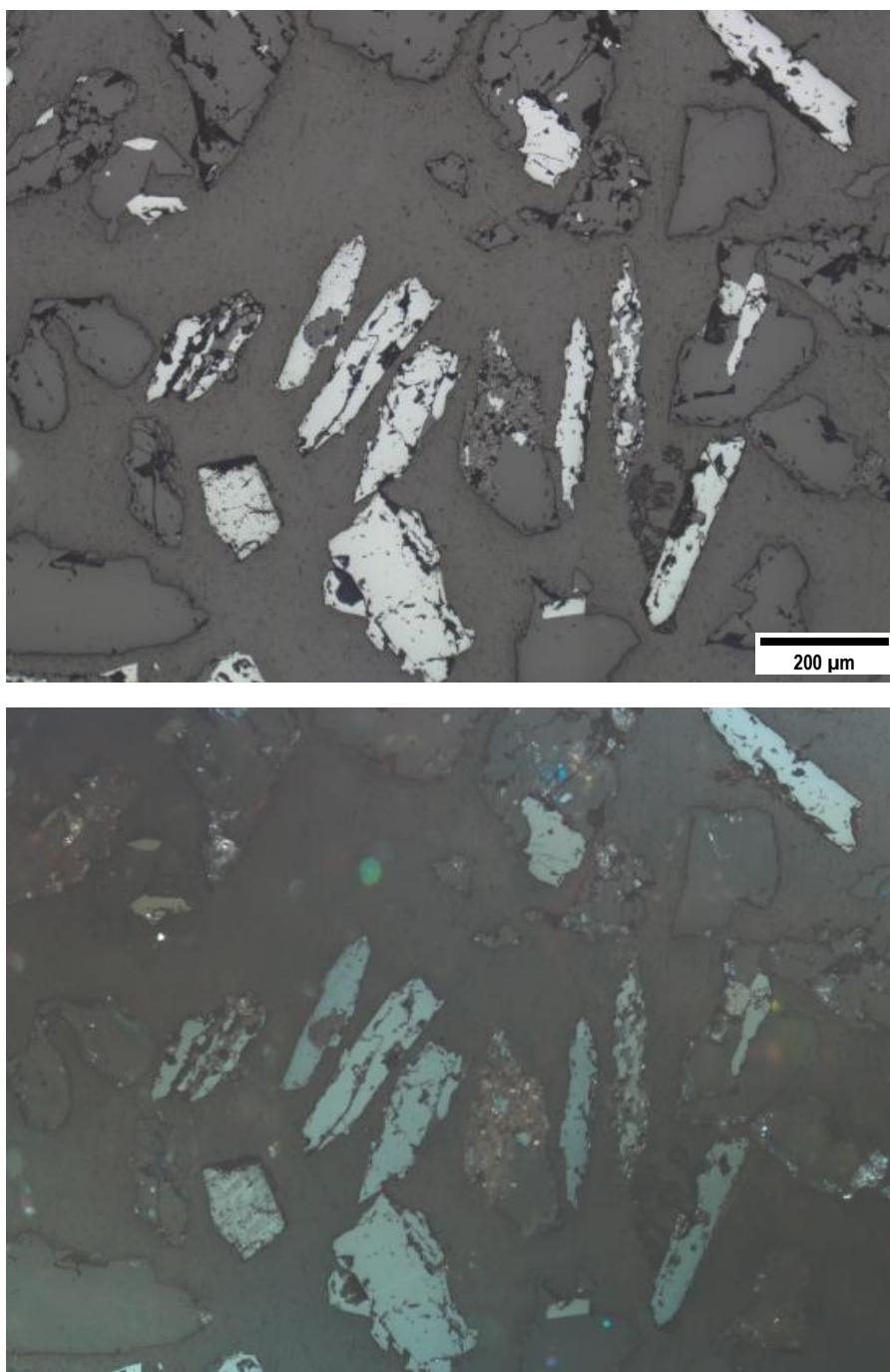


Figura 36 – Imagens de um campo da seção polida do concentrado (fração retida em 0,212 mm) com aumento de 10x em (a) BF, (b) CPOL.

A fração retida em 0,150 mm do concentrado apresenta, comparativamente, uma maior liberação. Correlacionando com os dados da concentração magnética, pode-se observar que a melhora na concentração se deve a maior liberação das partículas de hematita em relação às granulometrias maiores. As imagens em CPOL permitiram mostrar a predominância da hematita lamelar. Partículas das demais classes da hematita foram observadas em alguns campos, como mostra a Figura 37.

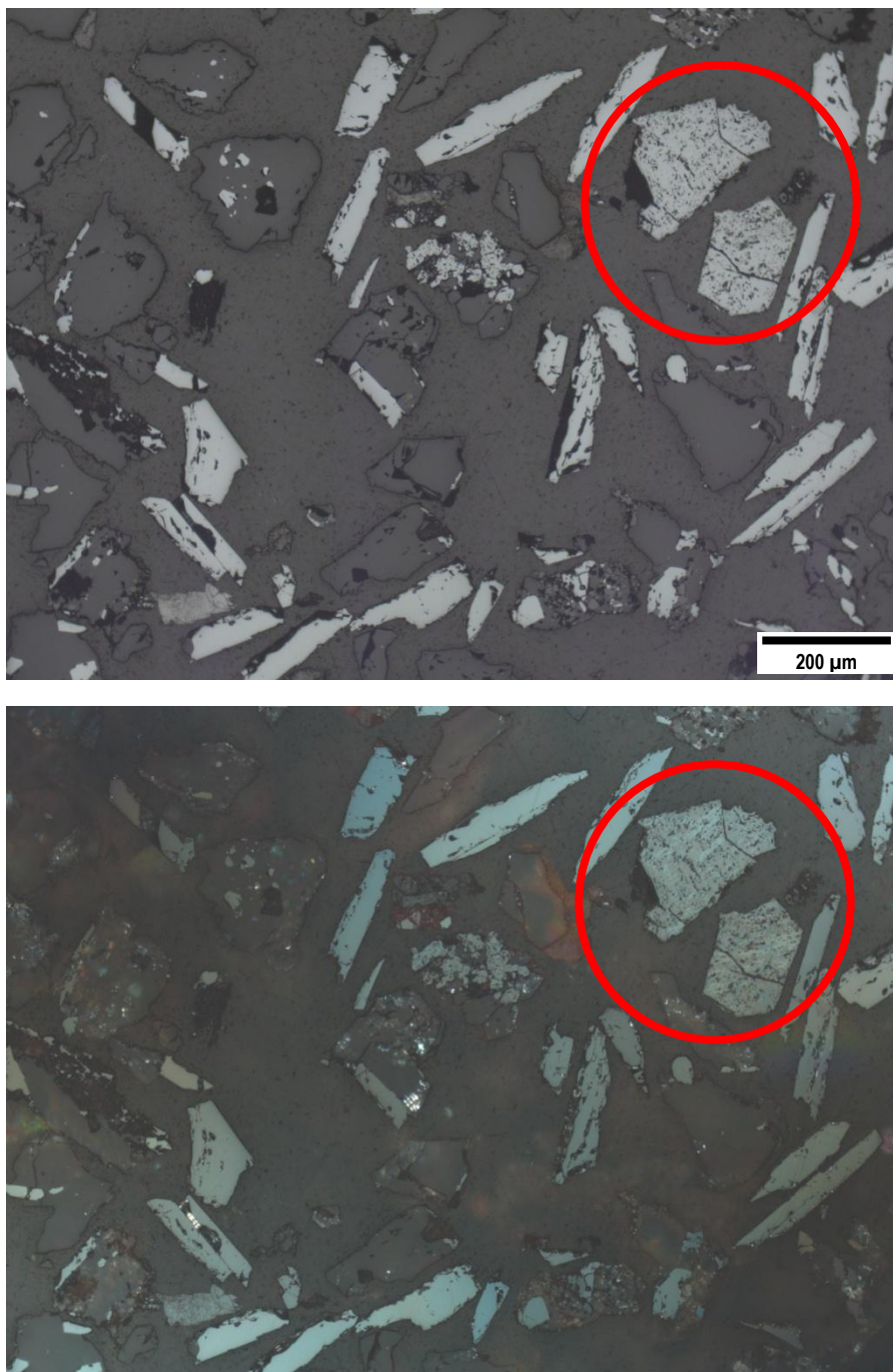


Figura 37 – Partícula de martita (circulada em vermelho) e partículas de especularita da seção polida do concentrado (fração retida em 0,150 mm) observado com aumento de 10x em (a) BF, (b) CPOL.

Na fração retida em 0,106 mm, grande parte da hematita apresenta-se aproximadamente completamente liberada. Entretanto, pode-se dizer que muitas partículas de quartzo se reportaram ao concentrado da separação magnética de alta intensidade conforme pode ser visto na Figura 38 que mostra imagens BF e CPOL de

um campo típico da seção polida desta fração do concentrado. Esse dado qualitativo vai de encontro com os dados quantitativos obtidos através da picnometria e difração de raios X, onde o teor de quartzo no concentrado da separação magnética de alta intensidade (Tabela 07) é relativamente alto.

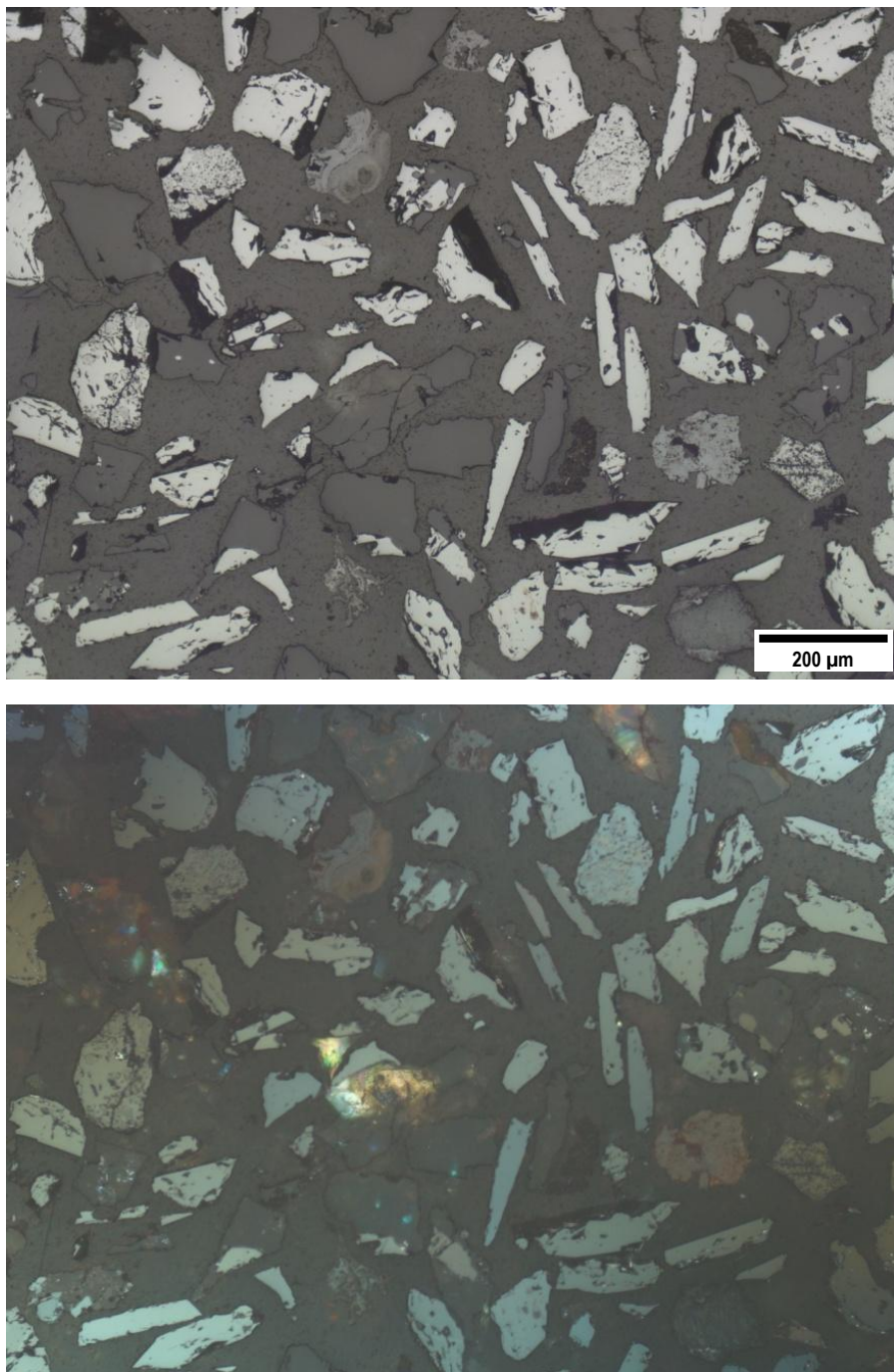


Figura 38 – Partículas de especularita de um campo da seção polida do concentrado (fração retida em 0,106 mm) observado com aumento de 10x em (a) BF, (b) CPOL.

A Figura 39 é referente a um campo da fração retida em 0,075 mm do concentrado. Pode-se observar que, além do evidente caráter especularítico já descrito nas demais frações, a hematita está presente predominantemente como monocristais lamelares liberados (Figura 40). Correlacionando com os resultados da concentração magnética, que pode-se dizer que diversas partículas que não são de interesse reportaram impropriamente a esse produto, não sendo separadas do mineral de interesse.

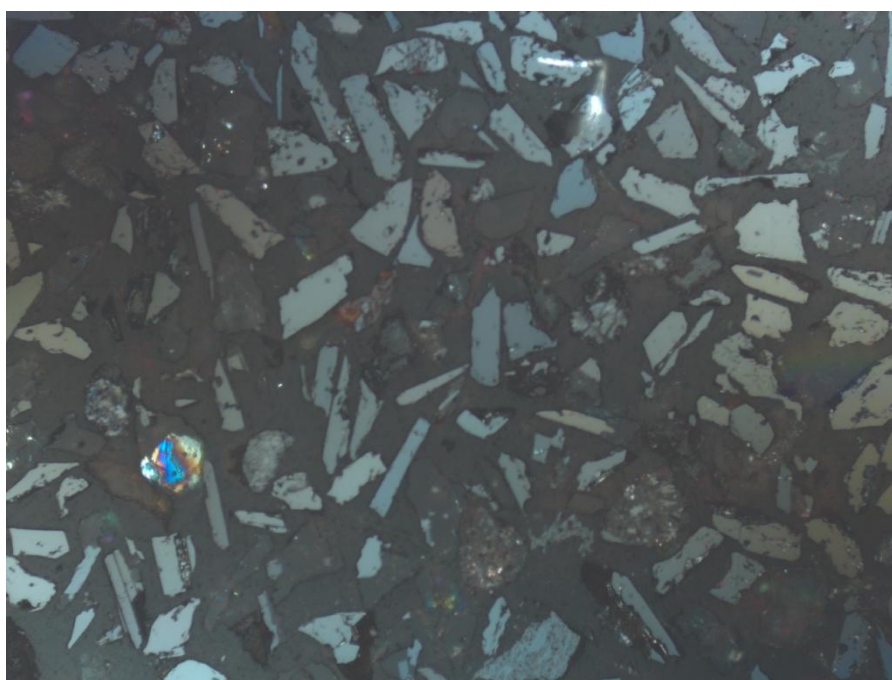
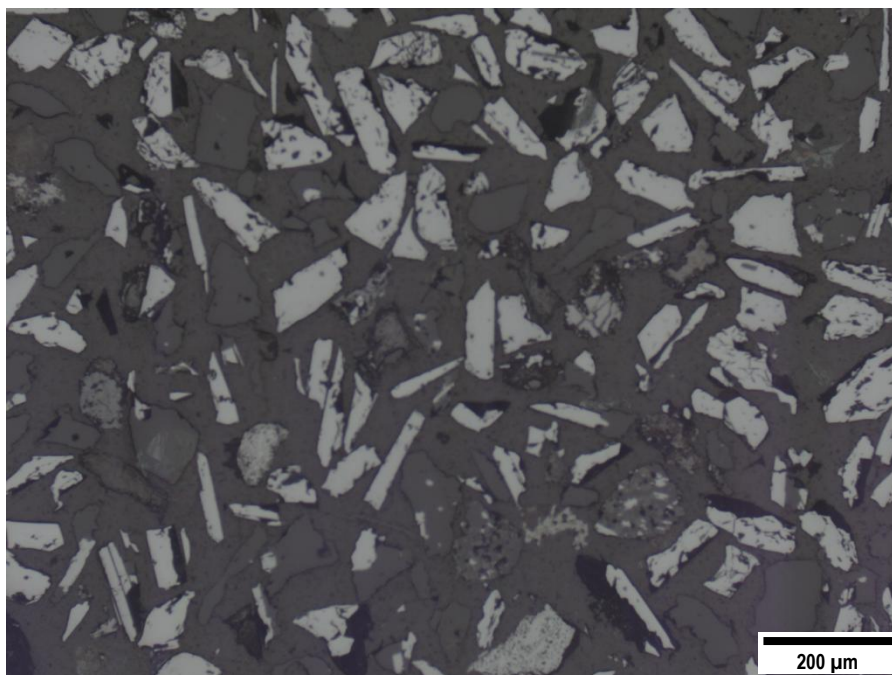


Figura 39 – Partículas de especularita de um campo da seção polida do concentrado (fração retida em 0,075 mm) observado com aumento de 10x em (a) BF, (b) CPOL.

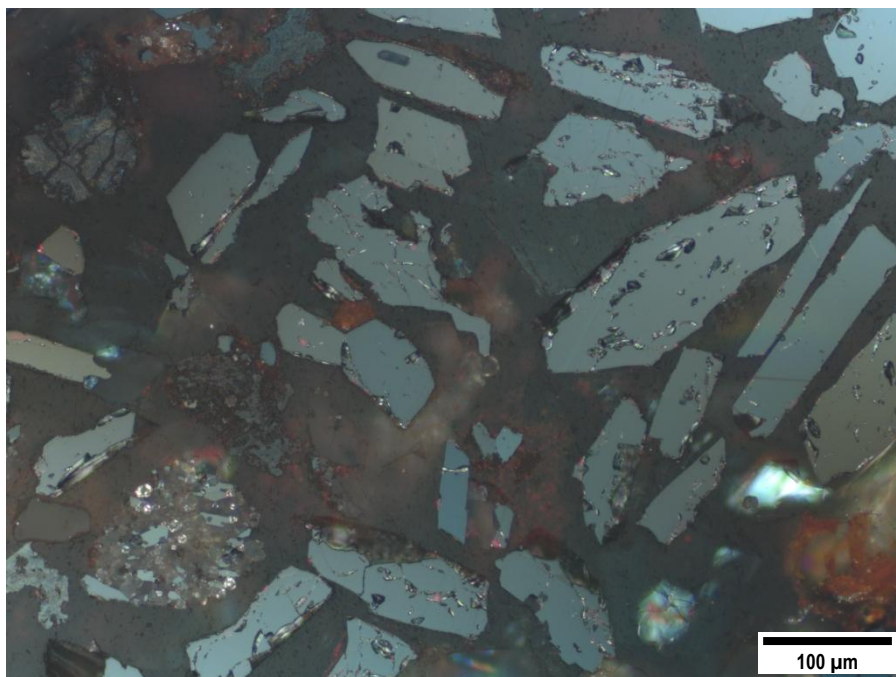


Figura 40 – Partículas de especularita de um campo da seção polida do produto concentrado da separação de alta intensidade (fração retida em 0,075 mm) observado com aumento de 20x em CPOL.

A imagem do produto não magnético pode ser observado na Figura 41. De acordo a quantificação de fases determinada por picnometria na alíquota retida em 0,075mm, o percentual de quartzo está em torno de 92% (Tabela 11). Podemos observar nas imagens a predominância do quartzo, com algumas partículas de hematita que podem ter sido arrastadas devido ao fluxo de água muito grande, campo magnético aplicado baixo durante a separação magnética ou podem ser partículas mistas e o corte da seção polida mostrou a hematita.

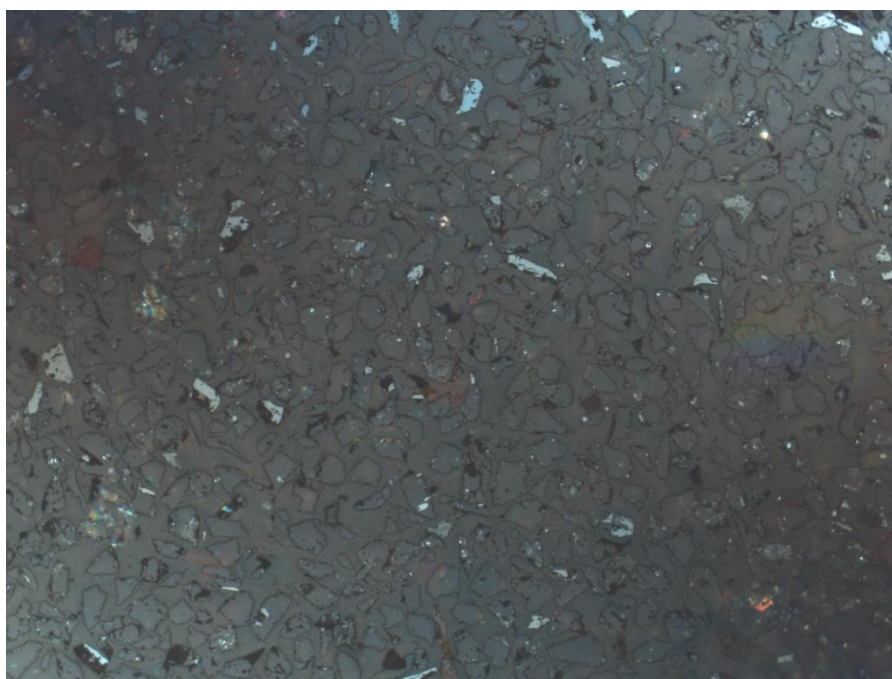
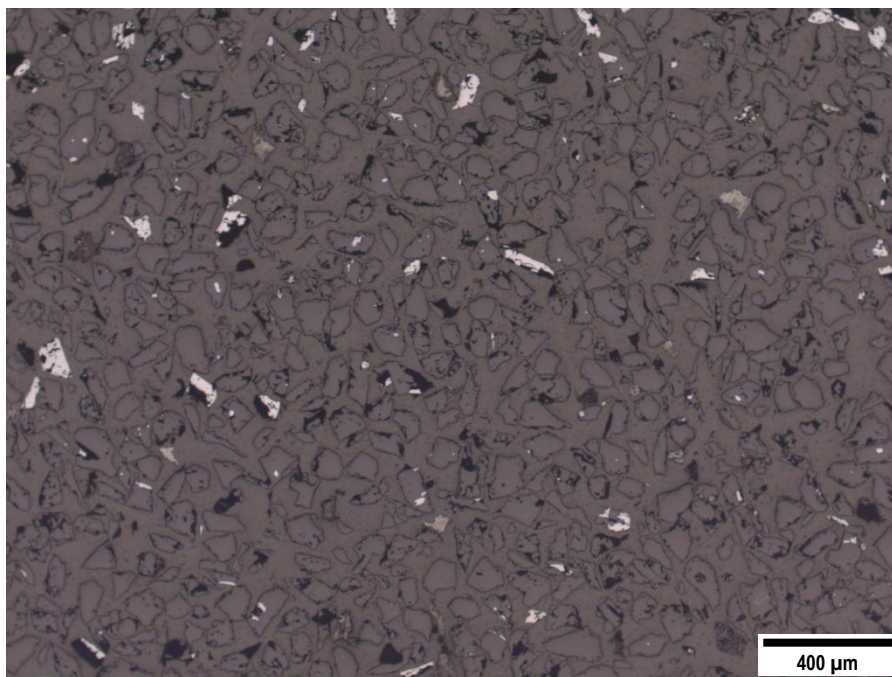


Figura 41 - Imagens de um campo da seção polida do produto não concentrado da separação de alta intensidade (fração retida em 0,075 mm) observado com aumento de 5x em (a) BF, (b) CPOL.

A utilização da polarização circular na aquisição das imagens foi fundamental para a caracterização qualitativa das classes da hematita (Figura 42).

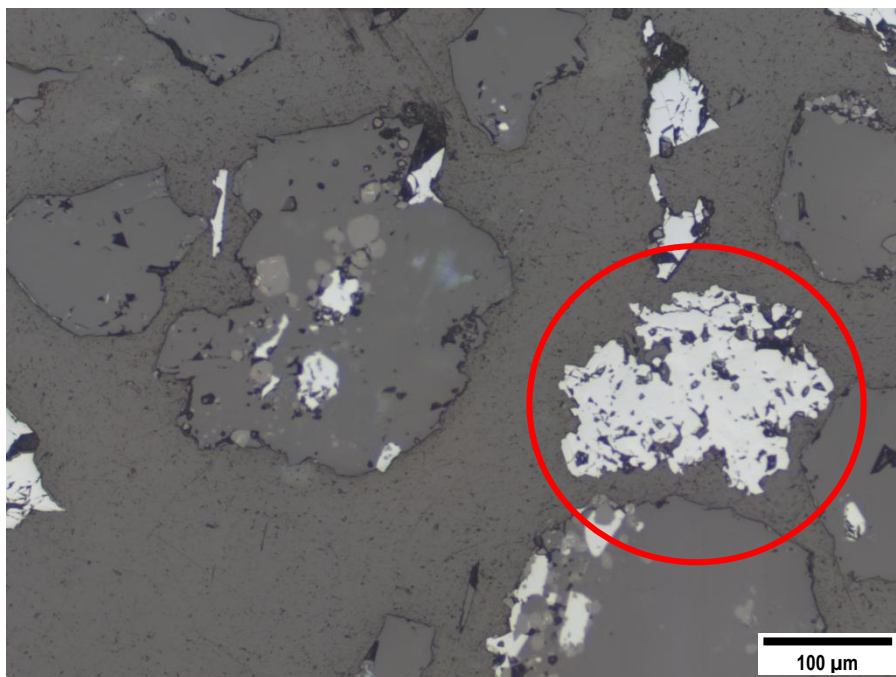


Figura 42 – Partícula de hematita lamelar de um campo da seção polida do produto concentrado da separação de alta intensidade (fração retida em 0,150 mm) observado com aumento de 20x em (a) BF (b) CPOL.

4.3.2. Análise microestrutural quantitativa

A Tabela 12 mostra as taxas obtidas pelo sistema automático de classificação desenvolvido por Fontes & Gomes (2012).

Tabela 12 – Taxas percentuais das classes de hematita.

Classes de Hematita	Concentrado magnético da fração retida em 0,300mm	Concentrado magnético da fração retida em 0,150mm	Concentrado magnético da fração retida em 0,075mm
Granular	19,53	22,05	2,39
Lamelar	54,91	54,62	69,80
Lobular	21,45	19,66	23,92
Martita	3,24	2,95	2,99
Microcristalina	0,86	0,72	0,90
Total	100	100	100

A alíquota da fração retida em 0,075mm obteve resultados mais satisfatórios devido às partículas serem predominantemente monocristais lamelares liberados. Todavia, no presente trabalho, à qualidade insuficiente do polimento das amostras provocou arrancamentos, mudando a forma dos cristais. Assim, muita hematita lamelar, que possui contorno linear, foi classificada como lobular devido a irregularidade dos contornos de grão provocado pelos arrancamentos. Além disso, os cristais de hematita lamelar quando quebrados podem ser classificados como granular.

5. Conclusões

As variações de composição para os dois produtos revelam que o material com granulometria mais fina apresentou melhor separação, pois as partículas de interesse estavam mais liberadas. As variações em relação aos valores de referência podem ser justificados pelo arraste das partículas de interesse para o produto não magnético e pelo engaiolamento das partículas hematíticas no concentrado magnético, além da liberação incompleta dos minerais. Esse efeito pode ser reduzido com a utilização de novos parâmetros na etapa de concentração, uma vez que ele está associado a erros de manipulação técnica e cominuição adequada.

Uma caracterização tecnológica preliminar qualitativa do minério de ferro especularítico da jazida Borda da Mata foi realizada, empregando-se uma rota de concentração com britador de mandíbulas, britador de rolos e concentração magnética de baixa e alta intensidades.

Esta caracterização preliminar confirmou que o minério estudado se trata de um minério de ferro especularítico e mostrou que sua concentração e liberação são possíveis. Contudo, alguns trabalhos adicionais são claramente necessários:

- aprimoramento da rota de processo testada e verificação de outras alternativas;
- quantificação da liberação de hematita através de análise de imagens de MEV ou por sistemas automáticos de mineralogia automatizada;
- melhoria da qualidade das seções polidas a fim de permitir a análise microestrutural quantitativa das classes de hematita.

6. Referências Bibliográficas

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: 9th International Congress for Applied Mineralogy - ICAM 2008, Brisbane, 2008, p. 669-672.

Alves, M.E., Mascarenhas, Y.P., Vaz, C.M.P., Aspectos Teóricos e Perspectivas da Aplicação do Método de Rietveld à Quantificação Mineralógica de Solos. EMBRAPA. São Carlos, 2005.

Augusto, K.S.. Identificação Automática do Grau de Maturação de Pelotas de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Criddle, A.J.; Stanley, C.J. Quantitative Data File for Ore Minerals, 3 ed. Chapman & Hall, London. 1993.

Danz, R. & Gretscher, P. C-DIC: a new microscopy method for rational study of phase structures in incident light arrangement. Thin Solid Films, 2004, 462-463, 257-262.

Donskoi, E., Suthers, S. P., Fradd, S. B., Young, J. M., Campbell, J. J., Raynlyn, T. D., Clout, J. M. F., 2007. Utilization of optical image analysis and automatic texture classification for iron ore particle characterization. Minerals Engineering, v. 20, p. 461-471.

Duda, R. O., Hart, P. E. and Stork, D. G., 2001. Pattern classification. 2nd edition. Wiley-Interscience, New York.

Figueira, H. V. O., Almeida, S. L. M., Luz, A. B., Caracterização Tecnológica de Minérios. Em: Luz, A.B., Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., Tratamento de Minérios. 4ªed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 4, p. 113-194

Fontes, A. V.; Gomes, O. D. M. Classificação Automática de Tipos de Hematita em Minério de Ferro por Análise de Textura. In: XX Jornada de Iniciação Científica do CETEM, 2012, Rio de Janeiro. XX Jornada de Iniciação Científica do CETEM. Rio de Janeiro: CETEM, 2012.

Giúdice, C.A. & Benítez, J.C. Optimising the corrosion protective abilities of lamellar micaceous iron oxide containing primers. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 47(4), 2000, pp. 226-232.

Glazer, A.M., Lewis, J.G. and Kaminsky, W., An automatic optical imaging system for birefringent media. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1996, 452(1955), 2751-2765.

Gomes, O. D. M., Paciornik, S., 2008. Iron ore quantitative characterization through reflected light-scanning electron co-site microscopy. In: *Proceedings of Ninth International Congress on Applied Mineralogy*, Brisbane (Australia), p. 699-702.

Gomes, O. D. M., Paciornik, S., 2008. RLM-SEM co-site microscopy applied to iron ore characterization. In: *Annals of 2nd International Symposium on Iron Ore*, São Luiz (Brazil), p. 218-224.

Gomes, O.D.M.; Lima, P.R.L.; Fontes, A.V. Morphological Characterization of Natural and Artificial Sands Through Image Analysis. In: Maarten A.T.M. Broekmans. (Org.). *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*. 1ed. Berlin: Springer, 2012, p. 255-263.

Gomes, O.D.M. ; Iglesias, J.C.A ; Paciornik, S. ; Vieira, M.B. Classification of Hematite Types in Iron Ores through Circularly Polarized Light Microscopy and Image

Analysis. In: Process Mineralogy '12, 2012, Cidade do Cabo. Process Mineralogy '12. Falmouth (UK): Minerals Engineering International, 2012. p. 1-14.

Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 2002. Digital Image Processing. 2nd edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River.

Gribble, C.; Hall, A.J. Optical Mineralogy: Principles and Practice. UCL Press, London. 1992.

Haralick, R. M., Shanmugam, K. and Dinstein, I., 1973. Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 3, n. 6, p. 610-621.

Higgins, M.D., Imaging birefringent minerals without extinction using circularly polarized light. Canadian Mineralogist, 2010, 48, 231-235.

ICDD, 2012. International Centre for Diffraction Data – PDF4+ Relational Powder Diffraction File, Newton Square.

Iglesias, J.C.A., Gomes, O.D.M. and Paciornik, S., Automatic recognition of hematite grains under polarized reflected light microscopy through image analysis. Minerals Engineering, 2011, 24 (12), 1264-1270.

Iglesias, J. C. A. Uma Metodologia para Caracterização de Sínter de Minério de Ferro: Microscopia Digital e Análise de Imagens. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Iglesias, J. C. A. Desenvolvimento de um sistema de microscopia digital para classificação automática de tipos de hematita em minério de ferro. Dissertação de Doutorado – Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Jähne, B., 2002. Digital Image Processing. 5th edition, Springer, Berlin.

Konig, U.; Pollmann, H.; Angelica, R.S. O Refinamento de Rietveld como um método para o controle de qualidade de minérios de ferro. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 55, n. 2, Apr. 2002

Lage, E.A.. Separadores Magnéticos: Experiência em Minério de Ferro na Herculano Mineração. Trabalho de conclusão de curso da pós graduação em engenharia mineral – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

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: VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 2007, Salvador. Anais, v. 2. p. 582-588, 2007.

Libaneo, C.A.F.; Kaneko, K.M.; Coelho, L.H.T.; Purificação, E.X. Classificação Mineralógica, Textural e Granulométrica de Detalhe de Minério de Ferro (Pellet Feed) e suas Implicações Geosiderúrgicas. In: III Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, 2001.

Luz, A.B., Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., Tratamento de Minérios. 4ªed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 858 p.

Neumann, R., Schneider, C.L., Neto, A.A., Caracterização Tecnológica de Minérios. Em: Luz, A.B., Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., Tratamento de Minérios. 4ªed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 3, p. 55-106

Oldenbourg, R. & Mei, G., New polarized-light microscope with precision universal compensator. Journal of Microscopy, 1995, **180**, 140-147.

Oliveira, P.S. Rotas para Recuperação de Ferro Fino Contido no Underflow do Espessador de Lama da Usina de Conceição. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006.

Pereira, W.C., Remacre, A.Z., Utilização de variável mineralógica na estimativa de reservas de minério de ferro. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 56(2): 123-129, abr. jun. 2003.

Pirard, E., Lebichot, S., 2004. Image analysis of iron oxides under the optical microscope. In: Applied Mineralogy: Developments in Science and Technology, v. 1. ICAM-BR, São Paulo, p. 153-156.

Ribeiro, M.R. & Vieira, C.B., Investigation on CVRD's iron ores characteristics which have influence on their grinding behavior. In 2nd International Meeting on Ironmaking and the 1st International Symposium on Iron Ore. ABM, Vitória, 2004, pp. 307-317.

Sampaio, J.A., Luz, A.B., Caracterização Tecnológica de Minérios. Em: Luz, A.B., Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., Tratamento de Minérios. 4ªed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 8, p. 305-335.

Toussaint, G.T. Bibliography on Estimation of Misclassification. IEEE Transactions on Information Theory, 20(4), 1974, 472-479.

Vieira, C.B., Rosiere, C.A., Pena, E.Q., Seshadri, V., Assis, P.S., Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. Revista Escola de Minas, 2003, 56(2), 97-102.

_____. Características estruturais dos finos SECA, SECE, e ALEGRIA que compuseram pilhas de desempenho ruim e excelente na Usiminas. Relatório Interno, VALE S.A., 22 p., 1998.