

AS CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS, TEXTURAIIS E DE ANISOTROPIA DOS MINÉRIOS DE FERRO COMO PARÂMETROS GEOMETALÚRGICOS.¹

CARLOS ALBERTO ROSIÈRE²

HORST QUADE³

FARID CHEMALE JR⁴

HEINRICH SIEMES⁵

RESUMO

As características mineralógicas, o arranjo dos grãos e a textura dos minérios de ferro são variáveis dependendo do tipo de jazida e seu posicionamento geológico e estrutural. Por exemplo, os minérios do Quadrilátero Ferrífero, de idade Proterozóica apresenta uma complexa seqüência de cristalização a partir da magnetita "primária" (kenomagnetita), que sofreu martitização parcial ou total e se recristalizou em hematita xenoblástica ou idioblástica, freqüentemente como finas palhetas de especularita.

Os processos geológicos a que se submeteram os minérios deram origem a uma grande variação no arranjo dos cristais (trama), resultando em minérios granoblásticos (distribuição isotrópica dos cristais), lepidoblásticos (distribuição anisotrópica planar) e nematoblásticos (distribuição anisotrópica linear) com textura entre extremos aleatórios e de quase monocristal, e apresentando diferentes graus de anisotropia de suas propriedades magnéticas, dependendo do grau de deformação e metamorfismo.

Tais propriedades são determinadas com diferentes graus de dificuldade operacional, obtendo-se grandezas que podem ser utilizadas como parâmetros para caracterização do minério. Sua influência nos processos metalúrgicos e de beneficiamento estão sendo estudadas de forma a se definir sua real importância industrial.

Palavras chave: Mineralogia, Trama, Textura, Anisotropia, Parâmetros geometalúrgicos

¹ I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização

² Prof. Adjunto do Instituto de Geociências da UFMG, Pesquisador do CNPq

³ Prof. Titular do Instituto de Geologia da Universidade Técnica de Clausthal, Alemanha

⁴ Prof. Titular do Instituto de Geociências da UFRGS, Pesquisador do CNPq

⁵ Prof. Titular do Instituto de Mineralogia e Depósitos Minerais da Universidade Técnica de Aachen, Alemanha

INTRODUÇÃO

Para caracterização do minério de ferro na indústria mineradora e metalúrgica podem ser utilizados parâmetros físicos e químicos, tais como teores em elementos maiores ou seus óxidos (Fe_2O_3 , FeO , SiO_2 , Al_2O_3), elementos menores (P, S etc), características físicas e metalúrgicas obtidas através de ensaios normatizados (granulometria dos produtos lavrados, porosidade, resistência ao transporte, redutibilidade, RDI, etc) que, até recentemente, eram considerados suficientes para guiar os processos e métodos de lavra e metalúrgicos. Problemas de qualidade e produtividade na utilização do minério tem sido combatidos através do desenvolvimento de novas tecnologias nos processos industriais dentro das usinas, cujo progresso não tem sido acompanhados de forma satisfatória pela outra extremidade da linha de produção: a pesquisa geológica do minério. A atual necessidade de aumentar a produtividade leva entretanto o geólogo e o mineralogista, em colaboração com engenheiros metalúrgicos, a se incumbir da tarefa de fornecer à indústria mineral novos parâmetros que permitam norteá-la na pesquisa tecnológica. Assim sendo, os geocientistas de um dos principais produtores de minério de ferro do mundo não podem se furtar desse desafio que, além de seu interesse científico, podem significar ganhos consideráveis à nossa indústria.

As características mineralógicas, texturais e de anisotropia do minério de ferro são provenientes de sua origem e posicionamento geológico, resultando em corpos de mineralogia variada, com óxidos e hidróxidos como principais minerais-minério, além de quartzo, carbonatos, silicatos e sulfetos. Os resultados aqui apresentados baseiam-se principalmente no estudo de minérios metamórficos do Quadrilátero Ferrífero de idade proterozóica (2,4 bilhões de anos), onde as características estruturais da região imprimem um caráter peculiar a essas rochas.

O presente trabalho é resultado de pesquisa desenvolvida no Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa/IGC/UFMG, Instituto de Geologia da Universidade Técnica de Clausthal e Instituto de Mineralogia e Depósitos Minerais da Universidade Técnica de Aachen, financiado pelo DAAD e CNPq, com o apoio logístico das empresas MBR, SAMITRI e CVRD além da FERTECO, SAMARCO e CSN que cederam seus depósitos para amostragem. Atualmente o projeto conta adicionalmente com o suporte da FINEP dentro do PADCT e a participação do DPM/IGCE/UNESP - Rio Claro, SUMIN e SUTEC da CVRD, IPEN/CNEN, GKSS-Gesthaacht e a equipe do Prof. V. Seshadri do Laboratório de Processos Metalúrgicos da EEUFMG.

CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

Os itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero foram sujeitos a metamorfismo de baixo a médio grau associado a processos deformacionais durante os fenômenos orogenéticos (formadores de montanhas) que provocou a recristalização sin- a pós-tectônica a partir de uma mineralogia primária cuja constituição pode-se hoje somente estimar a partir da comparação com outros depósitos e considerações teóricas de caráter geoquímico e mineralógico. A análise microscópica em diversos depósitos do Quadrilátero Ferrífero, segundo Rosière^(1,2) e Rosière e Chemale Jr⁽³⁾ indica a seguinte seqüência de gerações de óxido de ferro encontrada em todos os

depósitos analisados, embora variações locais ocorram, com a predominância de cada uma das fases mineralógicas dependendo do posicionamento estrutural e grau de metamorfismo sofrido pela rocha:

- 1) Magnetita I-> Martita I-> Hematita Ib
- 2) Hematita Ia/b -> Hematita II -> Hematita II -> Hematita IV
- 3) Magnetita II -> Martita II
- 4) Magnetita III -> Martita III

Magnetita pode também ocorrer, mas sua presença é rara e de difícil determinação.

Magnetita I - é claramente o mineral opaco mais antigo encontrado, e aparece principalmente em corpos situados em áreas preservadas da deformação onde estruturas primárias/diagenéticas podem ser reconhecidas. Sua origem é ainda obscura. Esse mineral aparece em luz refletida na maioria das vezes, como relictos de cor castanho-rosada, isotrópicos em luz polarizada, inclusos em agregados de cristais de hematita, produto da martitização e recristalização. Sua cor permite caracterizá-la como kenomagnetita, uma variedade parcialmente oxidada, pela perda parcial de cátions Fe^{2+} em sua estrutura, conforme definida por Kullerud et. al.⁽⁴⁾.

Os agregados de magnetita total ou parcialmente martitizados são constituintes importantes em formações ferríferas e minérios de alto teor pouco recristalizados. São distribuídos ao longo do bandamento e também em concreções pisolíticas encontradas na Formação Cauê descritos por Rosière e Carvalho da Silva Jr.⁽⁵⁾. Em minérios muito deformados podem aparecer como "porfiroclastos" orientados, levemente estirados até cataclados, envolvidos por cristais orientados no plano da foliação. Cristais individuais de magnetita/martita podem também ser reconhecido dentro da matriz. São hipidiomorfos (aprox. octaédricos) com dimensões de até 3mmØ, quando se observa que a martitização ocorre de fora para dentro do grão, de forma irregular ou segundo os planos cristalográficos {111}.

A martitização pode levar à formação de agregados irregulares a arredondados de dimensões variada (até vários mm de diâmetro) constituídos de cristais xenomorfos, porosos, ricos em inclusões e complexamente intercrescidos, substituindo totalmente a magnetita como produto final do processo.

Hematita I - ocorre predominantemente em rochas pouco ou não deformadas, como cristais xenoblásticos a hipidioblásticos, freqüentemente porosos, com inclusões, apresentando bordas lobadas a retas e dimensões de 0.01 a 0,2mmØ. Seu intercrescimento com agregados de kenomagnetita parcialmente martitizados permite caracterizá-la como produto da recristalização a partir desse constituinte (hematita Ib). Quando bem recristalizada, hematita I apresenta baixa porosidade interna com poucas inclusões e constitui uma trama granoblástica poligonal ou mesmo orientada segundo o bandamento, e é denominada hematita Ia, não sendo possível caracterizar claramente sua origem. A eventual presença de relictos de magnetita permite concluir que, pelo menos parte desses cristais são produtos da recristalização da martita.

Hematita II - ocorre como cristais hipidioblásticos a idioblásticos, livres de inclusões (relictos de magnetita são raros), com *habitus* lamelar. Em amostras xistosas aparecem

com plano do pinacóide basal bem desenvolvido, orientado paralela a sub-paralelamente ao plano de foliação, definindo uma anisotropia segundo a forma do grão, quando é denominada de especularita. Sua dimensão é variável de acordo com sua posição regional no QF, aumentando com o grau de metamorfismo. Esta geração de hematita define a foliação regional orientada no plano axial de dobras ou zonas de cisalhamento cortando os óxidos pré-existentes e envolvendo eventualmente agregados de hematita I e magnetita I martitzada. Os cristais de hematita II apresentam-se também alongados, crescendo preferencialmente segundo a direção local de estiramento definindo uma conspícua lineação mineral, podendo apresentar-se em cristais de *habitus* quase acicular

Hematitas III e IV. As hematitas III e IV são produto da recristalização durante fases subseqüentes de deformação, ocorrendo particularmente na borda leste do QF onde o metamorfismo foi mais intenso, orientados ao longo de novos planos de clivagens ou simplesmente crescidos sobre a foliação.

Em planos de falha cortando corpos de minério compactos, ocorrem ainda lâminas de hematita especular, formando placas comumente dobradas e apresentando extinção ondulante e lamelas de geminação.

Magnetitas II e III. Magnetita II ocorre como blastos, cortando a foliação, em regiões metamorfisadas na facies anfíbolito a leste do Q.F., ou em "veios", preenchendo fraturas de extensão. As relações texturais indicam cristalização ao final ou após a última fase de deformação. Os cristais são geralmente hipidioblásticos a idioblásticos em crescimento epitaxial com a hematita e fortemente martitzados (martita II).

Magnetita III representa o óxido de ferro mais "novo" nos itabiritos e corpos de minério rico, tendo se cristalizado na região de contato com diques de rochas básicas, na forma de corpos maciços ou então como cristais individuais, crescidos sobre a trama orientada.

TRAMA E TEXTURA

Os processos geológicos ativos nas formações ferríferas e minérios, associados aos fenômenos construtivos da crosta terrestre deram origem a uma grande variação em sua trama e textura.

Como trama entende-se a microestrutura definida pela distribuição dos grãos em um agregado policristalino enquanto textura é caracterizada pela orientação da estrutura cristalina. Com a finalidade de se definir a trama e anisotropia resultante da forma do grão foram feitas observações ao microscópio ótico em tres seções perpendiculares entre si, de modo a se obter uma estimativa do aspecto tridimensional dos cristais (Rosière et. al.⁽⁶⁾). O microscópio eletrônico de varredura mostrou-se um importante instrumento auxiliar, pois através dele podem-se observar superfícies irregulares de fraturas em fragmentos não polidos e assim se fazer uma avaliação da forma e distribuição dos grãos, complementando as análises em seções planas polidas. A definição de um parâmetro quantitativo para caracterizar a trama microscópica foi feita simplificando-se o contorno dos cristais para elipses e integrando-os para obter-se um

tensor de 2ª ordem sendo seus valores e vetores próprios como característicos da trama.

A textura foi determinada com o auxílio de goniômetros de texturas de raios-x e nêutrons, produzindo-se diagramas em projeção estereográfica. (Rosière et. al. ⁽⁷⁾). Tais características microestruturais refletem-se na anisotropia de suas propriedades magnéticas que dão importantes informações sobre o grau de orientação da hematita e da sua relação com a deformação (Hroudá et. al. ⁽⁸⁾).

A anisotropia de susceptibilidade magnética foi medida com um aparelho Kappabridge 2.1, obtendo-se também um tensor de 2ª ordem que caracteriza o grau de orientação preferencial do minério e fornece, de maneira pelo menos qualitativa, um parâmetro de avaliação sobre grau e tipo de deformação sofrida pela rocha

TRAMA DEFINIDA PELA FORMA DO GRÃO

Pode-se constatar que, a partir do processo de recristalização associado à deformação, desenvolveram-se cinco tipos de trama nos minérios compactos que se refletem na nomenclatura usualmente utilizada pelos mineradores (Rosière et. al. ⁽⁵⁾).

- Trama granoblástica ou granoblástica porosa, (Fig. 1) presente geralmente no minério compacto bandado relativamente poroso, caracterizado pela presença de agregados irregulares de martita, complexamente intercrescidos com hematita xenoblástica a hipidioblástica (hematita I), onde se reconhece internamente a estrutura bandada sedimentar, freqüentemente microdobrada, sem orientação preferencial, quer da forma do grão, quer da estrutura cristalina. Alguma especularita está presente, orientada cortando a estrutura bandada, em posição plano-axial às dobras existentes. Os poros podem ser intergranulares ou intragranulares nos agregados de martita e hematita Ib em virtude da perda de volume inerente ao processo.
- Trama em mosaico, própria do minério compacto maciço, caracterizada pela presença predominante de hematita hipidioblástica a idioblástica, sem orientação preferencial. O aumento da proporção em cristais orientados (especularita) resulta em uma trama lepidogranoblástica a lepidoblastica, que provoca sua fácil fragmentação em placas.
- Trama lepidogranoblástica, característica do minério chamado corriqueiramente minério compacto xistoso, constituída de hematita hipidioblástica a idioblástica, em parte orientada pela presença de cristais de especularita (hematita II) que define uma foliação penetrativa e, freqüentemente, uma lineação mineral. O predomínio da estrutura linear pode resultar em uma textura nematoblástica. A trama parcial de característica granoblástica pode ser da porção relicta não foliada (hematita I) ou originária do crescimento de novos cristais (hematita III) sobre a especularita.

- Trama protomilonítica, que também dá origem a um "minério compacto xistoso", constituída principalmente de especularita envolvendo agregados elipsoidais de martita e/ou hematita I. Essa trama também pode ser denominada de facoidal. Nos minérios protomiloníticos pode predominar uma estruturação planar ou linear, certamente dependendo das condições de deformação relativa da rocha.
- Trama lepidoblástica ou milonítica, característica do minério xistoso, relativamente friável, que se desagrega com facilidade segundo o plano de foliação. É constituída essencialmente de cristais orientados de especularita (hematita II) bastante alongados. (Fig 2)

Minérios apresentando porfiroblastos de magnetita (II e III) sobrecrecidos sobre a matriz aparecem subordinadamente, e por isso podem ser considerados como um tipo de menor importância.

Os minérios de trama lepidogranoblástica apresentam foliação contínua ou clivagem espaçada em domínios. A presença de uma clivagem espaçada bem desenvolvida implica no fácil deslocamento da rocha e, quando desenvolvida em itabiritos, lhe confere a denominação de "chapinha" comumente utilizada pelos mineradores.

Além dos minérios compactos encontram-se os tipos muito friáveis ou pulverulentos, cuja trama das partículas desagregadas é semelhante àquelas encontradas nos tipos compactos, embora no conjunto, os cristais tendam a perder o arranjo adquirido durante a deformação e metamorfismo. Podemos reconhecer mesoscópicamente dois tipos principais de minério, de características físicas bastantes distintas

- Minério friável bandado, caracterizado por apresentar a estrutura bandada parcialmente preservada, desagregando-se em pequenas placas de dimensões centimétricas a decimétricas. Os fragmentos apresentam predominantemente arranjo granoblástico, embora tramas granolepidoblásticas a lepidogranoblásticas também ocorram pela presença de especularita.
- Minério friável granular, caracterizado por não apresentar estruturação macroscopicamente visível. Ocorrem como corpos de diferente espessura intercalados com minérios compactos ou xistosos ou mesmo com itabiritos. Sua trama pode ser granoblástica ou lepidoblástica. Os primeiros apresentam-se desagregados em partículas mais ou menos equigranulares, enquanto que os xistosos desagregam-se em partículas alongadas de especularita, com aspecto de purpurina, provocando intensa reverberação no chão das minas.

Minérios de trama granoblástica porosa desenvolvem-se tipicamente em regiões de baixa magnitude de deformação predominando na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero. O aumento da deformação contribui de maneira preponderante para o aparecimento de cristais orientados de especularita constituindo tramas lepidogranoblásticas até protomiloníticas, lepidoblásticas e nematoblásticas. A recristalização pós-tectônica pode obliterar total ou parcialmente a trama orientada para formar novamente tramas lepidogranoblásticas ou mesmo em mosaico. Minérios

de trama orientada predominam na porção oriental do Quadrilátero Ferrífero (Rosière et al. ⁽⁹⁾).

Para se quantificar numericamente a trama foi feita a análise da forma dos cristais através da relação comprimento vs. largura em tres seções perpendiculares entre si com o estabelecimento de um fator K_{forma} tridimensional, semelhante ao usado por Ramsay⁽¹⁰⁾ para análise de deformação, aqui utilizado de forma semi-quantitativa para caracterizar numericamente o arranjo dos cristais. Como primeiros resultados encontrou-se para tramas lepidoblásticas K_{forma} sempre menor que 1, para granoblásticas/lepidoblásticas, para valores entre 0,6 e 2 e superiores a 2 para tramas nematoblásticas.

TEXTURA DEFINIDA PELA ORIENTAÇÃO PREFERENCIAL CRISTALOGRÁFICA

A textura dos minérios de hematita pode ser definida principalmente através da determinação da orientação dos planos {11.0}, {10.4} e (00.3). Enquanto para os dois primeiros é possível a utilização de raios-X, para o terceiro é necessário utilizar nêutrons através da refração na camada de elétrons dos átomos (textura magnética). Tipos de textura dos planos {10,4} foram modelados por Quade⁽¹¹⁾. Neste trabalho foi feita inicialmente a determinação da textura dos planos {11.0} o que permitiu definir dois tipos principais:

- Distribuição em guirlanda com um máximo proeminente (Fig 3);
- Diagrama com um máximo (Fig. 4).

Essa divisão é arbitrária e representam termos de uma série onde as texturas podem apresentar passagem gradativa entre elas. O diagrama em guirlanda com três máximos, característico de uma orientação perfeita de monocristal, paralela à foliação principal, representa um termo extremo, teóricamente possível para a variação encontrada nos minérios do Quadrilátero Ferrífero. As guirlandas determinadas apresentam, entretanto, sempre um único máximo predominante, geralmente paralelo à lineação mineral e tornam-se difusas desenvolvendo-se então diagramas somente com um único máximo A intensidade deste é variável passando gradativamente a texturas quase totalmente aleatórias na outra extremidade da série.

A análise comparada dos dados petrográficos com a textura, indica um forte controle cristalográfico no arranjo da trama caracterizada pela forma dos grãos. Os cristais neoformados por recristalização durante a deformação crescem preferencialmente ao longo do pinacóide basal, definindo os planos da xistosidade (Rosière et al. ⁽⁶⁾). A variação gradacional entre os diversos tipos de diagramas para amostras de minérios de varias jazidas de diferente estruturação, representa diferentes estágios e características deformacionais predominantes em dominios distintos no Quadrilátero Ferrífero.

Texturas bem desenvolvidas como guirlandas são típicas de minérios bem recristalizados, sem relictos de magnetita I ou martita I, provenientes da parte leste do Quadrilátero Ferrífero, que apresentam um arranjo de grãos lepidoblástico (minérios miloníticos) e lepidogranoblástico, caracterizando tectonitos do tipo S proveniente da

maior intensidade da deformação cisalhante, e do grau de metamorfismo a que foi sujeita a rocha. Esse fato torna-se particularmente claro nas minas de Andrade e Morro Agudo e também no complexo de minas do Sinclinal de Itabira, principalmente na mina de Conceição onde a magnitude da deformação atuante foi, de modo geral, maior que em Cauê e Dois Corregos. Nessa região o metamorfismo atingiu a fácies anfibolito a xisto verde alto (Herz⁽¹²⁾). A mina de Timbopeba pode ser também incluída como exemplo nesse caso. Na mina de Aguas Claras, assim como em outras na parte central ou mesmo na extremidade ocidental do Quadrilátero ocorrem também corpos descontínuos de minérios apresentando guirlandas com mais de um máximo, em zonas de cisalhamento. Minérios protomiloníticos tendem também a apresentar boa orientação cristalográfica podendo se desenvolver guirlandas com um único máximo como em amostras das minas de Aguas Claras e de Retiro das Almas.

A recristalização pós-tectônica que ocorreu em minérios compactos da fácies anfibolito produz um arranjo em mosaico que tende a obliterar o arranjo lepidoblástico do minério resultando em uma trama em mosaico que é na realidade, blastomilonítica, mas não destrói a orientação cristalográfica.

Diagramas com um único máximo proeminente, associado ou não a uma guirlanda ocorrem em amostras com arranjo nematoblástico (minas de Casa de Pedra e Alegria) ou até mesmo em minérios granolepidoblástico (mina do Pires) ou lepidogranoblástico (Mina de Andrade) onde a estruturação é predominantemente linear (tectonitos L) ou resultante de dobramento com foliação plano-axial.

Diagramas de minérios apresentando trama granoblástica caracterizado pela predominância de agregados de martita com hematita I e relictos de magnetita não apresentam aparentemente textura, com diagramas mostrando também um único máximo de baixa intensidade.

CARACTERÍSTICAS DA ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA

Na maioria das amostras a hematita é o mineral que define a susceptibilidade. Os cristais de hematita, como mineral ferromagnético, apresenta uma forte anisotropia, sendo o eixo K_3 muito menor que os outros dois (K_1 e K_2) e coincidente com o eixo cristalográfico $\langle c \rangle$ (Quade e Reinert⁽¹³⁾).

Os valores de $K_{(1,2,3)}$ são medidos em unidades SI, no Sistema Internacional. O valor da susceptibilidade média da hematita na literatura varia entre $2.000 \cdot 10^{-6} \text{SI}$ e $80.000 \cdot 10^{-6} \text{SI}$. Não se sabe bem o motivo dessa forte variação, mas aparentemente cristais alongados de especularita apresentam valores mais altos que cristais isométricos, produto de uma anisotropia de forma.

Os valores de susceptibilidade média das amostras analisadas variam entre $2.329 \cdot 10^{-6} \text{SI}$ (Pico do Itabirito) e $436.689 \cdot 10^{-6} \text{SI}$ (Córrego do Feijão). Os valores médios mostram a predominância de hematita embora o valor apresentado por algumas amostras (valores superiores a $12.000 \cdot 10^{-6}$) indicam a presença de magnetita e/ou maghemita. Foram separados três grupos de amostras quanto ao valor da

susceptibilidade média: Os de susceptibilidade extremamente alta ($K_m > 100.000 \cdot 10^{-6}$), provenientes das minas do Córrego do Meio, Córrego do Feijão, Águas Claras, os de susceptibilidade alta ($100.000 \cdot 10^{-6} > K_m > 12.000 \cdot 10^{-6}$) provenientes das minas do Pires, Retiro das Almas, Fábrica, Fazenda e Andrade) e os de baixa susceptibilidade ($K_m < 12.000 \cdot 10^{-6}$) provenientes das minas de Casa de Pedra, Alegria, Morro Agudo, Andrade, Águas Claras, Tamanduá, Pico do Itabirito, e Itabira. O valor da susceptibilidade está condicionado à presença de magnetita, sendo que os maiores valores correspondem geralmente a minérios menos recristalizados (p. ex. minas do Córrego do Feijão e Mutuca), com exceção daqueles onde ocorrem porfiroblastos sin- a pós tectônicos nas regiões de maior grau metamórfico ou relacionados a metamorfismo de contato (p. ex. na mina de Andrade).

Em nossos trabalhos arbitrou-se pelo fator q (Granar⁽¹⁴⁾), para caracterizar o tipo (ou forma) da anisotropia (oblata, prolata ou triaxial) e o fator ϵ (Nadai⁽¹⁵⁾) para caracterizar a intensidade da ASM. Os valores de q inferiores a 0,4 representam anisotropia oblata, entre 0,4 e 1, triaxial, e superiores a 1, prolatas. O valor de ϵ varia, para as amostras até o momento analisadas, entre os valores 0,08 e 1,5 sendo que as amostras de maior anisotropia são aquelas que apresentam valor médio (K_m) baixo. O elipsóide de ASM dos minérios de alta susceptibilidade média são predominantemente triaxiais com ligeira tendência a prolato ou oblato. As amostras com valores baixos de susceptibilidade médio apresentam na maioria dos casos elipsóides oblatos, ou triaxiais oblatos embora algumas mostrem claramente uma anisotropia prolata (Fig 5).

Há uma tendência bastante nítida das amostras de maior anisotropia ($\epsilon > 1$) apresentarem elipsóide de anisotropia oblato. A medida que os valores de ϵ decresce constata-se uma dispersão nos valores de q , com a maioria dos elipsoides triaxiais e oblatos enquanto alguns apresentam anisotropia prolata mas com valores de ϵ sempre inferiores a 0,5, resultando uma nuvem de pontos cujos contorno externo tem morfologia aproximadamente parabólica.

RELAÇÃO ENTRE A TRAMA MICROESTRUTURAL, TEXTURA E ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA

De modo geral os eixos da anisotropia da susceptibilidade magnética coincide com os eixos da trama definidos a partir dos elementos meso e microestruturais das amostras, mantendo-se a simetria ortorrômbica. Os planos de xistosidade utilizados como referência coincidem geralmente com a foliação magnética, perpendicular ao eixo de susceptibilidade K_3 , sendo o ângulo entre os planos inferior a 20°. A coincidência do plano K_1K_2 com a foliação é mais notável nos elipsóides oblatos, sendo o plano principal do elipsóide e as seções circulares coincidentes.

A lineação nos minérios de trama orientada pode ser subparalela a K_1 ou K_2 fazendo ângulo δ geralmente inferior a 20°, independentemente do formato do elipsóide de ASM. Em amostras de fraca orientação e apresentando K_m elevado, K_1 ou K_2 não coincidem com a lineação presente, e δ varia entre 30° e 70°.

A trama tectônica em escalas micro e mesoscópica no minério de ferro é definida pela orientação e distribuição dos cristais de especularita, sem ou com raros relictos de kenomnetita, o que confere às variedades fortemente deformadas valores baixos de K_m . Exceção se faz no caso de amostras onde o alto valor de K_m é resultado do crescimento sin a pós-tectônico de cristais de magnetita (Andrade) ou em tramas protomiloníticas (Retiro das Almas). As amostras de minério com elipsóide de AMS oblatos e valor de ϵ superior a 0,4 apresentam foliação bem penetrativa constituindo tectonitos S em zonas de cisalhamento associados a cavalgamentos e zonas transpressivas como os encontrados nas minas de Andrade, Morro Agudo, Aguas Claras, Timbopeba e Retiro das Almas. Possuem trama lepidoblástica, $K_{forma} < 1$ (Figs 5, 6 e 7), e textura com distribuição em guirlanda para o plano do prisma {110}, onde aparecem um ou tres máximos. Com o crescimento linear dos cristais de especularita a trama magnética da rocha tende a adquirir um carater triaxial ao mesmo tempo que decresce o valor de ϵ , o que se observa na mina de Andrade (Ramos et. al.⁽¹⁶⁾), chegando a apresentar anisotropia prolata com o desenvolvimento de um arranjo nematoblástico, com $K_{forma} > 1$ (Figs 5, 6 e 7), caracterizando tectonitos dos tipos LS e L, como nos caso das minas de Alegria e Casa de Pedra, onde ocorrem corpos de minério de aspecto fibroso pela estruturação linear proeminente. A guirlanda dos planos {110} tende então a ser substituída por um único máximo de forma alongada e coincidente com a lineação mineral. Minérios com anisotropia prolata possuem tipicamente baixo valor de ϵ , mesmo quando sua textura e trama são bem desenvolvidas. A maior intensidade de ASM medida entre todas as amostras analisadas possuidoras de ASM prolata foi de 0,401 (Alegria) seguida de 0,21 (Casa de Pedra), valores muito inferiores aos máximos encontrado entre os minérios com elipsóides triaxiais (1,1 - Andrade) e oblatos (1,5 - Andrade).

Minérios pouco deformados possuem freqüentemente alto valor de K_m devido ao baixo grau de recristalização. O bandamento é a estrutura planar dominante com lineação mineral fracamente desenvolvida ou inexistente. Comum, entretanto, é a presença de uma lineação de interseção do bandamento com uma xistosidade transversal. A trama microscópica é caracterizada pelo arranjo granoblástico ou mesmo granolepidoblástico dos cristais de hematita e a textura é pouco desenvolvida apresentando os planos do prisma uma concentração em um único máximo, embora de pouco intensidade. Possuem baixa anisotropia de susceptibilidade magnética com elipsoide triaxial (Pico do Itabirito) com tendência a oblato (Pires, Córrego do Feijão, Fazendão, Aguas Claras) ou mesmo prolato (Córrego do Meio, Casa de Pedra, Fábrica).

PARÂMETROS GEOMETALÚRGICOS

Apesar da extensa discussão sobre a influência das características mineralógicas e de trama (no seu sentido mais amplo) nos processos metalúrgicos, o estabelecimento de parâmetros numéricos satisfatórios para as indústrias mineradoras e metalúrgicas ainda encontra-se em fase de pesquisa e desenvolvimento. Entre os primeiros esforços nesse sentido deve-se citar a contribuição de Vieira⁽¹⁷⁾ e Seshadri et. al.⁽¹⁸⁾ com a tentativa de

relacionar o grau de anisotropia de susceptibilidade magnética com o índice de degradação durante a redução para minérios granulados.

Foi demonstrado que, tanto a mineralogia quanto o arranjo dos cristais no minério de ferro são de grande importância na degradação durante redução a baixas temperaturas, crepitação, redutibilidade, grau de metalização e características de amolecimento e fusão. A trama também tem importância na geração de finos durante o tratamento e transporte do minério. Para se obter o controle de tais parâmetros torna-se indispensável um conhecimento da estrutura geológica do depósito, associando-se às microestruturas desenvolvidas de maneira a se obter produtos que atendam as necessidades das usinas reduzindo-se os problemas operacionais.

As características de trama, textura e anisotropia podem ser determinadas com diferentes graus de dificuldade operacional obtendo-se valores numéricos que podem ser utilizados como parâmetros de referência. Sua influência nos processos metalúrgicos e de beneficiamento estão sendo estudadas intensivamente de forma a se definir sua real importância industrial. Um ponto fundamental nessa pesquisa é o estabelecimento de critérios operacionalmente aplicáveis no controle de qualidade durante a lavra com parâmetros que possam ser determinados quantitativamente de forma rápida e barata. Entre as propriedades estudadas a anisotropia de susceptibilidade magnética é a mais fácil e rapidamente determinada, embora a caracterização mineralógica e de trama, apesar de ser mais demorada é de fundamental importância, tornando-se necessária sua operacionalização através da análise de imagens digitalizadas para reduzir o tempo de trabalho na determinação da morfologia e dimensão dos cristais e poros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ROSIÈRE, C.A. Strukturelle und textuelle Untersuchungen in der Eisenerzgerstaette "Pico de Itabira" bei Itabirito/Minas.Gerais, Brasilien, Clausthaler Geowiss. Diss. Clausthal - Zellerfeld., vol. 9, 302p., 1981
- 2 - ROSIÈRE, C.A. A recristalização do minério de ferro da jazida do Pico de Itabirito no Quadrilátero Ferrífero, MG e suas implicações genéticas. Anais do 2º Simp. Geol. MG., Belo Horizonte, 1983, Belo Horizonte, Bol. 3 SBG, p.173-186, 1983
- 3 - ROSIÈRE, C. A. & CHEMALE Jr., F. Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil. In: Pagel, M. E. & Leroy, J. L. (eds.) Source, Transport and Deposition of Metals, Amsterdam, Balkema. p.485 - 488, 1991.
- 4 - KULLERUD, G., DONNAY, G. Omission solid solution in magnetite: Kenotetrahedral magnetite. Z. Kristall. 128, P1 - 17, 1969
- 5 - ROSIÈRE, C.A., CARVALHO DA SILVA Jr., J. Concreções primárias com estrutura concêntrica no itabirito da Formação Cauê Supergrupo Minas, Quadrilátero

- Ferrífero, Minas Gerais. Anais do 33º Congr. Bras. de Geol., Rio de Janeiro, SBG, p.1238-1248, 1984.
- 7 - ROSIÈRE, C.A., SIEMES, H. Estudo da textura dos minérios hematíticos do Quadrilátero Ferrífero com goniômetro de Raios-X Anais do 1º SNET, Salvador, Bol. de Resumos, p.38, 1987.
- 8 - HROUDA, F.; SIEMES, H.; HERRES, N., HENNING-MICHAELI, C. The relationship between magnetic anisotropy and the c-axis fabric in a massive hematite ore. J. Geophys., 56: 174-182, 1985
- 9 - ROSIÈRE, C.A., CHEMALE Jr., F., GUIMARÃES, M.L.V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização, Geonomos, UFMG, Belo Horizonte, MG, 1(1): 65-84, 1993.
- 10 - RAMSAY, J.G. Folding and Fracturing of Rocks, McGraw-Hill, New York, 568 p., 1967.
- 11 - QUADE, H. Natural and simulated (10.4) pole figures of polycrystalline hematite. Textures and Microstructures, 81, p. 719-736, 1988.
- 12 - HERZ, N. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, v. 641-B, 78p., 1978.
- 13 - QUADE, H, REINERT, T. Magnetic anisotropy and texture of banded hematite ores, Materials Science Forum, 157 - 162, p.1681 - 1688, 1994.
- 14 - GRANAR, L. Magnetic measurements on Swedish varved sediments. Arkiv for Geofysik, Stockholm. 3: 1 - 40, 1957.
- 15 - NADAI, A, Theory of flow and fracture of solids, McGraw-Hill, New York, p. 705, 1963.
- 16 - RAMOS, M. C. D., ROSIÈRE, C. A. ERNESTO, M. Características Texturais, Estruturais e de Anisotropia Magnética dos Minérios de Ferro da Mina do Andrade (João Monlevade, MG), Anais do 5º SNET, Gramado, p:154-156, 1995.
- 17 - VIEIRA, C. B. Estudo básico da qualidade intrínseca de minério de ferro para altos fornos. Tese de doutorado EEUFMG, Belo Horizonte, p. 215, 1996.
- 18 - SESHADRI, V., VIEIRA, C. B., COELHO, L. H., ROSIÈRE, C. A. Análise da Influência dos Atributos Mineralógicos e Texturais sobre a Redutibilidade de Granulados de Minérios de Ferro para Altos Fornos., Anais do 51º Congresso Anual de Metalurgia da ABM, Porto Alegre, no prelo.

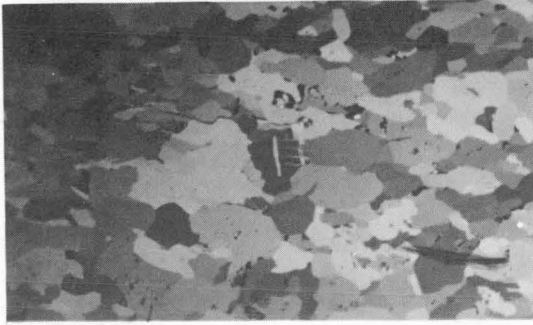


Fig. 1 Fotomicrografia representando trama granoblástica porosa com cristais xenoblásticos a hipidioblásticos de hematita I. Ao centro, cristal geminado. Traço da escala: 100 μ m

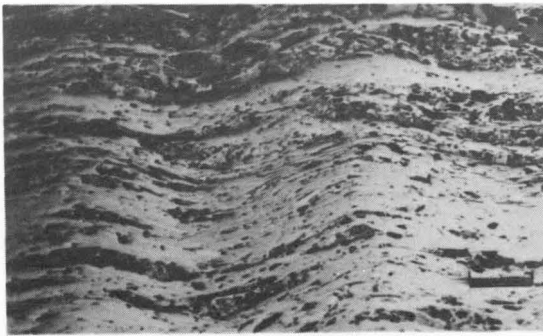


Fig. 2 Fotomicrografia representando textura lepidoblástica com cristais de orientados de especularita. Traço da escala: 100 μ m

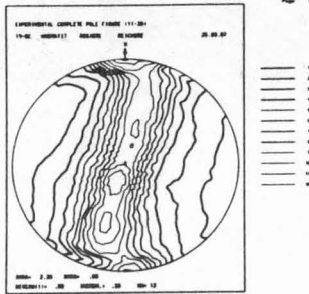


Fig. 3 Estereograma de textura do plano $\{11.0\}$ da hematita com guirlanda paralela ao plano da xistosidade. Característico de minérios com trama lepidoblástica. Seção perpendicular à foliação.

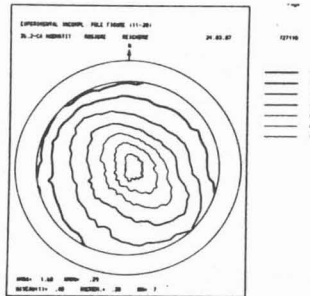


Fig. 4 Estereograma de textura do plano $\{11.0\}$ da hematita com único máximo paralelo à lineação. Característico de minérios com trama granoblástica. Seção perpendicular à foliação e à lineação.

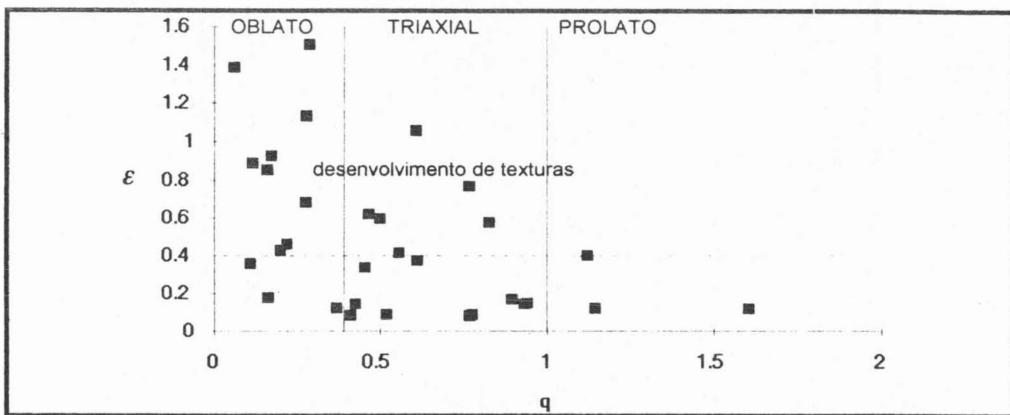


Fig. 5 Gráfico relacionando ϵ , q e o desenvolvimento de texturas. Os maiores valores de anisotropia estão associados a elipsóides oblato. Minérios com texturas bem desenvolvidas possuem $\epsilon > 0,4$.

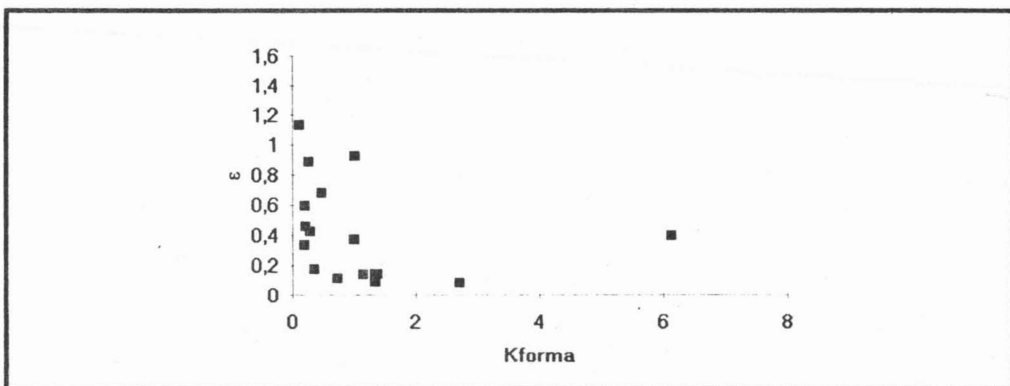


Fig. 6 Gráfico relacionando ϵ e K_{forma} . Os minérios constituídos por cristais placóides apresentam maior anisotropia susceptibilidade magnética.

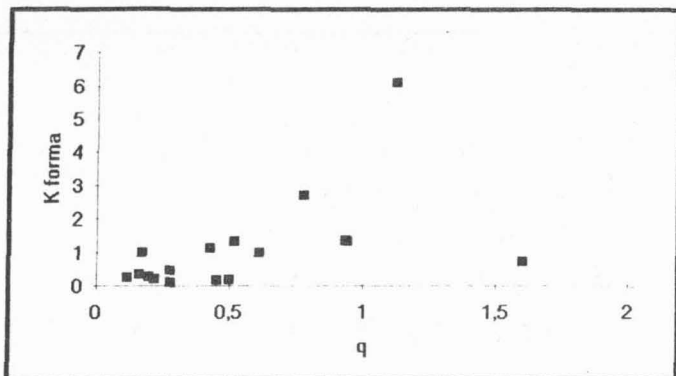


Fig. 7 Gráfico relacionando o fator q com K_{forma} . O tipo de anisotropia esta diretamente relacionado com a forma dos cristais constituintes. Essa relação é clara a partir de valores de q superiores a 0,2.

MINERALOGY, TEXTURES AND ANISOTROPY OF IRON ORES AS GEOMETALLURGICAL PARAMETERS.

ABSTRACT

Iron ores presents a wide variety on the mineralogy, fabric and texture depending on its geologic setting and structure. In the ores of the Iron Quadrangle District, in Minas Gerais, for example, there are recognized several generations of magnetite and hematite developed by recrystallization.

Variations in the intensity and type of deformation suffered by the ore resulted in three main fabrics: granoblastic, lepidoblastic and nematoblastic with different types and degrees of crystallographic preferred orientation (texture) and anisotropy of magnetic susceptibility.

Such properties can be quantified and used as parameters in order to characterize iron ore. Its influence on the industrial processes (dressing and metallurgy) is subject to discussion.

Keywords: Mineralogy, Fabric, Texture, Anisotropy, Geometallurgical Parameters

