

# UM MODELO PARA A EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DOS MINÉRIOS DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. PARTE II - TRAMA, TEXTURA E ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA

C. A. Rosière (\*), H. Quade (\*\*), H. Siemes (\*\*\*),  
F. Chemale Jr. (\*\*\*\*) & E. M. Resende de Souza (\*\*\*\*\*)

## ABSTRACT

Low strain itabirite still displays primary features similar to jaspilites such as sedimentary layering and a porous granoblastic fabric composed of martite with magnetite relics and hematite. Due to synmetamorphic deformation this mineralogy recrystallizes in specularite producing a variety of fabrics, textures and anisotropy of the magnetic susceptibility (AMS) depending mainly on the strain conditions.

Folded ores usually display a foliation parallel to the banding due to flexural slip and an axial plane schistosity that results in a lepidogranoblastic fabric. The stereogram of the {11.0} texture is a single maximum parallel to the intersection lineation. The AMS is low and its ellipsoid is triaxial. Increasing strain and shearing transposes and obliterates the primary banding, resulting in iron ore mylonites with lepidoblastic (S-tectonites) or nematoblastic (L-tectonites) fabrics probably depending on the shape of the strain ellipsoid.

The stereogram of the {11.0} texture of schistose ores is typically a girdle parallel to foliation. AMS intensity is high with oblate shape. Stereograms of the texture of lineated ores display a single maximum parallel to the stretch lineation. AMS is low to moderate with prolate shape. Secondary recrystallization and grain growth does not affect the lattice preferred orientation.

## INTRODUÇÃO

Trabalhos anteriores (Rosière 1981; Rosière & Chemale Jr. 1991 e Rosière et. al. 1993) mostraram, por análise microscópica das amostras de minério de ferro compacto de diversos depósitos analisados no Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969), (Fig.1) uma complexa seqüência de recristalização a partir de cristais de magnetita e hematita de origem pré-metamórfica ou mesmo formadas no início do metamorfismo. Magnetita I é o mineral mais antigo em todas as paragêneses de minério de ferro e aparece sob a forma de kenomagnetita (Kullerud & Donnay, 1969), variedade deficiente em  $F^{2+}$  (até 10%), relictica em agregados martitizados e recristalizados. Magnetita I está presente principalmente em domínios pouco deformados, onde a trama primária sedimentar/diagenética pode ser ainda reconhecida. Hematita I ocorre também predominantemente em rochas pouco ou não deformadas, podendo ser produto de recristalização metamórfica a partir da martita (hematita Ib) ou a partir de óxidos ou hidróxidos férricos "primários" (hematita Ia) onde as condições de oxidação inibiram a cristalização da magnetita I. Esses minerais, por recristalização, dão origem a cristais idioblásticos a hipidioblásticos, denominados de hematita II, III, IV, etc. (Rosière 1981; Rosière & Chemale Jr. 1991),

dependendo da sua seqüência relativa de formação. Essas gerações ocorrem normalmente na variedade especularita, com brilho metálico intenso, sob a forma de cristais tabulares, com plano basal bem desenvolvido, orientados no plano de foliação. Enquanto minérios pouco recristalizados apresentam um aspecto fosco, minérios bem recristalizados são brilhantes, especialmente quando desagregados.

Os cristais de especularita apresentam-se geralmente alongados, crescendo preferencialmente segundo a direção local de estiramento, constituindo uma conspícua lineação mineral. Aparentemente dois fatores são preponderantes para seu desenvolvimento: magnitude da deformação e temperatura, embora a fugacidade de oxigênio deva ter também grande importância no processo, mas que não pode ser determinada no presente trabalho. O efeito da tectônica é claro quando se observa corpos de minério em áreas de baixa deformação (p. ex. mina do Pico), mas cortados por zonas de cisalhamento discretas, onde ocorre o desenvolvimento de cristais bem orientados de especularita definindo a foliação. O efeito da temperatura é notável ao se comparar a textura de minérios da extremidade oriental do Quadrilátero Ferrífero (p. ex. minas do Andrade, Morro Agudo, Conceição e Cauê), onde as condições de

(\*) CPMT/IGC/UFMG

(\*\*) Geol. Inst. - T. U. Clausthal

(\*\*\*) IML - RWTH Aachen

(\*\*\*\*) UFRGS

(\*\*\*\*\* ) Bolsista BIC - CPMT/IGC/UFMG



Figura 1: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com principais estruturas e localização dos depósitos analisados. Depósito amostrados: AG - Alegria, CN - Capanema, TB - Timbopeba, FZ - Fazenda, OF - Ouro Fino, FB - Fábrica, RA - Retiro das Almas, PR - Pires, CP - Casa de Pedra, PI - Pico do Itabirito, TA - Tamanduá, MT - Mutuca, AC - Aguas Claras, CM - Córrego do Meio, CF - Córrego do Feijão, BA - Baiú, BR - Brucutu, AN - Andrade, MA - Morro Agudo, CA - Cauê, CO - Conceição.

Figure 1: Geological map of the Quadrilátero Ferrífero with main structural features and studied deposits. Sampled deposits: see above.

metamorfismo atingiram o fácies anfibolito com a extremidade ocidental (Córrego do Feijão, Pico do Itabirito, etc.) onde predomina o fácies xisto-verde (Herz 1978), (Fig. 1).

### TRAMA E TEXTURA DO MINÉRIO DE FERRO

Como trama entende-se a microestrutura definida pela distribuição dos grãos em um agregado policristalino, enquanto textura é caracterizada pela distribuição da estrutura cristalina (orientação preferencial cristalográfica) dos seus componentes. Para o minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero foi feita uma análise comparada entre a trama definida pela distribuição e forma dos grãos, a textura parcial definida pela orientação preferencial cristalográfica dos planos do prisma  $\{11.0\}$ , e a anisotropia de susceptibilidade magnética.

Com a finalidade de se definir a trama e anisotropia resultante da forma do grão foram feitas observações ao microscópio em três seções perpendiculares entre si, de modo a se obter uma estimativa do aspecto tridimensional dos cristais. 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 utilizadas no microscópio ótico. A definição de um parâmetro quantitativo para caracterizar a trama microscópica e a anisotropia resultante da distribuição e forma dos cristais de hematita no minério de ferro, foi possível através da aplicação de métodos de análise de deformação (*strain*), obtendo-se assim um tensor de 2ª ordem e seus valores e vetores próprios como característicos da forma do grão.

A textura foi determinada com o auxílio do goniômetro de texturas de raios-X, em duas ou três seções perpendiculares entre si, produzindo-se diagramas completos pela superposição dos diagramas individualmente medidos em cada uma das faces da amostra.

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 - TIPOS E POSICIONAMENTO ESTRUTURAL

A trama do minério do Quadrilátero Ferrífero é variável de acordo com a magnitude de deformação sofrida pelas rochas do Supergrupo Minas, característica dos diferentes domínios estruturais da

região (Chemale Jr. et al. 1994). Em áreas de baixa magnitude de deformação predominam estruturas associadas a dobramento, de forma que, para orientação da trama assim como da textura, foram utilizados eixos a, b e c conforme definidos por Sander (1930), enquanto que em áreas fortemente deformadas, foram adotados os eixos de deformação X, Y e Z (Ramsay 1967) estimados a partir da lineação de estiramento presente no plano de foliação. 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:

Trama granoblástica ou granoblástica porosa, presente geralmente no minério compacto bandado com estruturas sedimentares relicticas. Esta trama é caracterizada pela presença de agregados irregulares de martita, complexamente intercrescidos com hematita xenoblástica a hipidioblástica ou mesmo idioblástica, sem orientação preferencial, quer da forma do grão, quer da estrutura cristalina (Fig. 2a). Alguma especularita está presente, cortando a estrutura bandada. O aspecto poroso desse minério se deve ao grande número de inclusões diminutas nos agregados de martita em virtude da perda de volume inerente ao processo de martitização.

Trama em mosaico, própria do minério compacto maciço, caracterizado pela presença predominante de hematita hipidioblástica a idioblástica, de bordos predominantemente retos (Fig. 4b, c). É característica de minérios que sofreram recristalização pós-tectônica.

Trama lepidogranoblástica a granolepidoblástica, característica do minério corriqueiramente chamado de compacto xistoso, constituída por cristais de especularita entre agregados granoblásticos ou em mosaico (Fig. 2b), que definem uma foliação, contínua ou espaçada e, freqüentemente, uma lineação mineral. A presença de uma clivagem espaçada bem desenvolvida implica no fácil deslocamento da rocha e, em itabiritos, lhes confere a denominação de “chapinha”.

Trama protomilonítica, que também dá origem mesoscópicamente a um minério compacto xistoso. Essa trama é constituída principalmente de especularita envolvendo “porfiroclastos” constituídos de agregados granoblásticos de forma aproximadamente elipsoidal de martita e/ou hematita (Fig. 2c, d), o que resulta em uma foliação de morfologia anastomosada. Essa trama também é denominada de facoidal. Nos minérios protomiloníticos pode predominar uma estruturação planar ou linear, dependendo das condições de deformação da rocha.

Trama lepidoblástica ou milonítica, característica do minério xistoso em zonas de cisalhamento, relativamente friável em superfície. É constituída essencialmente de cristais orientados de especularita bastante alongados que definem uma lineação mineral (Fig. 3a, b). Minérios lepidoblásticos podem apresentar uma clivagem de crenulação superposta em cujos

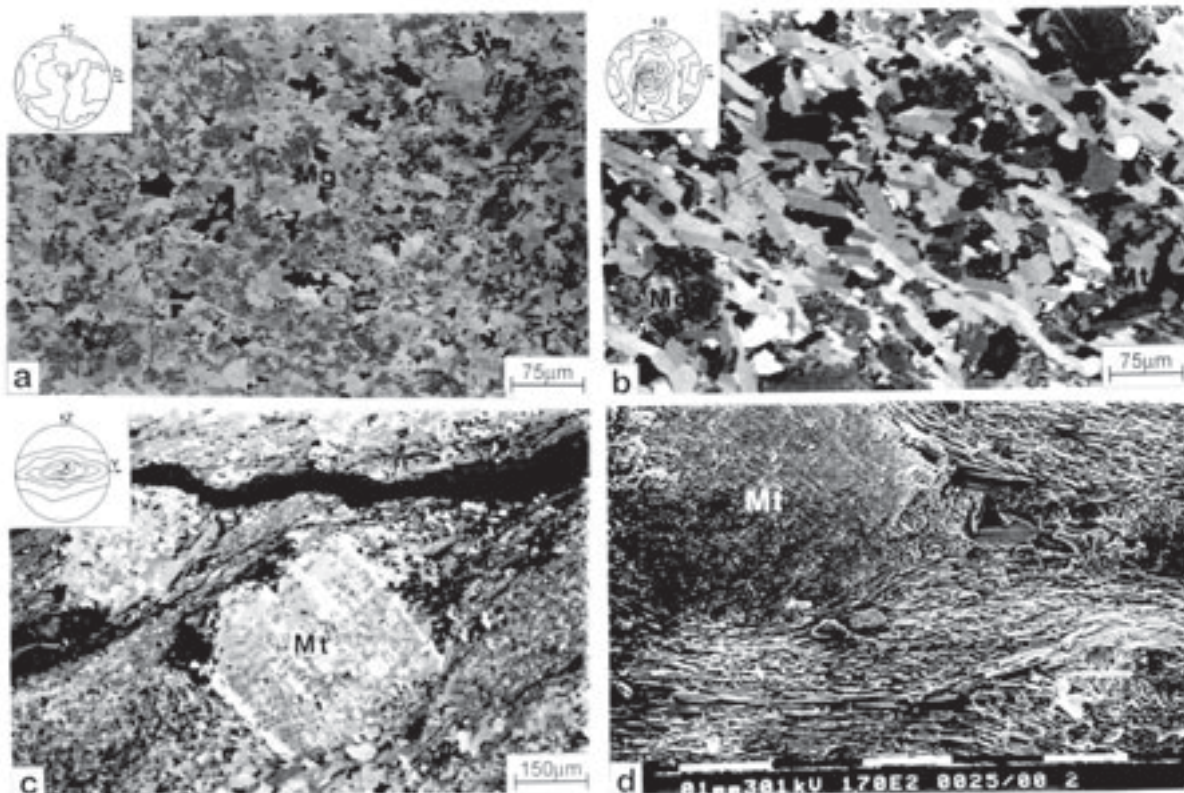


Figura 2: Fotomicrografias de tipos de trama encontrados nos depósitos amostrados. No detalhe estão representados diagramas de textura  $\{11.0\}$  da amostra. Mg - Magnetita, Mt - Martita. a) Trama granoblástica porosa, constituída essencialmente de martita com inúmeros relictos de magnetita. Amostra TF16, Seção AC, Mina Córrego do Feijão. b) Trama granolepidoblástica caracterizada por cristais orientados de especularita que definem foliação inclinada ao bandamento. Os cristais de especularita envolvem agregados de magnetita, parcialmente martitizada e hematita. Amostra TF1, Seção AC, Mina do Pires. c) Trama facoidal, protomilonítica com porfiroclastos de martita envolvidos por especularita. Amostra TF2, Seção XZ, Mina Retiro das Almas. d) Como anterior. Na sombra de pressão estão cristais de especularita. Imagem de MEV, Mina Retiro das Almas.

Figure 2: Photomicrographs of fabric types found at the sampled deposits. Insets depict  $\{11.0\}$  texture diagrams of the samples. Mg - Magnetite, Mt - Martite. a) Porous granoblastic fabric of martite with a great number of magnetite relics. Sample TF16, AC-section, Córrego do Feijão Mine. b) Granolepidoblastic fabric of oriented specularite crystals that define the foliation inclined to the banding surface. Specularite crystals partially involve martitized magnetite and granoblastic hematite. Sample TF1, AC-section, Pires Mine. c) Facoidal fabric (protomylonitic) with martite porphyroclasts surrounded by specularite. Sample TF2, XZ-section, Retiro das Almas mine. d) As in (c) In the pressure shadows grow specularite crystals. Sample TF2, SEM image, Retiro das Almas mine.

planos crescem eventualmente novos cristais de especularita (Fig. 3d). Localmente desenvolvem-se tramas nematoblásticas pela distribuição linear dos cristais de especularita (Fig. 3c).

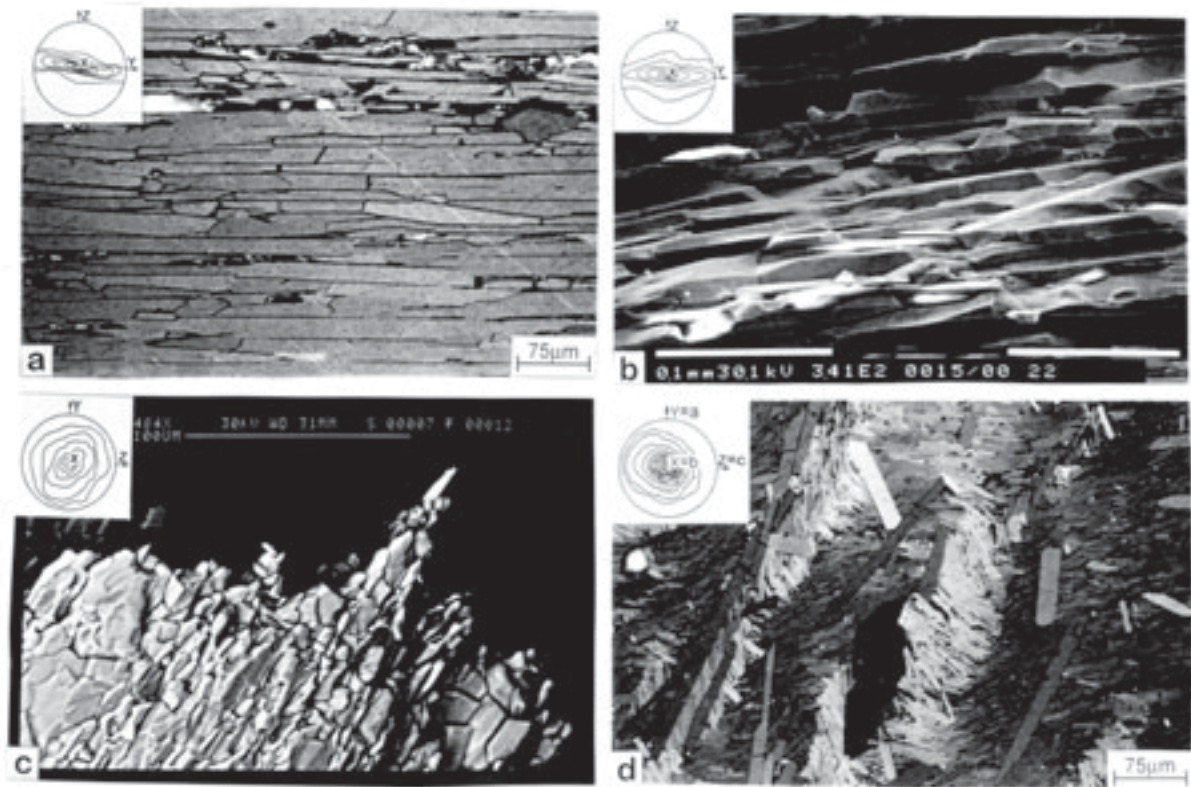
Alguns minérios apresentam porfiroblastos de magnetita sobrecrecidos sobre a matriz (Fig. 4a). Ocorrem freqüentemente em áreas de metamorfismo do fácies anfibolito ou próximos a corpos intrusivos, podendo ser classificados como um tipo de menor importância pela sua ocorrência restrita

Além dos minérios compactos encontram-se os tipos muito friáveis ou pulverulentos, cuja trama original das partículas desagregadas é semelhante àquelas encontradas nos tipos compactos, embora os cristais tendam a perder o arranjo adquirido durante a deformação e metamorfismo. Podemos reconhecer mesoscópicamente dois tipos principais de minério, cujas características físicas são bastante distintas

Minério friável bandado, caracterizado por apresentar a estruturação sedimentar ainda reconhecível, desagregando-se em pequenas placas de dimensões centimétricas a decimétricas. Os fragmentos apresentam predominantemente arranjo granoblástico, ou, na presença de uma xistosidade, tramas granolepidoblásticas a lepidogranoblásticas pela presença de especularita descontinuamente distribuída.

Minério friável granular, caracterizado por não apresentar estruturação mesoscópicamente visível. Ocorrem como corpos de diferente espessura intercalados com minérios compactos ou xistosos ou mesmo com itabiritos. Sua trama pode ser granoblástica/ em mosaico ou lepidoblástica, com o predomínio de especularita como constituinte mineralógico.

Minérios de trama granoblástica porosa estão presentes tipicamente em regiões de baixa magnitude de deformação e temperatura (xisto-verde baixo) na



*Figura 3: Fotomicrografias de tipos de trama encontrados nos depósitos amostrados. No detalhe estão representados diagramas de textura  $\{11.0\}$  da amostra a) Trama lepidoblástica, milonítica, constituída por especularita. Amostra TF22, Seção XZ, Mina do Andrade. b) Como anterior. O plano basal dos cristais definem a foliação. Imagem de MEV, Mina do Andrade. c) Trama nematoblástica com cristais de especularita com arranjo linear paralelo à direção de estiramento. Amostra TF7, Imagem de MEV. Mina de Casa de Pedra. d) Crenulações em trama lepidoblástica. No plano de clivagem desenvolvem-se novos cristais em posição plano-axial às micro-dobras. Amostra TF 12, Seção AC/YZ, Mina de Alegria.*

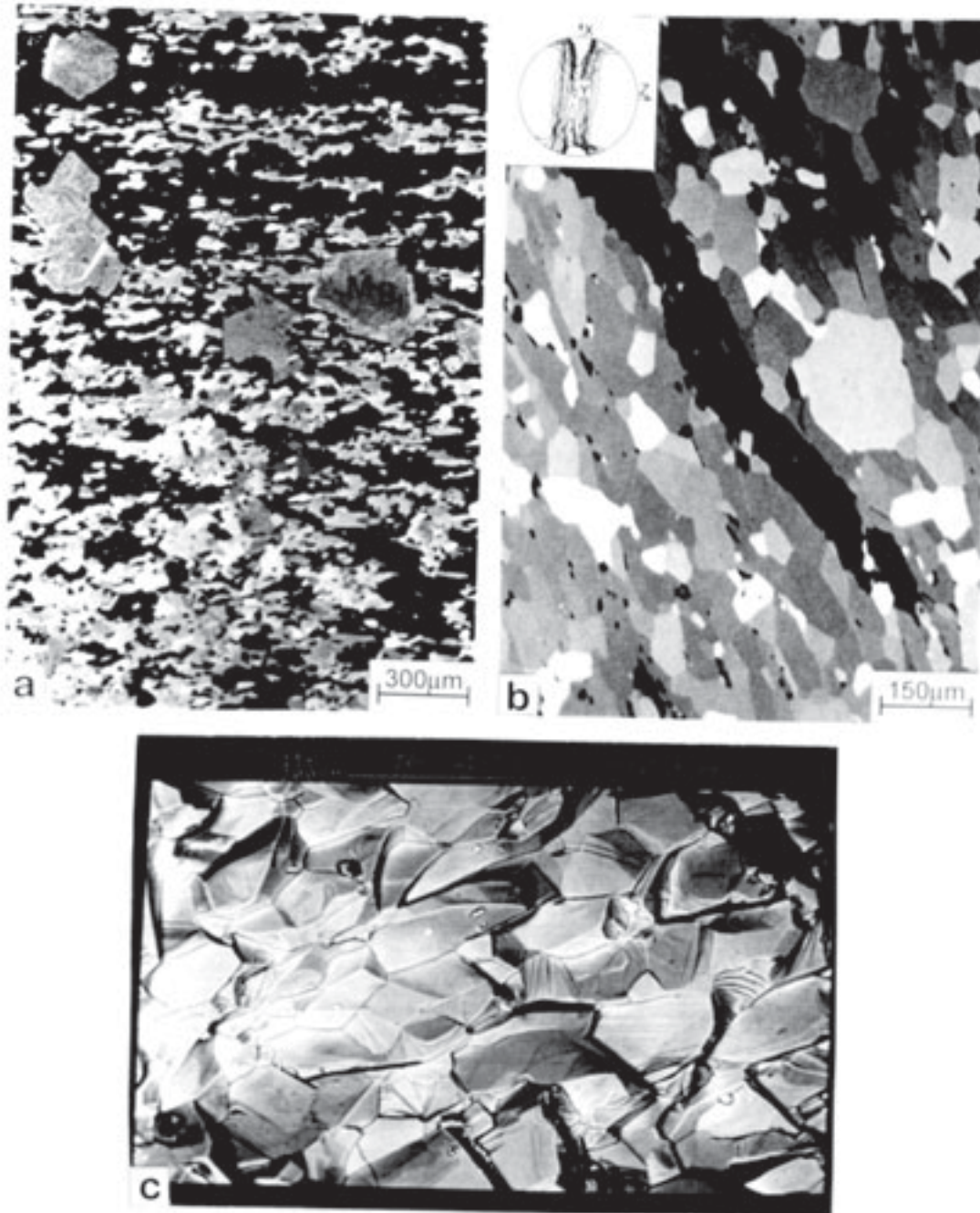
*Figure 3: Photomicrographs of fabric types found at the sampled deposits. Insets depict  $\{11.0\}$  texture diagrams of the sample. a) Lepidoblastic, mylonitic fabric of specularite Sample TF22, XZ-section, Andrade Mine. b) As in (a). The basal plane of the crystals define the foliation. Sample TF22, SEM image. c) Nematoblastic fabric with linear arrangement of specularite parallel to the stretching lineation. Sample TF7, SEM image, Casa de Pedra mine. d) Crenulated lepidoblastic fabric. Growth of new crystals along the axial plane cleavage of the microfolds. Sample TF12, AC/YZ section, Alegria mine.*

porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, como nas minas do Córrego do Feijão e Mutuca (Fig. 1) (Chemale Jr. et al. 1994), apresentando cristais de bordas irregulares, de contornos lobados, indicando uma recristalização incompleta.

A deformação influencia de maneira preponderante o aparecimento de cristais orientados de especularita, gerando tramas granolepidoblásticas, protomiloníticas ou lepidoblásticas/miloníticas. As primeiras ocorrem nas bordas das zonas de cisalhamento ou em áreas fortemente dobradas, caracterizando uma foliação plano-axial, enquanto as outras são típicas de zonas de cisalhamento, em diferentes escalas. O aumento do grau de metamorfismo contribui para um aumento generalizado no tamanho dos cristais resultando em minérios mais grosseiros e para promover a recristalização pós-tectônica que resulta na trama em mosaico, blastomilonítica, obliterando total ou parcialmente a trama orientada. A influência do

metamorfismo e da deformação nas características da trama é clara ao comparar-se os minérios das partes leste e central do Quadrilátero Ferrífero. Na Mina de Águas Claras, assim como em outras localizadas na faixa central ou mesmo na zona oeste do Quadrilátero (Pico, Tamanduá, Fábrica, Casa de Pedra entre outros.) ocorrem corpos descontínuos de minério xistoso, de trama lepidoblástica e protomilonítica, fortemente deformados em zonas de cisalhamento, entre corpos compactos, bandados, de trama granoblástica. Nas Minas de Andrade, Morro Agudo e no complexo de Itabira o metamorfismo chega à facies anfibolito e xisto verde alto (Herz, 1978) e predominam corpos de minério xistoso, de trama lepidoblástica, caracterizados como tectonitos do tipo S.

Minérios de trama nematoblástica têm ocorrência restrita. Foram encontrados nas minas de Alegria e Casa de Pedra em corpos lineares, de aspecto fibroso, e são caracterizados como tectonitos do tipo L.



*Figura 4: Fotomicrografias de tramas resultantes da recristalização pós-tectônica. No detalhe estão representados diagramas de textura {11.0} da amostra. Mg - Magnetita. a) Blastos de magnetita crescidos sobre trama lepidoblástica caracterizada por cristais de especularita. Amostra TF35, Seção XZ, Mina do Cauê. b) Cristais granoblásticos de hematita crescidos sobre especularita. A recristalização pós-tectônica não altera a textura do minério. Amostra TF25, Seção XZ, Mina do Andrade. c) Trama em mosaico constituída por cristais poliedrais de hematita que, em seção, vão constituir um arranjo poligonal. Amostra TF25, Imagem de MEV. Mina do Andrade.*

*Figure 4: Photomicrographs of posttectonic recrystallization fabrics. Insets depict {11.0} texture diagrams of the sample. Mg - Magnetite. a) Magnetite blasts grown over lepidoblastic specularite fabric. Sample TF35, XZ section, Cauê Mine. b) Granoblastic hematite crystals grown over specularite. The posttectonic recrystallization does not obliterate the crystallographic texture. Sample TF25, XZ section, Andrade mine. c) Mosaic fabric of polyhedral hematite. In section they build a granoblastic, polygonal fabric. Sample TF25, SEM image, Andrade mine.*

A análise da forma dos grãos através da relação comprimento vs. largura em três seções perpendiculares entre si permite o estabelecimento de um fator  $K_{\text{forma}}$ , calculado da mesma forma que o parâmetro  $K$  de Flinn (1956, 1962) ou Ramsay (1967) para a análise de deformação, aqui utilizado de forma semi-quantitativa para caracterizar numericamente o arranjo dos cristais. Para tramas lepidoblásticas  $K_{\text{forma}}$  é sempre menor que 1, aumentando, para valores entre 0,6 e 2 ou superior para tramas granoblásticas/granolepidoblásticas e nematoblásticas respectivamente.

### TEXTURA DEFINIDA PELA ORIENTAÇÃO PREFERENCIAL CRISTALOGRÁFICA

O estudo da orientação preferencial cristalográfica dos planos do prisma  $\{11.0\}$  resultou na definição de dois tipos principais de diagrama em projeção estereográfica:

Diagrama com um máximo (Fig. 6b, e).

Distribuição em guirlanda (Fig. 6c, d);

Essas texturas desenvolveram-se a partir da deformação de minérios com estrutura bandada, de trama granoblástica porosa que apresentam diagramas caracterizados por uma distribuição aleatória ou mesmo por um único máximo de baixa intensidade como na mina de Córrego do Feijão (Fig. 2a e 6a).

Diagramas com um único máximo proeminente, são característicos de tramas onde somente uma das faces do prisma encontra-se orientada, como ocorre em minérios com estruturação linear (tectonitos L) e trama nematoblástica (minas de Casa de Pedra e Alegria) (Fig 3c) ou em minérios granolepidoblásticos com cristais orientados paralelamente ao bandamento dobrado e à foliação plano-axial (Fig. 2b - mina do Pires e 6b - mina de Águas Claras).

Uma textura de monocristal perfeita é caracterizada por uma guirlanda com três máximos e representa um caso extremo teoricamente possível (Fig. 5). As guirlandas determinadas em minérios do Quadrilátero Ferrífero são paralelas à foliação principal, e apresentam um ou mais máximos, sendo um sempre paralelo à lineação mineral. Crenulações tardias (Chemale Jr. et al., 1994) alteram a textura em guirlanda pelo microdobramento da xistosidade e pelo crescimento de especularita nos planos da clivagem de crenulação. A deformação e o crescimento dos cristais em nova orientação provocam a dispersão dos picos de reflexão dos raios-X, desenvolvendo-se então diagramas com um único máximo de intensidade variável (Fig. 6e). O paralelismo do eixo da crenulação com a orientação dos cristais alongados de especularita (Rosière 1981; Chemale Jr. et al. 1994) resultam na manutenção do paralelismo do máximo com a lineação mineral.

Texturas bem desenvolvidas como guirlandas são típicas de minérios miloníticos, recristalizados em especularita, quase sem relictos de magnetita I ou martita I. Esses minérios apresentam um arranjo de grãos lepidoblástico (minérios miloníticos) a lepidogranoblástico, (Fig. 3a, b, 6c, d). Minérios



Figura 5: Estereograma teórico de representação da orientação dos planos do prisma  $\{11.0\}$  em seção perpendicular à foliação. O pequeno círculo concêntrico ao principal representa o limite de perda de intensidade de reflexos durante as medidas com goniômetro de raios-X.

Figure 5: Theoretical pole figure representing an ideal distribution of  $\{11.0\}$  prisma planes in section perpendicular to the foliation. The small circle concentric to the primitive circle represents the limit of intensity loss of reflection during measurements with x-ray goniometer.

protomiloníticos tendem, da mesma forma, a apresentar alto grau de orientação cristalográfica como em amostras da mina de Retiro das Almas (Figs 2c, d).

A recristalização pós-tectônica que ocorreu em minérios compactos da fácies anfibolito não destrói a orientação cristalográfica (Fig. 4b e c).

A análise comparada dos dados petrográficos com a textura obtida a partir do goniômetro de raios-x, indicam um forte controle cristalográfico no arranjo da trama caracterizada pela forma dos grãos. A análise da trama mostra que, durante a deformação, os cristais neoformados se desenvolvem por crescimento do pinacóide basal  $\{00.1\}$ , definindo os planos da xistosidade (Rosière et al. 1993). 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 domínios distintos no Quadrilátero Ferrífero.

### CARACTERÍSTICAS DA ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ASM)

Na maioria das amostras a hematita é o mineral que define a susceptibilidade. Os cristais de hematita, como mineral ferromagnético apresentam 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  $\langle c \rangle$  (Fig. 7), (Quade & Reinert 1994).

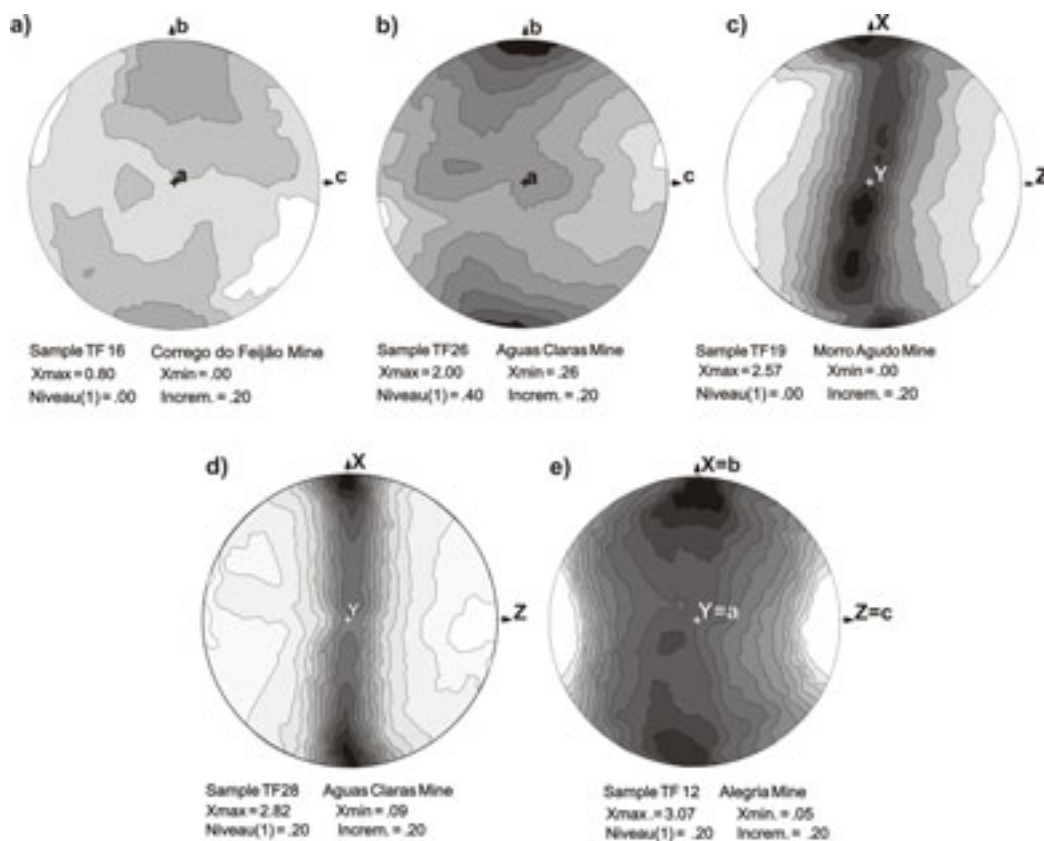


Figura 6: Estereogramas representativos dos tipos de textura dos planos  $\{11.0\}$  da hematita de amostras de minério de diferentes depósitos do Quadrilátero Ferrífero. Os diagramas representam a seção  $ab$  ou  $XZ$ , perpendicular à foliação/bandamento e paralela à lineação ( $b/X$ ). Estão representados também os valores característicos para cada diagrama:  $X_{max}$ : máxima intensidade medida;  $X_{min}$ : menor intensidade medida; Niveau (1): intensidade da isolinha de menor valor;  $Inc_{rem}$ : diferença de valor entre isolinhas. Há um aumento progressivo no valor das intensidade máximas de a) a e) em função do aumento da proporção de especularitas orientadas na foliação. a) Diagrama de textura sem orientação preferencial, de minério martítico, de trama granoblástica porosa. Amostra TF16, Mina do Córrego do Feijão. b) Orientação cristalográfica preferencial dos planos  $\{11.0\}$  definida por um único máximo orientado paralelamente à lineação em trama lepidogranoblástica. Amostra TF26, Mina de Águas Claras. c) e d) Texturas em guirlanda de minérios lepidoblásticos. Amostra TF19, Mina de Morro Agudo e TF28, Mina de Aguas Claras. e) Diagrama de textura com guirlanda difusa com único máximo amplo em minério xistoso, lepidoblástico, crenulado. Amostra TF12, Mina de Alegria.

Figure 6: Representative pole figures of the  $\{11.0\}$  texture of hematite from samples of different deposits of the Quadrilátero Ferrífero. Depicted in the figure are the section  $bc$  or  $XZ$ , perpendicular to the foliation or banding and parallel to the lineation ( $b/X$ ) and the main characteristic parameters of each diagram:  $X_{max}$ : highest measured reflection intensity,  $X_{min}$ : lowest measured reflection intensity, Niveau (1): intensity of the lowest contour,  $Inc_{rem}$ : contour interval. There is a progressive increase of the maximal intensity values from a) to e) due to increasing proportion of specularite oriented along the foliation. a) almost random texture diagram of martitic ore with porous granoblastic fabric. Sample TF16, Córrego do Feijão mine. b) Preferential crystallographic orientation of  $\{11.0\}$  planes defined by single maximum texture parallel to the lineation from lepidogranoblastic fabric. Sample TF26, Águas Claras mine. c) and d) Girdle texture (monocrystal texture) from lepidoblastic fabric. Sample TF19, Morro Agudo mine and TF28, Aguas Claras mine. e) Broad girdle with wide maximum parallel to the lineation in crenulated lepidoblastic fabric. Sample TF12, Alegria mine.



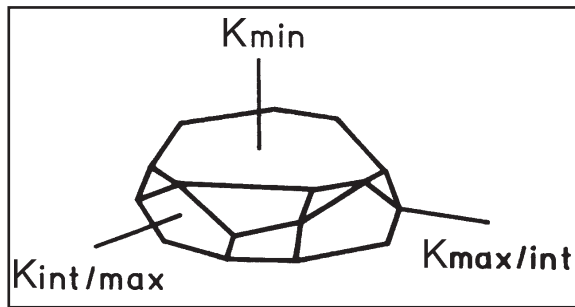


Figura 7: Representação esquemática de um cristal de hematita com a posição de seus eixos de anisotropia de susceptibilidade magnética  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ . Os dois primeiros são paralelos ao plano basal e são intercambiáveis.  $K_3$  coincide com o eixo cristalográfico "c".

Figure 7: Schematic representation of a hematite crystal with anisotropy of magnetic susceptibility axis  $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$ .  $K_1$  and  $K_2$  are interchangeable and parallel to the basal plane.  $K_3$  coincides with the crystallographic "c"-axis.

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

Os valores de susceptibilidade média ( $K_m = (K_1 + K_2 + K_3)/3$ ) das amostras analisadas variam entre  $2.329 \cdot 10^{-6}$  SI (Pico do Itabirito) e  $436.689 \cdot 10^{-6}$  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, Fazendão 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 claramente 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 desse mineral, nas regiões de maior grau metamórfico ou em zonas de metamorfismo de contato (p. ex. na mina de Andrade).

Em nossos trabalhos arbitrou-se pelo fator  $q$  (Granar 1957), para caracterizar o tipo (ou forma) da anisotropia (oblata, prolata ou triaxial) e o fator  $\epsilon$  (Nadai 1963) para caracterizar a intensidade da ASM. Estes parâmetros foram correlacionados através de um

gráfico cartesiano representado na figura 8, onde três campos principais estão definidos: valores de  $0 < q < 0,4$  definem o campo de elipsóides oblatos,  $0,4 < q < 1,0$ , o campo de elipsóides triaxiais e  $q > 1,0$ , o campo de elipsóides prolatos.

O valor da grau de anisotropia segundo o parâmetro  $\epsilon$  é definido pela relação:

$$\epsilon = \sqrt{3}/2 * \gamma$$

$$\gamma = 2 / 3 \sqrt{(\ln L)^2 + (\ln F)^2 + (\ln P)^2}$$

$L = k_1/k_2$  - lineação magnética (Balsley & Buddington, 1960)

$F = k_2/k_3$  - foliação magnética (Stacey et. al. 1960)

$P = k_1/k_3$  - grau de anisotropia (Nagata, 1961)

e varia entre os valores 0,08 e 1,5 sendo que as amostras de maior anisotropia são aquelas que apresentam valor médio ( $K_m$ ) baixo ( $< 12.000 \cdot 10^{-6}$  SI).

O parâmetro  $q$  é dado pela relação

$$q = (k_1 + k_2)/2 - k_3$$

onde

$$k_1 = K_1/K_m$$

$$k_2 = K_2/K_m$$

$$k_3 = K_3/K_m$$

Há uma tendência bastante nítida das amostras de maior grau de anisotropia ( $> 1$ ) apresentarem elipsóide de anisotropia oblato. O gráfico representando a relação entre os parâmetros  $q$  e  $\epsilon$  para as amostras estudadas mostra uma nuvem de pontos cujos contorno externo tem morfologia aproximadamente parabólica. O decréscimo nos valores de  $\epsilon$  é acompanhado pela diminuição no parâmetro  $q$  indicando anisotropia triaxial. Amostras com anisotropia prolata mostram valores de  $\epsilon$  sempre inferiores a 0,5. (Fig. 8).

A análise da relação da ASM com a susceptibilidade média mostra que amostras com baixos valores de  $K_m$  apresentam anisotropia oblata ou prolata. Minérios com susceptibilidade média alta ou extremamente alta apresentam predominantemente elipsóides triaxiais.

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

O grau de coincidência dos eixos da anisotropia da susceptibilidade magnética com os eixos da trama definidos a partir dos elementos meso- e microestruturais das amostras depende da magnitude da deformação. Os planos de xistosidade utilizados como referência coincidem geralmente com a foliação magnética (plano  $K_1K_2$ ), sendo o ângulo entre os planos inferior a  $20^\circ$ . Esta relação é particularmente verdadeira nos casos em que o elipsóide é oblato, onde o plano principal e as seções circulares são coincidentes.

A lineação nos minérios de trama orientada (lepidoblástica a lepidogranoblástica ou nematoblástica) pode ser sub-paralela a  $K_1$  ou  $K_2$  fazendo com esses eixos ângulo geralmente inferior a  $20^\circ$ , independentemente do formato do elipsóide de ASM (Fig. 11).

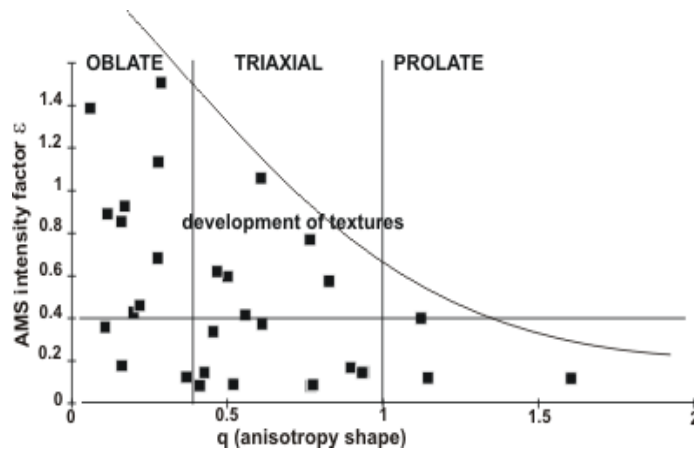


Figura 8: Diagramas de correlação entre a intensidade e a forma de anisotropia de susceptibilidade magnética. Na ordenada estão os valores correspondentes ao parâmetro  $\epsilon$  que define os campos oblato, triaxial e prolato. Na abcissa estão os valores correspondentes ao parâmetro  $q$  que define a intensidade da ASM (ver o texto para maiores explicações). Para valores de  $\epsilon > 0.4$  são desenvolvidas nitidamente texturas.

Figure 8: Plot of relationship between intensity of anisotropy of magnetic susceptibility represented by the parameter  $\epsilon$  and its shape represented by parameter  $q$  (see text for further explanation). For values of  $\epsilon > 0.4$  textures are well developed.

Em amostras de fraca orientação (granolepidoblástica ou granoblástica porosa),  $K_1$  ou  $K_2$  não coincidem com a lineação presente, e varia entre  $30^\circ$  e  $70^\circ$  (Fig. 10).

Minérios com trama orientada - A trama tectônica em escalas micro e mesoscópica no minério de ferro é definida pela orientação e distribuição dos cristais de especularita, o que confere às variedades fortemente deformadas e recristalizadas valores baixos de  $K_m$ . Exceção se faz no caso de amostras que apresentam crescimento sin a pós-tectônico de cristais de magnetita (Andrade) ou em tramas protomiloníticas (Retiro das

Almas). As amostras de minério com elipsóide de ASM oblato e valor de  $\epsilon$  superior a 0,4 (Fig. 8) apresentam foliação contínua, penetrativa (tectonitos S). Possuem trama lepidoblástica,  $K_{forma} < 1$  (Fig. 9a, b) e textura com distribuição em guirlanda para o plano do prisma  $\{11.0\}$ . Com o crescimento linear dos cristais de especularita a trama magnética da rocha tende a adquirir um caráter triaxial ao mesmo tempo que decresce o valor de  $\epsilon$ , o que se observa na mina de Andrade (Ramos et. al. 1995), chegando a apresentar anisotropia prolata com o desenvolvimento de um arranjo nematoblástico, com

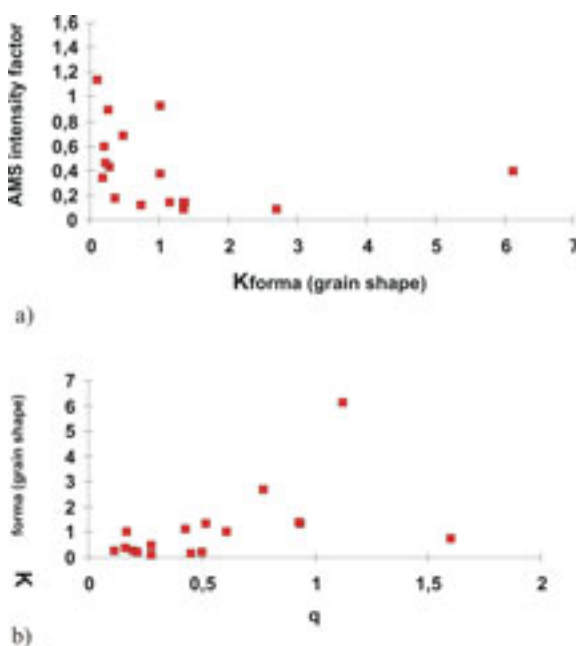


Figura 9: Diagramas de correlação entre a forma do grão e a intensidade e a forma de anisotropia de susceptibilidade magnética. a) Gráfico de correlação entre forma do grão caracterizada pelo parâmetro  $K_{forma}$  e a intensidade de AMS caracterizada pelo parâmetro  $\epsilon$ . As amostras de trama prolata (lepidoblástica) apresentam maior grau de anisotropia magnética. Uma das amostras de trama prolata apresentou ligeiro aumento de AMS. b) Gráfico de correlação entre tipo de anisotropia magnética ( $q$ ) e de forma de grão ( $K_{forma}$ ). O aumento da linearidade da trama é acompanhada da prolaticidade da AMS (ver o texto para maiores explicações).

Figure 9: Plots of relationship between grain shape fabric and intensity and shape of anisotropy of magnetic susceptibility. a) Plot of relationship between grain shape fabric  $K_{forma}$  and intensity of AMS ( $\epsilon$ ). Samples with prolate shape fabric (lepidoblastic) show higher AMS. One sample of prolate shape fabric have a slightly higher AMS. (b) Plot of relationship between shape of AMS and grain shape fabric ( $K_{forma}$ ). The increase in the linearity of the fabric is followed by a higher prolaticity of the AMS ellipsoid (see text for further explanation).

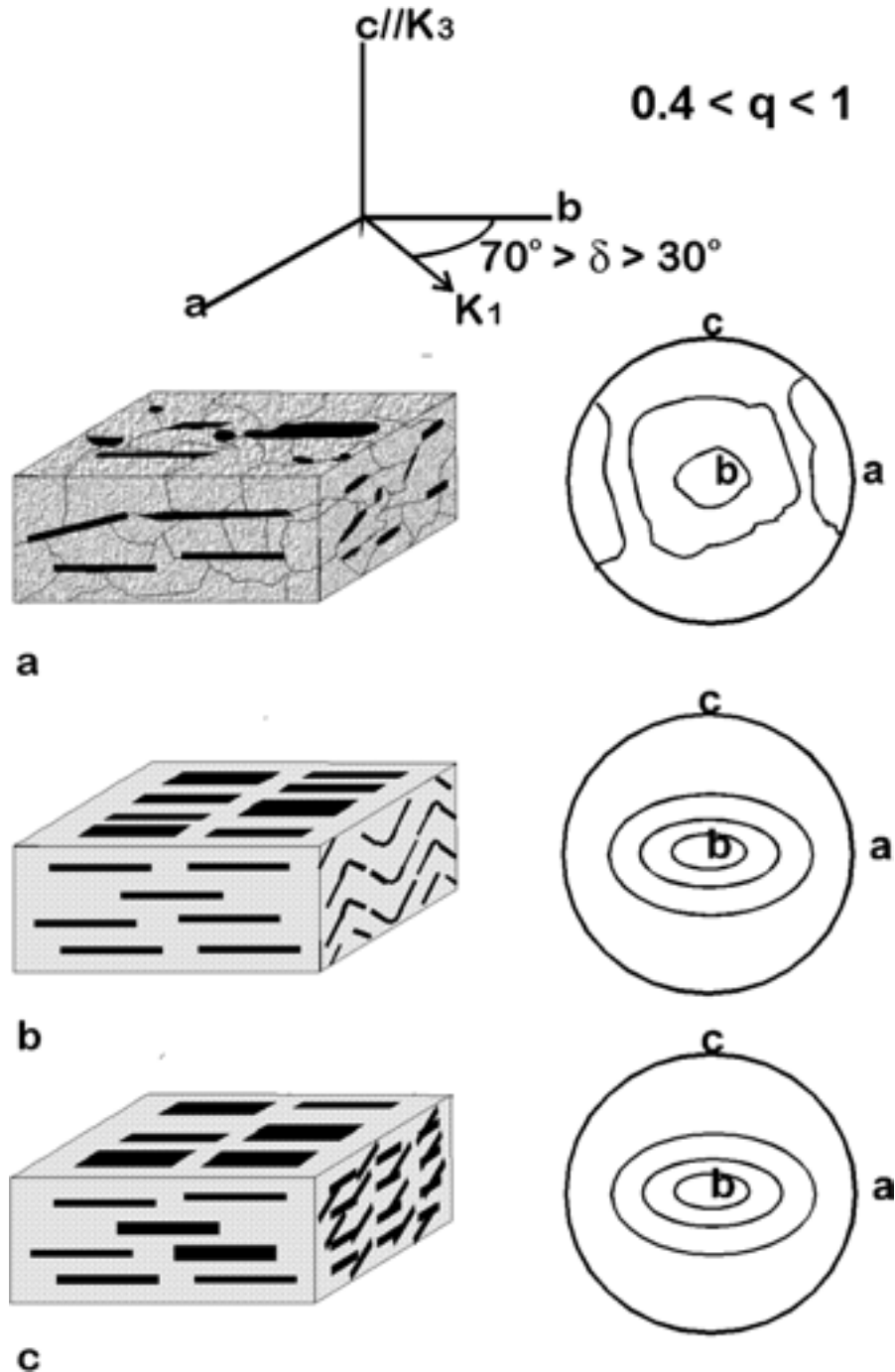


Figura 10: Representação esquemática dos tipos de trama e texturas dos planos {11.0} correspondentes de minérios com estruturação condicionada pelo dobramento (eixos de orientação **a**, **b** e **c**).  $K_3 // c$ ;  $K_1$  e  $K_2$  tem orientação variável (d). a) Trama granoblástica composta por martita (cinza escuro) e alguma specularita (preto). A textura é quase aleatória. ASM é baixa, com elipsóide triaxial. b) Trama predominantemente granoblástica ou lepidoblástica microdobrada. A textura é caracterizada por um máximo paralelo à lineação. ASM é variável, com elipsóide triaxial. c) Trama lepidogranoblástica com uma foliação paralela ao bandamento e outra cortando-a transversalmente. A textura é igualmente caracterizada por um máximo paralelo à lineação. ASM é variável, com elipsóide oblato a triaxial.

Figure 10: Schematic representation of fabric types and {11.0} textures of folded ores (fabric axis **a**, **b** e **c**).  $K_3 // c$ ;  $K_1$  and  $K_2$  display variable orientation (d). a) Granoblastic fabric with martite (dark gray) and minor specularite (black). Texture is almost random. AMS is low with triaxial ellipsoid. b) Predominant granoblastic or microfolded lepidoblastic fabric. Texture is represented by a maximum parallel to the lineation. AMS is variable with triaxial ellipsoid. c) Lepidogranoblastic fabric with a banding parallel foliation and a transverse schistosity. Texture is also represented by a maximum parallel to lineation. AMS is variable with oblate to triaxial ellipsoid.

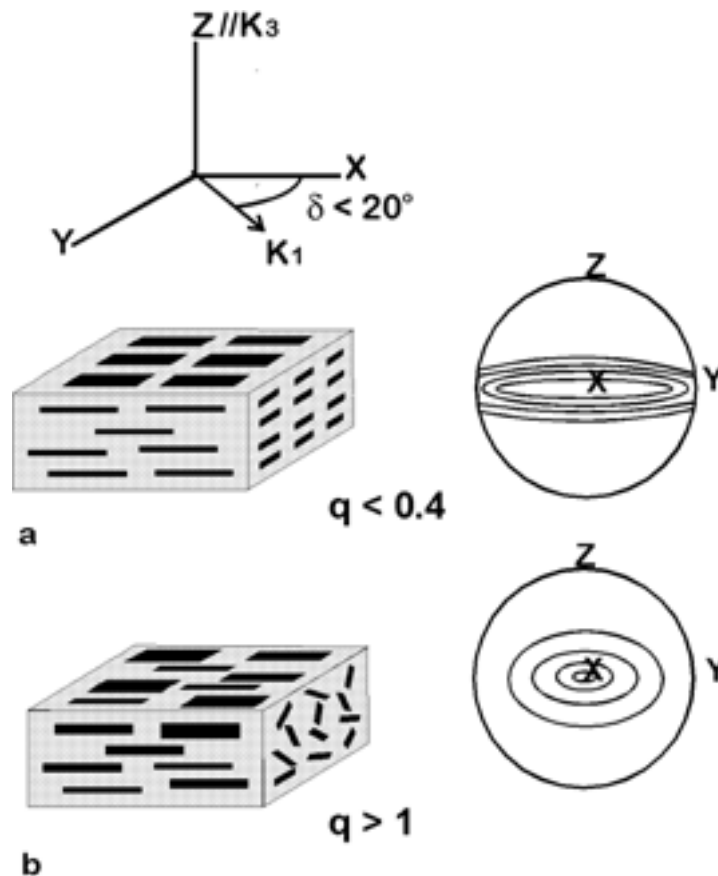


Figura 11: Representação esquemática dos tipos de trama e texturas dos planos  $\{11.0\}$  correspondentes de minérios com estruturação condicionadas por cisalhamento. Eixos de orientação  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ .  $K_3 // Z$ ,  $K_1 // X$  ( $d < 20^\circ$ ). a) Trama lepidoblástica composta por especularita em arranjo planar (tectonitos S). A textura é caracterizada por uma guirlanda paralela à foliação. AMS é alto, com elipsóide oblato. b) Trama nematoblástica constituída por especularita em arranjo linear (tectonito L). A textura é caracterizada por um máximo paralelo à lineação. AMS é baixa a moderada com elipsóide prolato

Figure 11: Schematic representation of fabric types and  $\{11.0\}$  textures of sheared ores (fabric axis  $X$ ,  $Y$  and  $Z$ ).  $K_3 // Z$ ;  $K_1 // X$  ( $d < 20^\circ$ ). a) Lepidoblastic fabric of specularite (S tectonite). Texture develops as a girdle parallel to the foliation. AMS is high with oblate ellipsoid. b) Nematoblastic fabric of specularite (L tectonite). Texture develops as a single maximum parallel to the mineral/stretching lineation. AMS is low to moderate with prolate ellipsoid.

$K_{\text{forma}} > 1$  (Fig. 9a, b) e estereograma de textura com um máximo, (tectonitos dos tipos LS e L). Minérios com anisotropia prolata possuem tipicamente baixo valor de  $\lambda$ , mesmo quando sua textura e trama são bem desenvolvidas. A maior intensidade de ASM medida entre todas as amostras analisadas possuidoras de anisotropia prolata foi de  $\lambda = 0,401$  (Alegria) seguida de  $\lambda = 0,21$  (Casa de Pedra), valores muito inferiores aos máximos encontrado entre os minérios com elipsóides triaxiais ( $\lambda = 1,1$  - Andrade) e oblatos ( $\lambda = 1,5$  - Andrade) (Fig. 8).

Minérios com fraca orientação - Amostras de minérios de trama granoblástica a granolepidoblástica com bandamento como principal estrutura planar, e textura pouco desenvolvida possuem baixa anisotropia de susceptibilidade magnética com elipsóide triaxial (Pico do Itabirito) com tendência a oblato (Pires, Córrego do Feijão, Fazendão, Águas Claras) ou mesmo prolato (Córrego do Meio, Casa de Pedra, Fábrica).

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

As características do elipsóide de susceptibilidade comparadas com a textura e microestrutura de diversas amostras de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero fornecem importantes informações sobre a relação entre a deformação, recristalização e estruturas desenvolvidas.

Especularita é o resultado da recristalização sintectônica nos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, de maneira que sua proporção relativa na rocha está relacionada com o grau de deformação sofrido pela mesma o que indica sua alta sensibilidade a esse fator. É essa variedade de hematita que imprime a textura no minério e influi de forma preponderante na intensidade e tipo de anisotropia de susceptibilidade magnética. A relação direta entre a intensidade da

deformação tectônica sofrida pelo minério e o grau de recristalização, desenvolvimento de trama, textura e AMS, reflete variações regionais e locais nas condições de deformação no Quadrilátero Ferrífero. Conseqüentemente dentro de um mesmo corpo mineralizado poderão ocorrer minérios de diferentes características mineralógicas e estruturais.

A textura de um único máximo coincidente com a lineação mineral para os planos {11.0} constatada nos minérios pouco deformados é proveniente de uma distribuição plano-linear dos cristais de especularita em torno da lineação, que se caracteriza como paralela ao eixo de dobramento (eixo b) (Fig. 10). Essa distribuição é resultante de dois tipos de estruturas:

Microdobramento do bandamento (Fig. 10b)

Interferência da textura dos cristais orientados no bandamento com a foliação plano-axial que o corta transversalmente (Fig. 10c).

Através do dobramento a flambagem das bandas de óxido de ferro vai contribuir para a formação da especularita por deslizamento interestratal enquanto outros cristais crescem orientados em posição plano-axial. Dessa forma a lineação mineral existente nos minérios pouco deformados não pode ser caracterizada como lineação de estiramento e sim como microestrutura do tipo "b".

A presença de inúmeros relictos de magnetita conferem ao minério pouco deformado susceptibilidade magnética elevada ( $>12.000 \cdot 10^{-6}$ ), mas um baixo grau de anisotropia com tendência triaxial, acompanhando a tendência constatada na análise da textura e das microestruturas. Tanto magnetita como maghemita são magneticamente isotrópicos apresentando somente anisotropia de forma. Em particular a magnetita ocorre como cristais isométricos não alongados, de modo que pode-se concluir que o alto grau de susceptibilidade provocado pela magnetita não influi na anisotropia, ou seja, na geometria do elipsóide de ASM.

Com o aumento da deformação, principalmente se acompanhada pelo aumento do grau metamórfico, o bandamento tende a ser obliterado por três efeitos mais ou menos concomitantes, mas que atuam com diferentes intensidades conforme o grau e tipo de deformação: transposição, cataclase (subordinadamente) e recristalização formando-se uma foliação contínua, por vezes anastomosada. Evidências de lixiviação por fluidos hidrotermais também estão presentes, que não serão discutidas por estarem fora do escopo desse trabalho.

A relação intensidade da deformação/geração e orientação da especularita é fácil de ser constatada em zonas de cisalhamento em escala micro- a mesoscópica. (Fig. 12). Fora das zonas ou em suas bordas corpos dobrados apresentam a trama granoblástica a granolepidoblástica e o bandamento preservado, enquanto que para o núcleo tornam-se mais foliados, com desenvolvimento de especularita definindo a xistosidade (Fig. 11) e apresentando propriedades magnéticas características desse mineral.

O aumento da deformação promove, assim, o

arranjo lepidoblástico a lepidogranoblástico de cristais tabulares de especularita gerando tectonitos S com textura dos planos do prisma {11.0} em grande círculo, e uma anisotropia de susceptibilidade magnética correspondente, com elipsóide oblato ( $K_1=K_2$ ) e valores elevados para (Fig. 11a). A susceptibilidade média é conseqüentemente baixa, inferior a  $12.000 \cdot 10^{-6}$ , pelo predomínio da hematita recristalizada.

O *habitus* alongado da especularita na direção de estiramento ressalta a sensibilidade desse mineral à deformação. Com o aumento dessa componente os cristais vão constituir um arranjo plano-linear e a guirlanda do prisma {11.0} perde a intensidade enquanto a anisotropia de susceptibilidade magnética torna-se menos intensa e triaxial ( $K_1 > K_2 > K_3$ ). Minérios lineares representam a situação extrema, com o predomínio da componente de estiramento, resultando em tectonitos L, com trama nematoblástica, textura caracterizada por um único máximo coincidente com a direção de estiramento para os planos {11.0} enquanto a anisotropia magnética torna-se prolata ( $K_1 \gg K_2 > K_3$ ) caindo o valor de (Fig. 11b).

A recristalização pós-tectônica aparentemente não altera a trama cristalina nem a anisotropia de susceptibilidade magnética embora a neoformação de magnetita resulte no aumento do valor da susceptibilidade média ( $K_m$ ). Minérios xistosos crenulados, por outro lado alteram a textura pela rotação dos cristais de especularita.

Essas características texturais e de anisotropia podem ser interpretadas analisando-se a influência dos componentes da deformação no crescimento da especularita.

O achatamento condiciona o crescimento da especularita com o pinacóide basal {00.1} no plano principal de deformação (plano XY) para formação da xistosidade, resultando na textura em guirlanda do plano do prisma.

O predomínio do componente de estiramento implica em maior liberdade de orientação para o pinacóide, mantendo-se como direção comum o eixo principal X, o que resulta no máximo observado nos referidos estereogramas.

A anisotropia de susceptibilidade magnética é afetada de forma semelhante já que cristais de hematita possuem, individualmente, ASM oblata, condicionada pela sua estrutura cristalina, enquanto a anisotropia de um agregado policristalino é o resultado da somatória das propriedades de seus indivíduos constituintes.

Assim sendo, em agregados xistosos, os valores individuais se somam até atingir o limite de um monocristal, ou seja, de elevada anisotropia total oblata. Em minérios lineares, pela variação na orientação dos planos do pinacóide, os componentes de AMS  $K_2$  e  $K_3$  tendem a se subtrair parcialmente, mantendo-se  $K_1$  paralelo à lineação, mas reduzindo-se, conseqüentemente, o grau de anisotropia.

Minérios compactos xistosos e fibrosos (lepidoblásticos e nematoblásticos) representam assim milonitos, termos limites de uma série de tectonitos



Figura 12: Fotomicrografia de microzona de cisalhamento caracterizada pela formação de especularita que progressivamente se orienta paralelamente à ZC, em uma distribuição sigmoidal.. Amostra TF32, Mina do Pico do Itabirito.

Figure 12: Photomicrograph of microshearzone with sigmoidal shaped specularite crystals due to progressive orientation parallel to the SZ. Sample TF32, Pico do Itabirito mine.

gerados pela recristalização sintectônica de minérios bandados porosos, pouco deformados, de trama predominantemente granoblástica. A presença de numerosos porfiroclastos, relictos da rocha original, resulta em variedades protomiloníticas. Minérios maciços, de trama em mosaico, correspondem a blastomilonitos resultantes de recristalização pós-tectônica. Essas conclusões são certamente válidas também para os minérios friáveis onde, entretanto, atuaram processos adicionais (lixiviação dos minerais transparentes existentes) que provocaram a perda da ligação entre os cristais.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP, dentro do PADCT pelo suporte financeiro, às empresas CVRD, MSG, DOCEGEO, MBR, SAMITRI, FERTECO, CSN, ITAMINAS pelo apoio e acesso a suas jazidas. C. A. Rosière agradece ao DAAD e ao CNPq pelas bolsas de estudos. E. M. Resende de Souza foi bolsista de iniciação científica da FAPEMIG

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAARS, F. & ROSIÈRE, C. A. (no prelo) Compilação do mapa do Quadrilátero Ferrífero e arredores in: The São Francisco Craton and its Greenstone Belts, Contribution to the book Greenstone Belts (de WITT, M. J. & ASHWAL, L. A., Ed.) - Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series, Oxford University Press.
- Balsley, J-R. & Buddington, A. F., 1960. Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. Amer. J. Sci., 258-A: 6-20.
- Dorr II, J.V.N., 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Washington, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 641-a: 110p.
- Chemale Jr., F.; ROSIÈRE, C.A. & ENDO, i. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Precambrian Research, 65: 25-54; Elsevier.
- FLINN, D. 1956. On the deformation of the Funzie conglomerate, Fetlar, Shetland. J. Geol. 64: 480 - 505.
- FLINN, D. 1962. On folding during three dimensional progressive deformations. Q. J. Geol. Soc. Lond. 135: 291 - 305.
- Granar, L., 1957. Magnetic measurements on Swedish varved sediments, Arkiv för Geofysik, 3: 1-40.
- HERZ, N., 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Mina Gerais, Brazil. U. S. Geological Survey Prof. Paper, 641-C: 1-78.
- Hrouda, F.; siemes, h.; herres, n.; hennig-michaeli, c. 1985. The relationship between magnetic anisotropy and the c-axis fabric in a massive hematite ore. J Geophys., 56: 174-182.
- KULLERUD, G. & DONNAY, G., 1969. Omission solid solution in magnetite: Kenoterahedral magnetite. Z. Kristall., 128: 1-17, Frankfurt.
- Nadai, A., 1963. Theory of fracture and flow of solids: 705pp., McGraw-Hill, New York.
- Nagata, T., 1961. Rock magnetism: 350pp., Maruzen, Tokyo.
- Nummer, A. R., Seixas, L. A. R., Baars, F. J., Almeida, M. E., Ferreira, A. L. Martins, A. P. S., Monteiro, M. A. S., Paixão,

- M. A. P., Sirotheau, G. J. C., Tasso, M. A. L. 1992. Geologia estrutural e petrologia do Lineamento Congonhas. Anais do 37º. Cong. Bras. Geol. SBG, São Paulo, 353-355.
- Quade, H. & Reinert, Th., 1993. Magnetic anisotropy and texture of banded hematite ores, Material Science Forum, 157-162: 1681-1688.
- Ramos, M. C. D., Rosière, C. A. & Ernesto, M., 1995. Características texturais, estruturais e de anisotropia magnética dos minérios de ferro da mina de Andrade (João Monlevade, MG). . In: SNET.,5. Gramado, Anais:154-157.
- Ramsay, J. G., 1967. Folding and fracturing of rocks: 568pp, McGraw-Hill, New, York.
- Romano, A. W. 1990. La Évolution Tectonique de la region du Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, Tese de Doutorado, Univ. de Nancy I, Nancy, 259pp.
- ROSIÈRE, C. A., 1981. Strukturelle und textuelle Untersuchungen in der Eisenerzlagertstätte "Pico de Itabira" bei Itabirito/Minas Gerais, Brasilien. Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen, 9: 302pp, Clausthal-Zellerfeld.
- Rosière, C.a. & Siemes, h. 1987. Estudo da textura dos minérios hematíticos do Quadrilátero Ferrífero com goniômetro de Raios-X. In: SNET.,1. Salvador, 1987. Bol. de Resumos, Salvador, 38.
- Rosière, c.a. & Chemale Jr., F. 1991. Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil. In PAGEL, M. & LEROY, J.L. (EDS) *Source, Transport and Deposition of Metals*, Amsterdam, Balkema:485-488.
- ROSIÈRE, C.A.; chemale Jr., F.; QUADE, H.W.; SIEMES, H.; MUCIDA, D.P. & REZENDE DE SOUZA, E.M. 1993. Análise Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero - Texturas Desenvolvidas e um Modelo para sua Origem - Anais do Workshop Geologia dos Minérios de Ferro, Bol. SBG Núcleo MG, 12:362-366 - Belo Horizonte, MG.
- ROSIÈRE, C.A., CHEMALE Jr., F. & GUIMARÃES, M.L.V. 1993. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização. - Revista Geonomos, 1(1): 65-84, UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Sander, B., 1930. Gefügekunde der Gesteine: 325, Springer, Wien.
- Seixas, L. A. R. 1988. Geologia e metalotectos de ouro de uma fração do Lineamento Congonhas, MG. Diss. Mestrado, Inst. de Geoc., Univ. de Brasília, 119pp.
- Stacey, F. D., 1960. Stress-induced magnetis anisotropy in rocks, Nature, 188: 134-135.