

## Petrografia do minério hematita compacta da Mina do Tamanduá (Quadrilátero Ferrífero, MG)

Renata Alvarenga Vilela

Gerente de Tec. e Proj. da Fertilizantes Fosfatados S.A. - Fosfertil  
E-mail: renata@fosfertil-ultrafertil.com.br

Rogério Junqueira de Melo

Mestrando do Departamento de Geologia da Escola de Minas - UFOP  
E-mail: rogeriojm@bol.com.br

Teófilo Aquino Vieira da Costa

Geólogo da Minerações Brasileiras Reunidas S.A. - MBR  
E-mail: teo@mbr.com.br

Leonardo Evangelista Lagoeiro

Professor do Departamento de Geologia da Escola de Minas - UFOP  
E-mail: lagoeiro@degeo.ufop.br

César Augusto Chicarino Varajão

Professor do Departamento de Geologia da Escola de Minas - UFOP  
E-mail: varajao@degeo.ufop.br

### Resumo

O estudo da mineralogia, macro e microestruturas e anisotropia da susceptibilidade magnética do minério de hematita compacta da Mina do Tamanduá permitiu a identificação de três domínios litoestruturais. A investigação foi baseada em trabalhos de campo, amostragem (*in situ* e testemunhos de furo de sonda) e estudo de seções polidas por microscópio óptico. Foram selecionadas amostras de minério para estudo em microscópio eletrônico de varredura e para a medida da anisotropia da susceptibilidade magnética. O conhecimento das fácies do minério é de grande importância para a otimização dos trabalhos de lavra.

**Palavras-chave:** Formações Ferríferas Bandadas, hematita compacta, Quadrilátero Ferrífero.

### Abstract

*The study of the mineralogy, macro and microstructures and anisotropy of magnetic susceptibility of hard hematite ore type of the Tamanduá Mine enabled to identify three litostructural domains. The investigation was based on fieldwork, sampling (in situ and boreholes) and on the study of polished sections using optic microscope. Ore samples were examined by electronic microscopy and selected specimens were prepared for measuring the anisotropy of magnetic susceptibility. The knowledge of the ore facies domains is of great importance for optimization of the mining works.*

**Keywords:** Banded Iron Formation, Hard ore, Quadrilátero Ferrífero.



tos litoestratigráficos: Complexos Metamórficos, compostos por terrenos granito-gnáissicos de idade arqueana; Supergrupo Rio das Velhas, formado por seqüência arqueana de rochas metavulcano-sedimentares tipo *greenstone belt*; Supergrupo Minas, formado por metassedimentos clásticos e químicos de idade proterozóica; e Grupo Itacolomi, formado por metassedimentos clásticos proterozóicos. Toda a seqüência é seccionada por diques máficos, sendo que a idade de 906 Ma representa a principal época de intrusão destes (Silva, 1992, Silva et al., 1992).

Toda região foi palco de eventos extensionais e compressionais superpostos (Marshak & Alkmim, 1989; Chemale et al., 1992, Alkmim & Marshak, 1998), responsáveis pela formação de megae estruturas como sinclinais, anticlinais e megafalamentos, sob condições de metamórficas de fácies xisto verde (porção oeste) a anfibolito (porção leste). Essas estruturas se desenvolveram em dois períodos orogenéticos principais: Transamazônico e Brasileiro.

Segundo Zavaglia (1995), o depósito do Tamanduá está inserido no flanco leste do Sinclinal da Moeda, sendo seu arcabouço estrutural (Figura 2) dominado por uma estrutura sinformal, com o flanco leste em posição normal e o flanco oeste invertido e rompido por zonas de cisalhamento reversas sinistrais. Diques e *sills* básicos são encontrados no depósito e teriam sido gerados no período Transamazônico (2100-1800 Ma). O sinforme do Tamanduá foi gerado em duas fases de deformação progressivas relativas a um único evento deformacional de idade brasileira (750-450 Ma).

### 3. Métodos utilizados

Durante os trabalhos de campo, após um estudo prévio de mapas e seções geológicas elaborados pela MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A.), foram coletadas amostras *in situ* e em testemunhos de furos de sondagem. Após a descrição macroscópica, foram selecionadas amostras para a confecção de seções e lâminas delgadas polidas.

Amostras selecionadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura com aparelho JSM - Jeol Scanning Microscope - modelo 5410, 15 Kv, no Laboratório de Engenharia da UFMG. Amostras representativas dos domínios litoestruturais foram serradas para a análise das características da susceptibilidade magnética, realizada no laboratório do CPMT (Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa) da UFMG, com aparelho Kapabridge-KLY-2.01.

## 4. Resultados

### 4.1 Domínios litoestruturais

Com base em diferenças na composição mineralógica, textura e macro/microestruturas, foram identificados diferentes tipos de minério que podem ser divididos em 3 domínios litoestruturais principais descritos a seguir (Figura 3):

**Domínio A:** Ocorre na parte central da Mina do Tamanduá, sendo os minérios compactos caracterizados por típico bandamento médio (0,2-0,4 cm) a grosso (0,5-1,0 cm), formado pela alternância de bandas ricas em martita subédrica (~30µm) com bandas ricas em hematita tabular (~18µm) (Figura 4). Os grãos de martita euédrica são constituídos por agregados de hematita granular (8 a 12µm). Cristais de hematita tabular podem apresentar-se orientados, desde paralelos até oblíquos ao bandamento, de acordo com a posição estrutural em que se encontram, respectivamente, nos flancos ou em zonas axiais de dobras.

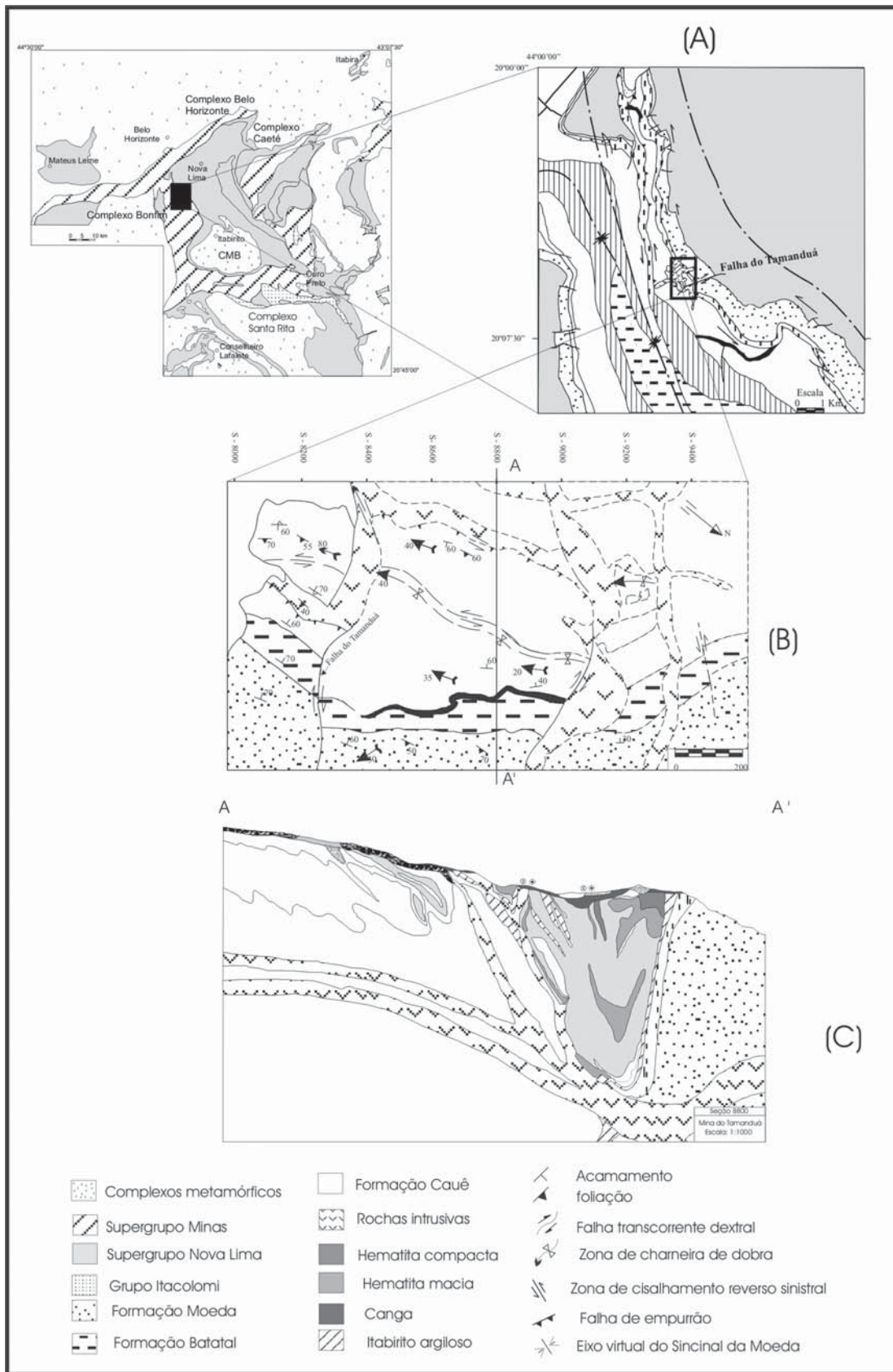
**Domínio B:** Ocorre nas vizinhanças dos corpos de rochas metabásicas intrusivas. Os minérios são compactos, caracterizados por possuírem aspecto maciço e, localmente, apresentarem bandamento médio (0,2-0,4 cm). A mineralogia também é característica, sendo constituída, predominantemente, por grãos de martita euédrica. Esse domínio foi subdividido em dois subdomínios:

**Subdomínio B-I:** Os minérios se caracterizam principalmente por seu caráter maciço, podendo, localmente, se apresentar laminados ou brechados. São constituídos por cristais granula-

res de hematita. Às vezes, podem apresentar um bandamento granulométrico, sendo que a gradação varia em torno de 4 a 6 µm, 15-20µm e 23-35µm. Nos minérios finamente laminados, ocorre o desenvolvimento de cristais de hematita tabular (26µm) orientados segundo a foliação. Grãos de martita euédrica (80-150µm) são freqüentes e contêm núcleos de kenomagnetita (Figura 5).

**Subdomínio B-II:** Os minérios são caracterizados por típico bandamento formado pela alternância de grãos de martita subédrica (40µm) e hematita tabular (20µm) (Figura 6A). Os grãos de martita subédrica são constituídos por agregados de hematita granular (13 a 18µm), enquanto que os cristais de hematita tabular encontram-se orientados. No interior dos grãos de martita, são freqüentemente encontrados núcleos de kenomagnetita com formatos anédricos a subédricos e tamanhos variados (Figura 6B). Grãos de martita euédrica (50 µm) são raros e, quando encontrados, apresentam núcleos de kenomagnetita.

**Domínio C:** O domínio C corresponde à área delimitada pela zona de cisalhamento, a qual possui direção aproximadamente NS e espessura variando de 20-25m. Os minérios hematíticos são caracterizados por possuir uma nítida xistosidade em decorrência da forte orientação dos cristais de hematita tabular (Figura 7). Localmente, pode apresentar-se bandado-xistoso, com bandamento médio (0,3-0,5 cm). O bandamento é formado pela alternância de bandas ricas em martita (32µm) com bandas ricas em hematita tabular (22µm). Os grãos de martita são constituídos por agregados de hematita com formatos alongados (7 a 21µm). Nos locais onde a zona de cisalhamento corta corpos de minério localizados próximos a rochas metabásicas intrusivas, podem ser observados grandes grãos de martita euédrica (70µm), contendo núcleos de kenomagnetita. Às vezes, são encontradas sombras de pressão assimétricas adjacentes a esses grãos. Em geral estão preenchidas por cristais tabulares de hematita.



**Figura 2** - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero mostrando: (A) Sinclinal da Moeda (Dorr, 1969) e Mina do Tamanduá no contexto do Sinclinal da Moeda (Pomerene, 1956); (B) Geologia estrutural local (Zavaglia, 1995) e (C) Perfil geológico, seção 8800 da Mina (MBR).



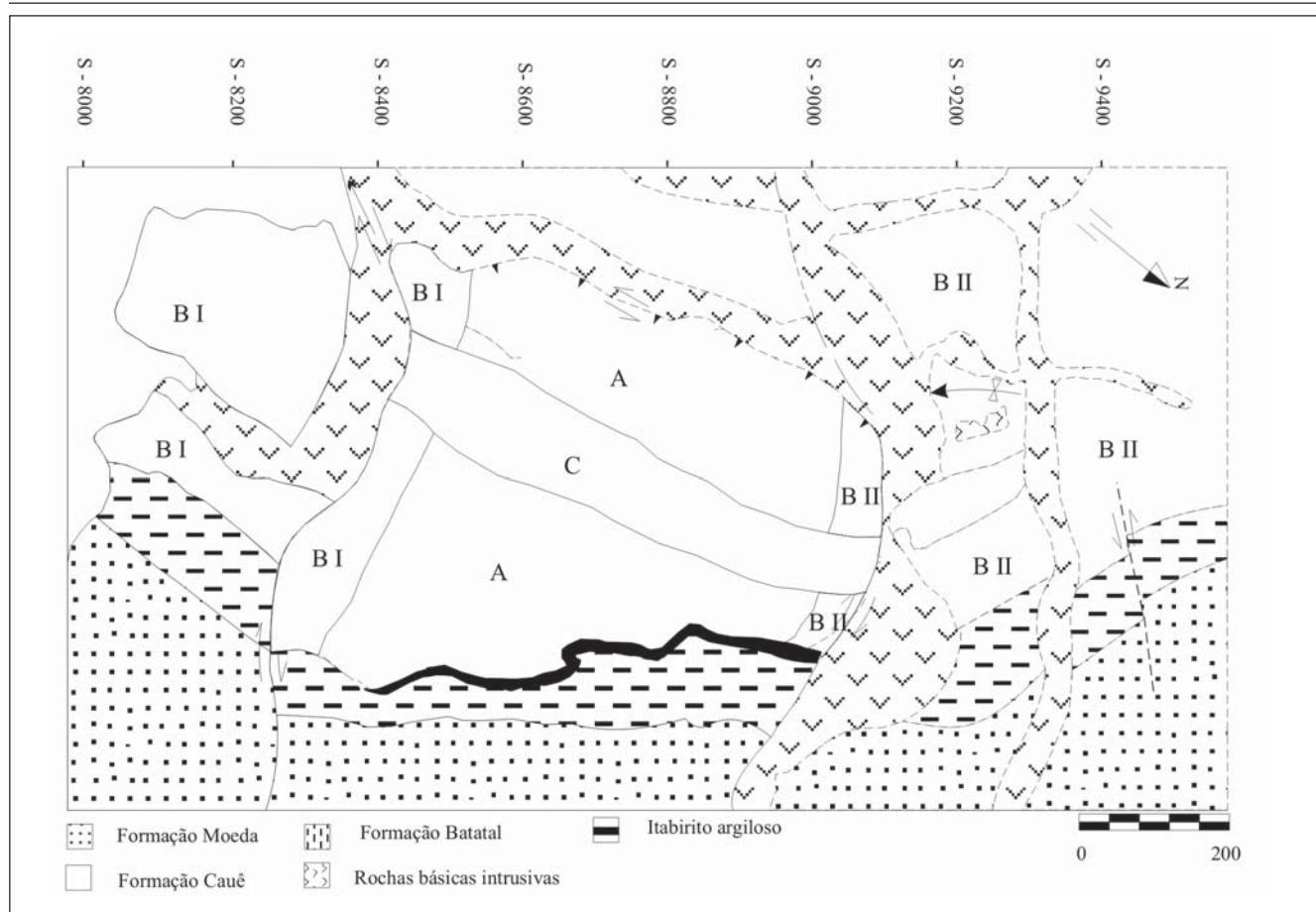


Figura 3 - Domínios litoestruturais definidos para a Mina do Tamanduá.

A alteração supergênica dos minérios de hematita compacta é evidenciada em superfície pela formação de canga. Em subsuperfície essa alteração é reconhecida pelo desenvolvimento de uma porosidade que se desenvolve principalmente nos contatos entre as bandas ricas em hematita e as bandas ricas em martita. Primeiramente, os cristais de hematita transformam-se em goethita, que, posteriormente, é dissolvida, gerando a porosidade. Os cristais de martita subédrica resultam da alteração supergênica da magnetita (Morris, 1980), com formação de estrutura em treliça e de fases intermediárias, maghemita e kenomagnetita. Esses minerais podem ser submetidos a processo de dissolução congruente (Varajão et al., 1996, Varajão et al., 2002), resultando na formação de esqueletos de martita e no desenvolvimento de uma porosidade conspícua, onde são formados poros de maior volume (Figura 8).

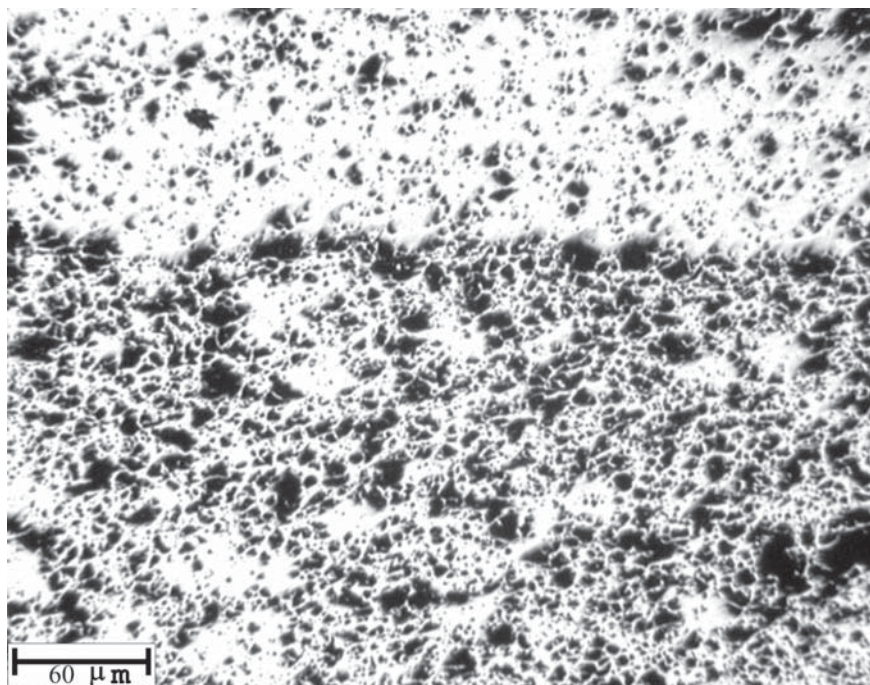


Figura 4 - Fotomicrografia mostrando alternância de bandas ricas em martita subédrica com bandas ricas em hematita tabular, característica dos minérios compactos do domínio A. Polarizadores paralelos.



## 4.2 Características da anisotropia de susceptibilidade magnética

A susceptibilidade magnética,  $K$ , é definida por  $M = [K] \times H$ , onde  $M$  é a magnetização induzida e  $H$  é o campo magnético induzido (Hrouda, 1982). Os componentes  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são chamados de susceptibilidades principais ou eixos de anisotropia de susceptibilidade magnética.

Nesse trabalho, para a descrição das características da susceptibilidade magnética, analogamente a Rosière et al. (1996), optou-se pelo fator  $q$  (Granar, 1958), para caracterizar o tipo de anisotropia, pelo fator  $\varepsilon$  (Nadai, 1963), para caracterizar o grau de anisotropia. O fator  $q$  é definido pela relação:

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

Onde:

$$k_1 = K_1/K_m, k_2 = K_2/K_m \text{ e } k_3 = K_3/K_m.$$

Valores de  $q$  inferiores a 0,4 definem uma anisotropia tipo oblata, valores de  $q$  variando de 0,4 a 1, definem uma anisotropia tipo triaxial e valores de  $q$  maiores que 1, anisotropia tipo prolata.

O valor  $\varepsilon$  é definido pela relação  $\varepsilon = (3/2)^{1/2} \times \gamma$ , sendo  $\gamma = 2/3 [(Ln L)^2 + (Ln F)^2 + (Ln P)^2]^{1/2}$ , onde,  $L = k_1/k_2$  (lineação magnética);  $F = k_2/k_3$  (foliação magnética) e  $P = k_1/k_3$  (grau de anisotropia)

A correlação entre os fatores  $q$  e  $\varepsilon$  (Figura 9) e os dados da susceptibilidade média (Tabela 1) mostraram que os minérios compactos característicos do domínio A apresentam baixo grau de anisotropia, baixo valor de susceptibilidade média e elipsóide de anisotropia tipo oblato ( $0 < q < 0,4$ ). Já os minérios característicos do domínio B

apresentam baixo grau de anisotropia, alto valor da susceptibilidade média e elipsóide de anisotropia tipo oblato ( $0 < q < 0,4$ ). Os minérios característicos do domínio C apresentam maior grau de anisotropia, baixo valor de susceptibilidade média e elipsóide de anisotropia tipo oblato ( $0 < q < 0,4$ ).

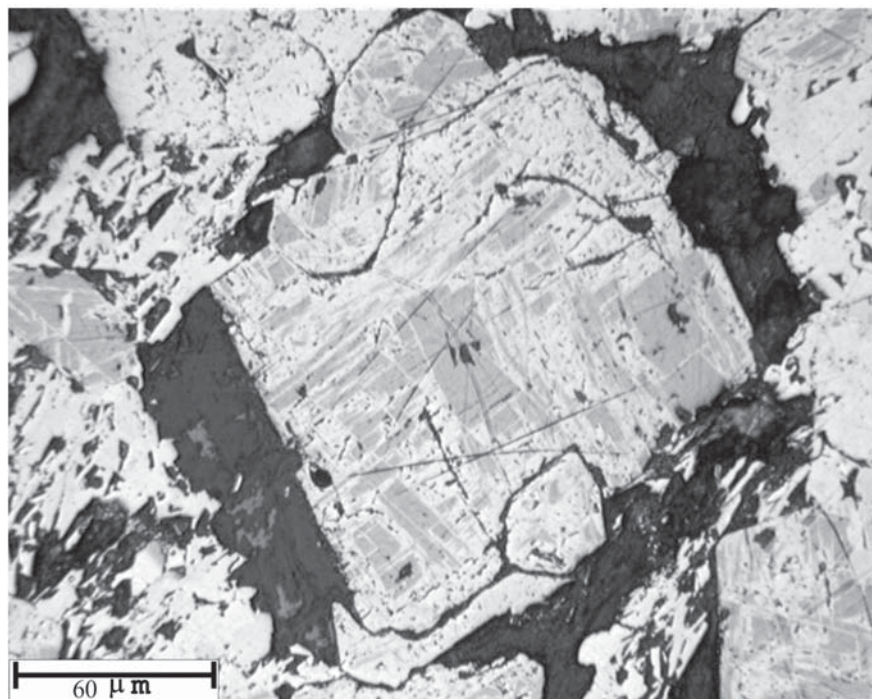


Figura 5 - Fotomicrografia mostrando grãos de martita euédrica (cinza-claro) contendo núcleos de kenomagnetita (cinza-escuro), característicos dos minérios do domínio B I. Polarizadores paralelos.

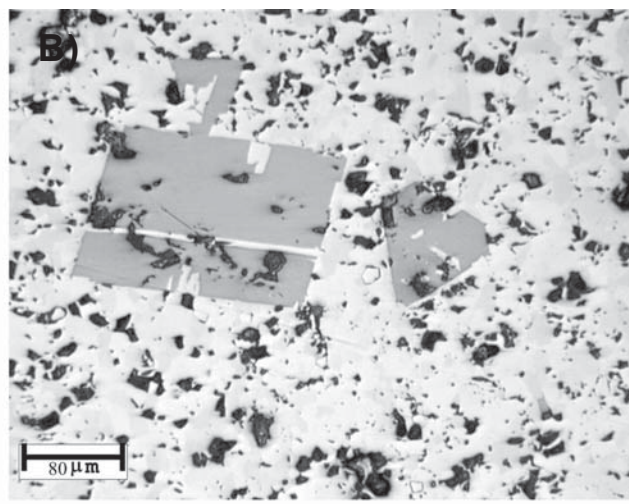
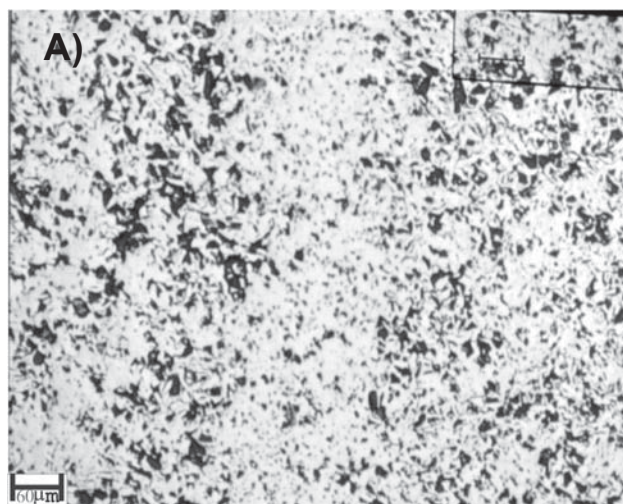
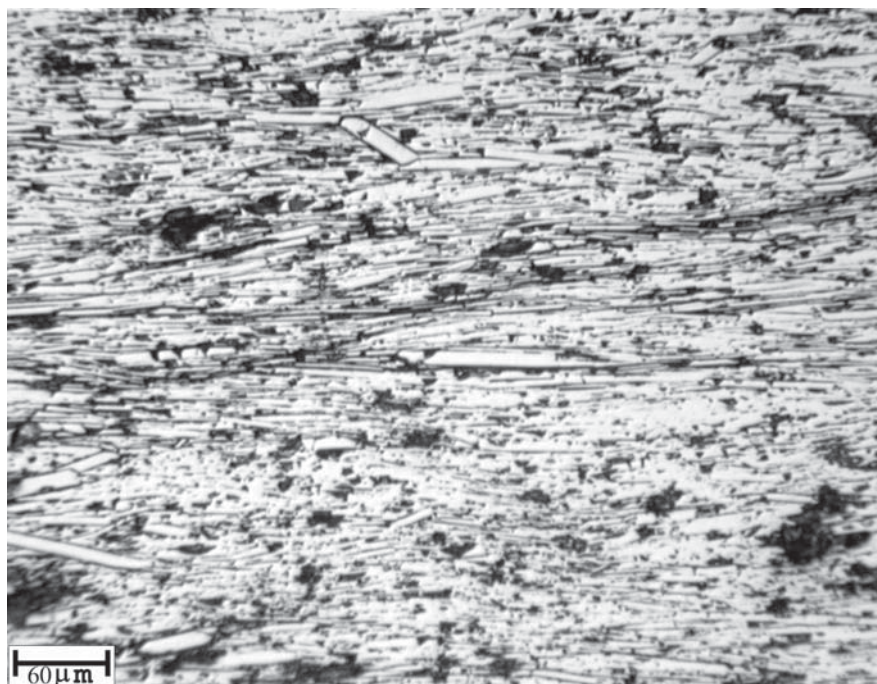
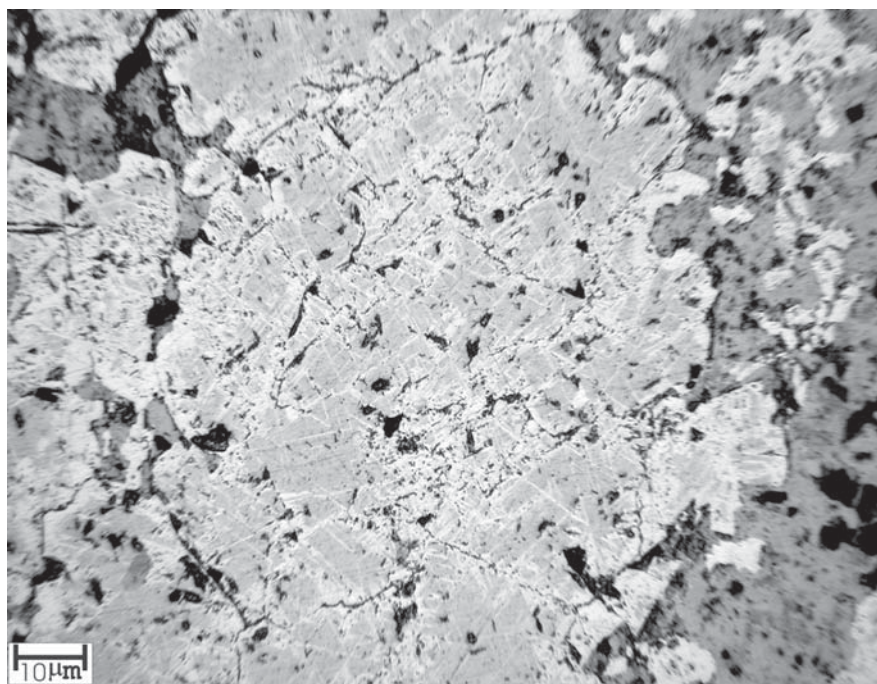


Figura 6 - A) Fotomicrografia mostrando o característico bandamento decorrente da alternância de martita subédrica e hematita tabular do domínio B II. Polarizadores paralelos. B) Fotomicrografia mostrando cristal de kenomagnetita euédrica, característica do domínio B II. Polarizadores paralelos.





**Figura 7** - Fotomicrografia mostrando a foliação formada pela forte orientação de cristais de especularita, característica do domínio C. Polarizadores paralelos.



**Figura 8** - Fotomicrografia mostrando a alteração supergênica de cristais de magnetita, formando grãos de martita com estrutura em treliça e microporosidade. Polarizadores paralelos.

## 5. Discussões

Mineralogia, textura e microestrutura características dos diversos domínios podem ser entendidas como conse-

quência de processos de sedimentação, deformação e metamorfismo. A magnetita encontra-se totalmente martitizada, gerando grãos de martita subédrica, os quais, através de metamorfismo e de-

formação, se transformam em hematita tabular (Lagoeiro, 1998). Próximo à zona de cisalhamento, a martita subédrica é total ou parcialmente transformada para hematita tabular, enquanto que a hematita tabular se transforma localmente em especularita. Próximo ao contato com as rochas básicas intrusivas, os grãos de martita e/ou hematita são recristalizados para magnetita (martita subédrica). Pode ocorrer, ainda, o crescimento de núcleos de kenomagnetita no interior de grãos de martita.

Como consequência das transformações mineralógicas, ocorrem variações na trama dos minérios, sendo que, nos minérios formados pela intercalação de bandas de martita e hematita (Domínio A), prevalece trama granular e próximo à zona de cisalhamento a trama passa gradativamente a orientada e localmente a tabular orientada (Domínio C). Próximo aos corpos básicos intrusivos, o bandamento é incipiente ou o minério apresenta uma estrutura maciça, com textura granular contendo cristais esparsos de martita euédrica (Domínio B).

As diferenças nas características da anisotropia de susceptibilidade magnética refletem as diferenças na mineralogia e na microtrama, sendo que, nos domínios A e B, a anisotropia é condicionada pela mineralogia, formada por cristais de martita subédrica e martita euédrica, respectivamente. Nos minérios do domínio C, a anisotropia é condicionada pela forte orientação dos cristais de especularita.

## 6. Conclusões

Na Mina do Tamanduá, foram identificados, macroscopicamente, diferentes tipos de hematita compacta, os quais, com base na composição mineralógica, textural e microestrutural, foram divididos em três grandes domínios. Essa classificação foi corroborada pelas diferenças encontradas nas características da anisotropia de susceptibilidade magnética dos minérios.

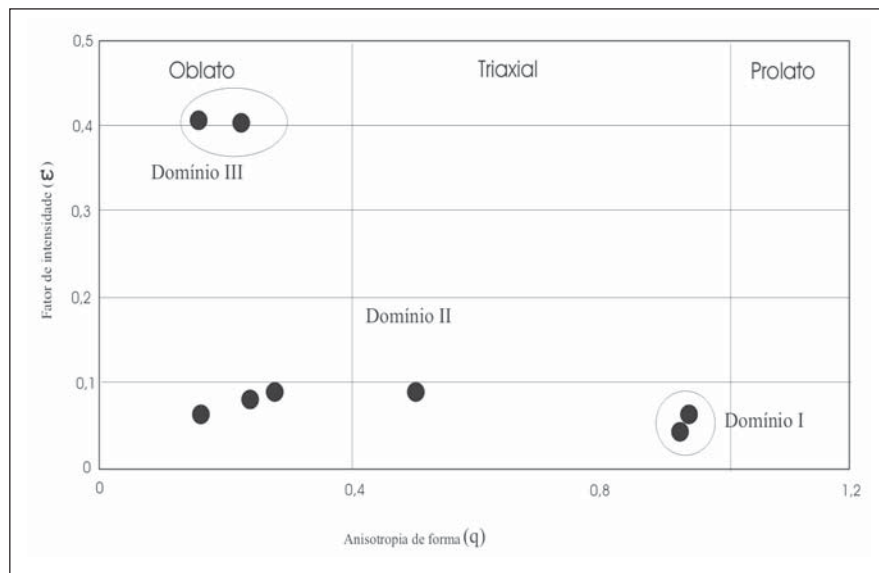


Figura 9 - Correlação entre a anisotropia de forma (q) e o fator de intensidade (ε) para os minérios compactos da Mina do Tamanduá.

Tabela 1- Valores da susceptibilidade média (km) para os minérios compactos dos diferentes domínios da Mina do Tamanduá.

DOMÍNIO	A	B		C
		I	II	
Km (10 <sup>6</sup> )	1785.11	19588.33	10807.84	2595.75

## 7. Agradecimentos

À Minerações Brasileiras Reunidas (MBR) pelo apoio nos trabalhos de campo e liberação de dados geológicos e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, CRA 80440/01).

## 8. Referências bibliográficas

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, p.29-58, 1998.

CHEMALE, F. Jr., ROSIÈRE, C.A., ENDO, I. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero - um modelo. *Pesquisas*, v. 18, n. 2, p. 104-127, 1992.

DERBY, O. A. The iron ores of Brazil. In: INTERN. GEOL. CONG., The iron ore resources of the world, 11, Stockholm, v. 2, p. 813-822, 1910.

DORR, J.V.N. Nature and origin of the high-grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil. *Econ. Geology*, v. 60, p. 1-46, 1965.

DORR, J.V.N. *Physiographic, stratigraphic and*

*structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. USGS, 1969. 110 p. (Professional Paper 641A).

DORR, J.V.N., GUILD, P.W., BARBOSA, A.L.M. The iron ore deposits of Brazil, origin of the Brazilian iron ores. In: INTERN. GEOL. CONGRES. SYMPOSIUM SUR LES GISEMENTS DU FER DU MONDE, 19. *Algiers*, v. 1, p. 286-298, 1952.

DORR, J.V.N., BARBOSA, A.L.M. *Geology and ore deposits of the Itabira District, Minas Gerais, Brazil*. USGS, 1963. 110p. (Professional Paper 341C).

GATHMANN, T. Beitrag zur kenntnis der "Itabirit" eisenerze in Minas Geraes (Brasilien). *Zeitschr. Prakt. Geologie*, v. 21, p. 234-240, 1913.

GRANAR, L. Magnetic Measurements on Swedish varved sediments. *Arkiv for geofysik*, v.3, p. 1-40, 1958.

GROSS, G.A. *Geology of iron deposits in Canada - general geology and evaluation of iron deposits*, Canadian Geological Survey, 1965. 181 p. (Report 22).

HARDER, E.C. The "Itabirit" iron ores of Brazil. *Econ. Geology*, v. 14, p. 101-111, 1914.

HARDER, E.C., CHAMBERLIN, R.T. The geology of central Minas Gerais: Brazil. *Journal Geology*, v.23, n. 4, p. 341-378, v. 23, n. 5, p. 385-424, 1915.

HROUDA, F. Theoretical models of magnetic anisotropy to strain relationship revisited. *Physics*

*of the Earth and Planetary Interiors*, v. 77, p. 237-249, 1982.

JAMES, H.L. Sedimentary facies of iron formation. *Econ. Geology*, v. 49, p. 235-293, 1954.

JAMES, H.L. Distribuition of banded iron formation in space and time. In TRENDALL, A.F., MORRIS, R.C. (eds.). *Iron formation facts and problems*, Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 471-486.

LAGOIRO L.E. Transformation of magnetite to hematite and its influence in the dissolution of iron oxide minerals. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 16, p. 415-423, 1998.

MARSHAK, S., ALKMIM, F.F. Proterozoic contraction/extension tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, v. 8, n. 3, p.555-571, 1989.

MORRIS, R.C. A Textural and mineralogical study of the relationship of iron ore to banded iron-formation in the hamersley iron Province of western Australia. *Economic Geology*, v. 75, p. 184-209, 1980.

NADAI, A. *Theory of flow and fracture of solids*. New York: McGraw Hill, 1963. 705p.

PARK, C. F. Jr. The Origin of Hard Hematite in Itabirite. *Economic Geology*, v. 54, p.573-587, 1959.

POMERENE J.B. *Geology and ore deposits of the Belo Horizonte, Ibitiré and Macacos Quadrangles*. USGS, 1964. 84 p. (Professional Paper 341-D).

ROSIÈRE, C.A. A recristalização do minério de ferro da jazida do Pico de Itabirito no Quadrilátero Ferrífero, MG e sua implicações genéticas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2. *Anais...* Belo Horizonte, SBG/Núcleo Minas Gerais, 1983. p. 173-186.

SANDERS, B.H. Iron ores at Itabira, Brazil. *Institute of Mining and Metallurgy*, v. 396, n.1, p. 1-23, 1933.

SILVA, A.M. *Geologia e petroquímica dos enxames de diques máficos do Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional, MG*. DF: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 1992. 173 p. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, A.M., KUYUMJIAN, R.M., CHEMALE Jr., F. Rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional: estudos preliminares. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v.45, n.1 e 2, p. 60-62, 1992.

VARAJÃO, C.A.C., RAMANAIDOU, E. COLIN, F., NAHON D. Martitização: alteração supergênica da magnetita. *Revista Escola de Minas*, v. 50, n. 3, p. 18-20, 1996.

VARAJÃO, C.A.C., RAMANAIDOU E., COLIN, F., NAHON, D. Gênese dos corpos de hematita compacta "hard hematite ores": metassomatismo, sedimentação ou alteração supergênica? *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 50, p. 40-43, 1997.

VARAJÃO, C.A.C., BRUAND, A. RAMANAIDOU, E.R., GILKES, R.J. Microporosity and Reducibility of BIF Hosted Massive Hematite Ores, Iron Quadrangle, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.74, n. 1, p. 113-126, 2002.

ZAVÁGLIA, G. *Condicionantes geológicas do comportamento dos minérios de ferro do depósito de Tamanduá (MG) no processo metalúrgico de redução direta*. Ouro Preto: Depart. de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 1995, 200p. (Tese de Mestrado).

Artigo recebido em 28/11/2003 e aprovado em 20/09/2004.