



Caracterização mineralógica e textural do itabirito e minério de ferro de alto teor da mina do Andrade

Marina Silva Dias¹

Pedro Henrique Santos Lopes²

Flávia Cristina Silveira Braga³

RESUMO

A caracterização mineralógica e textural trata da forma, tamanho, o arranjo entre cristais, e é importante, por exemplo, para otimização do processo de sinterização e para a melhoria da qualidade intrínseca do produto. O estudo baseou-se na confecção e descrição de seções polidas de minério e protominério (itabirito) da frente de lavra da mina do Andrade, localizada no município de Bela Vista de Minas, Minas Gerais. O depósito, apesar da aparente homogeneidade do minério, apresenta diferenças não apenas em termos de compacidade das rochas associadas à mineralização e seu teor de Fe, mas também em termos texturais. Foram identificados quatro litotipos associados à mineralização de ferro: itabirito; minério lamelar; lamelar manganífero e o lamelar granular. O itabirito é composto por quartzo, hematita lamelar e granular. Sua textura é lepidogranoblástica, devido ao predomínio de hematita lamelar em comparação com a granular. Os minérios lamelar e lamelar granular são composicionalmente parecidos, diferindo apenas em termos texturais. No primeiro a granulometria é menor e a foliação da rocha é mais penetrativa. O minério manganífero é texturalmente semelhante ao minério lamelar.

Palavras-chave: Caracterização Mineralógica. Caracterização Textural. Minério de Ferro.

¹Graduada em Engenharia de Minas pela Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: marina18.silva.dias@hotmail.com.

²Graduado em Engenharia de Minas pela Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: pedrolopes.lopespedro@gmail.com.

³Graduada, Mestra e Doutora em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. É professora e pesquisadora da Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: flaviacsbraga@gmail.com.

Mineralogical and textural characterization of itabirite and high-grade iron ore from Andrade mine

ABSTRACT

The mineralogical and textural characterization describes the shape, size and arrangement between crystals, and it is important, for example, to optimize the sintering process and to improve the product intrinsic quality. This study was based on the production and description of polished sections of ore and proto-ore (itabirite) from the mining front of the Andrade mine, located in the municipality of Bela Vista de Minas, Minas Gerais. The deposit, despite the apparent homogeneity of the ore, presents differences not only in terms of the compactness of the rocks associated with mineralization and their Fe content, but also in terms of texture. Four lithotypes associated with iron mineralization were identified: itabirite; lamellar ore; manganese lamellar and granular lamellar. Itabirite is composed of quartz, lamellar and granular hematite. Its texture is lepidogranoblastic, due to the predominance of lamellar hematite compared to granular one. Lamellar and granular lamellar ores are compositionally similar, differing only in textural terms. In the first, the particle size is smaller and the rock foliation is more penetrative. Manganese ore is texturally similar to lamellar ore.

Keywords: *Mineral Characterization. Textural Characterization. Iron Ore.*

Artigo recebido em: 13/11/2021

Aceito em: 17/11/2021

1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma região bastante rica em *commodities* minerais, destacando o ferro como um dos principais elementos extraídos na região. O Quadrilátero Ferrífero é uma província metalogenética localizada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais e abrange uma área de 8.000 km². A exploração de minérios na região é de extrema importância para a economia do Brasil.

A gênese e caracterização dos corpos de minério de ferro do QF é amplamente discutida na literatura (HAGEMANN *et al.*, 2016; HENSLER *et al.*, 2014; ROSIÈRE *et al.*, 2008; ROSIÈRE *et al.*, 2001; ROSIÈRE & RIOS, 2004), sendo a definição dos processos envolvidos importante na caracterização da jazida, de forma a auxiliar a prospecção de novos depósitos, bem como otimizar as reservas já conhecidas e aperfeiçoar os métodos de beneficiamento.

Os minérios de ferro brasileiros apresentam textura e estruturas internas muito variadas, que estão diretamente relacionadas ao ambiente geológico de formação do minério e do protominério, bem como aos processos de metamorfismo e intemperismo sofridos pelas rochas. As características estruturais e texturais do minério de ferro têm sido negligenciadas no controle dos processos de beneficiamento e siderurgia, como por exemplo no processo de sinterização. A avaliação técnica de finos de minérios de ferro no Brasil tem sido rotineiramente realizada na mineração e nas siderúrgicas apenas baseada na caracterização granulométrica e química, sem levar em consideração as características texturais dos materiais, as quais provocam grandes diferenças na eficiência dos processos (VIEIRA *et al.*, 2003).

A caracterização mineralógica e textural trata das propriedades dos grãos componentes da rocha quanto à forma, tamanho, o arranjo entre as unidades granulares (ou cristais) e suas relações de contato. Vieira *et al.* (2003) sugerem que a caracterização mineralógica é importante, por exemplo, para otimização do processo de sinterização e para a melhoria da qualidade intrínseca do produto.

A caracterização mineralógica e textural consistiu-se também de um pilar importante da geometurgia. Segundo Grasso (2015), a geometurgia compreende a junção de diversas áreas, tais como geologia, mineralogia, metalogenia, caracterização

tecnológica, lavra, beneficiamento mineral e parâmetros econômicos, no intuito de compreender a variabilidade metalúrgica de um tipo de minério e direcionar a lavra e o beneficiamento para otimizar os ganhos de um empreendimento mineiro. Deste modo, a caracterização mineralógica e textural é essencial, pois a partir dela é possível obter um modelamento geológico que concentre as informações de mineralogia e texturas dos minérios e posteriormente, por meio desses dados possa ser definido o comportamento metalúrgico dos minerais minério, constituindo deste modo um modelo geometalúrgico eficiente.

O presente trabalho trata do estudo mineralógico e textural do minério das frentes de lavra da Mina do Andrade, localizada no município de Bela Vista de Minas, Minas Gerais. O minério do local é predominantemente classificado apenas com relação à sua compacidade e grau de alteração. O presente trabalho traz uma caracterização detalhada da textura do minério que servirá como base para outros projetos relacionados ao beneficiamento, grau de liberação, aglomeração e geometalurgia.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 Geologia Regional

A mina do Andrade localiza-se no extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), o qual por sua vez está presente na borda sul do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1977). O QF apresenta uma complexa história tectônica e deformacional, envolvendo duas orogênias principais: a Transamazônica (2.000-2.200 Ma) e a Brasileira (650-500 Ma), (ALKMIM E MARSHAK, 1998; DORR, 1969). Essa superposição de diferentes eventos orogênicos resultou na formação de um gradiente deformacional, com intensidade crescente de oeste para leste (Figura 1), e gerou os corpos de minério de alto teor (ROSIÈRE *et al.*, 2001; ROSIÈRE & CHEMALE, 2000). As rochas da região são agrupadas em três unidades geológicas principais: Complexos Metamórficos, constituídos de gnaisses, migmatitos e granitoides; Supergrupo Rio das Velhas, sequência metavulcanossedimentar tipo *greenstone belt*; e o Supergrupo Minas, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas (CASTRO *et al.*, 2020; DORR, 1969).

O Supergrupo Minas representa uma sequência de rochas plataformais de idade paleoproterozoica que foi depositada sobre o Supergrupo Rio das Velhas (DORR, 1969; RENGER *et al.*, 1994). A unidade basal é representada pelos Grupos Tamanduá e Caraça, compostos por conglomerados aluviais e arenitos (Formação Moeda) que gradam para pelitos de ambiente marinho raso (Formação Batatal) (DORR, 1969; ALKMIM E MARSHAK, 1998).

O Grupo Itabira sobreposto ao Grupo Caraça é composto pelas formações Cauê e Gandarela, e constitui a sedimentação química da Bacia Minas, apresentando contribuição clástica (DORR, 1969). A formação Cauê é a unidade hospedeira do grande volume de formações ferríferas bandadas, que por estarem metamorfozadas são comumente denominadas como itabiritos, e contêm os corpos de minério de ferro de alto teor na região do QF (ROSIÈRE & CHEMALE, 2000; ROSIÈRE *et al.*, 2008). São identificados os seguintes tipos de itabiritos: quartzo itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfíbolítico (ROSIÈRE & CHEMALE, 2000; SPIER *et al.*, 2007). A formação Gandarela ocorre em contato gradacional com a Formação Cauê, e é composta por rochas carbonáticas, calcíticas e dolomíticas, metaconglomerados intraformacionais e finas camadas de itabiritos (DORR, 1969). A idade de sedimentação proposta para esta unidade é de 2.420 Ma, obtida pelo método Pb-Pb em metacalcário estromatolítico (BABINSKI *et al.*, 1995).

Sobreposta e em contato discordante com o Grupo Itabira há uma espessa pilha de rochas de ambiente marinho raso e deltaico denominada Grupo Piracicaba, o qual é subdividido, da base para o topo, nas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro (DORR, 1969). O Grupo Sabará é a unidade de maior espessura do Supergrupo Minas (3.000 – 3.500 m), e é composto predominantemente por pelito e grauvaca sendo também observado conglomerado, quartzito, filito grafitoso, tufito e vulcânicas máficas e ácidas (DORR, 1969; RENGER *et al.*, 1994).

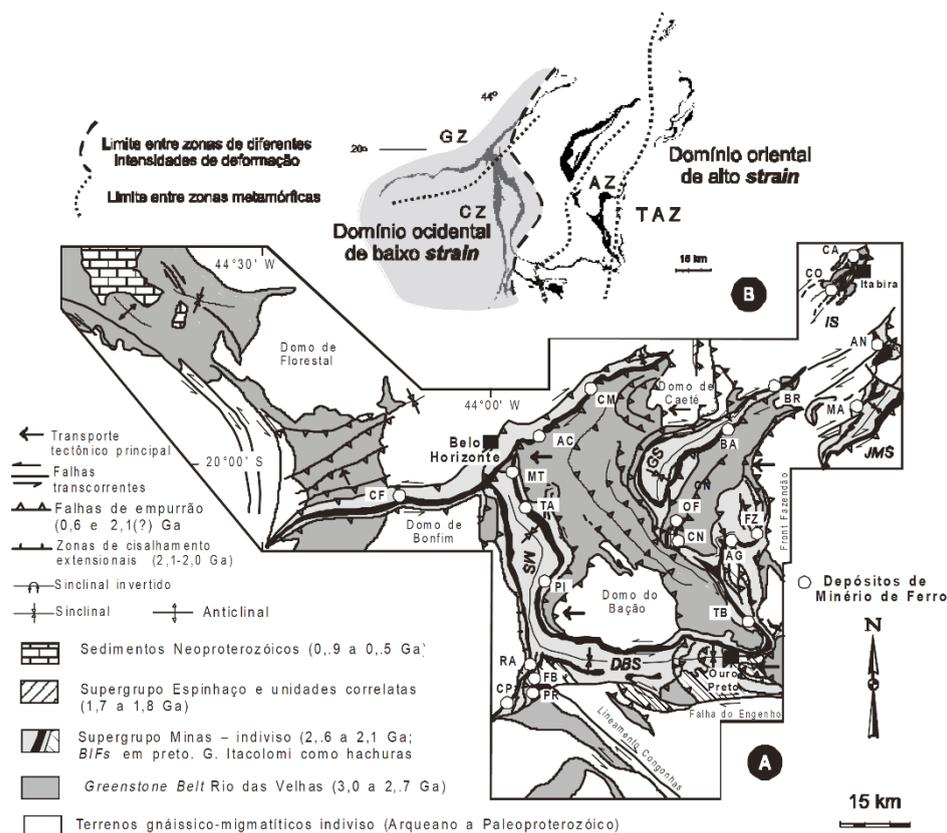
2.2 Mineralizações de ferro do QF

Uma combinação de processos hipogênicos e supergênicos, este último geologicamente recente, são utilizados para explicar a formação dos minérios de ferro de alto teor do QF (ROSIÈRE, C. A. *et al.*, 2008). Corpos de minério de ferro de alto teor

substituem os itabiritos em locais tectonicamente favoráveis, como em zonas de falhas, as quais agiram como condutos dos fluidos hidrotermais, e zonas de charneira, que eram grandes acumuladores dos fluidos mineralizantes (ROSIÈRE, C. A. *et al.*, 2008). Corpos de minério duro ricos em hematita e / ou magnetita de granulação fina estão presentes no domínio oeste de baixa deformação do QF (Figura 1). A deformação subsequente levou à recristalização e ao desenvolvimento de minérios de hematita de alto grau distintamente xistosos, característicos do domínio leste de alta deformação e metamorfismo (ROSIÈRE, C. A. *et al.*, 2008).

A composição mineralógica do protominério (itabirito) e minérios são bastante simples, apresentando óxidos de ferro (magnetita, martita e hematita) e silicatos (quartzo e anfibólios) e/ou carbonatos como componentes principais (ROSIÈRE & CHEMALE, 2000). No entanto, os óxidos de ferro apresentam características morfológicas distintas, indicativas dos processos deformacionais e metalogenéticos sofridos pela rocha. Diferentes tipos de cristais de hematita (especular, martita, granular, microgranular, etc.), com tamanhos de cristais variando de 1µm até 1000 µm, são encontrados nos tipos de minérios existentes além de existirem diferentes tipos de trama dos cristais, tais como granoblástica, lepidoblástica e granolepidoblástica (ROSIÈRE & CHEMALE, 2000).

Figura 1: (A) Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. Principais estruturas tectônicas: DBS – Sinclinal de Dom Bosco, MS – Sinclinal de Moeda, GS – Sinclinal de Gandarela, IS – Sinclinório de Itabira, JMS – Sinclinório de João Monlevade. Principais depósitos de minério de ferro: CF – Córrego do Feijão, MT – Mutuca, TA – Tamanduá, RA – Retiro das Almas, CP – Casa de Pedra, FB – Fábrica, PR – Pires, PI – Pico do Itabirito, AC – Águas Claras, CM – Córrego do Meio, OF – Ouro Fino, Capanema, TB – Timbopeba, AG – Alegria, FZ – Fazendão, BA – Baú, BR – Brucutú, MA – Morro Agudo, AN – Andrade, CO – Conceição, CA – Cauê. **(B)** Localização dos domínios metamórficos e estruturais do Quadrilátero Ferrífero. Área sombreada corresponde a domínio de baixa deformação. Zonas metamórficas segundo Pires (1995): GZ – Zona da Grunerita, CZ – Zona da Cummingtonita, AZ – Zona da Actinolita, TAZ – Zona da Tremolita-Antofilita. Representado em preto estão as formações ferríferas do Grupo Itabira



Fonte: ROSIÈRE & CHEMALE, 2000.

No mapa da Figura 1 é possível observar a divisão do QF em dois domínios estruturais distintos: domínio ocidental de baixa deformação (*strain*) e domínio oriental de alta deformação. A textura dos minérios da porção oeste do QF é em geral granoblástica enquanto que os minérios da porção oriental, onde localiza-se a cidade de João Monlevade e a Mina do Andrade, têm textura lepidoblástica.

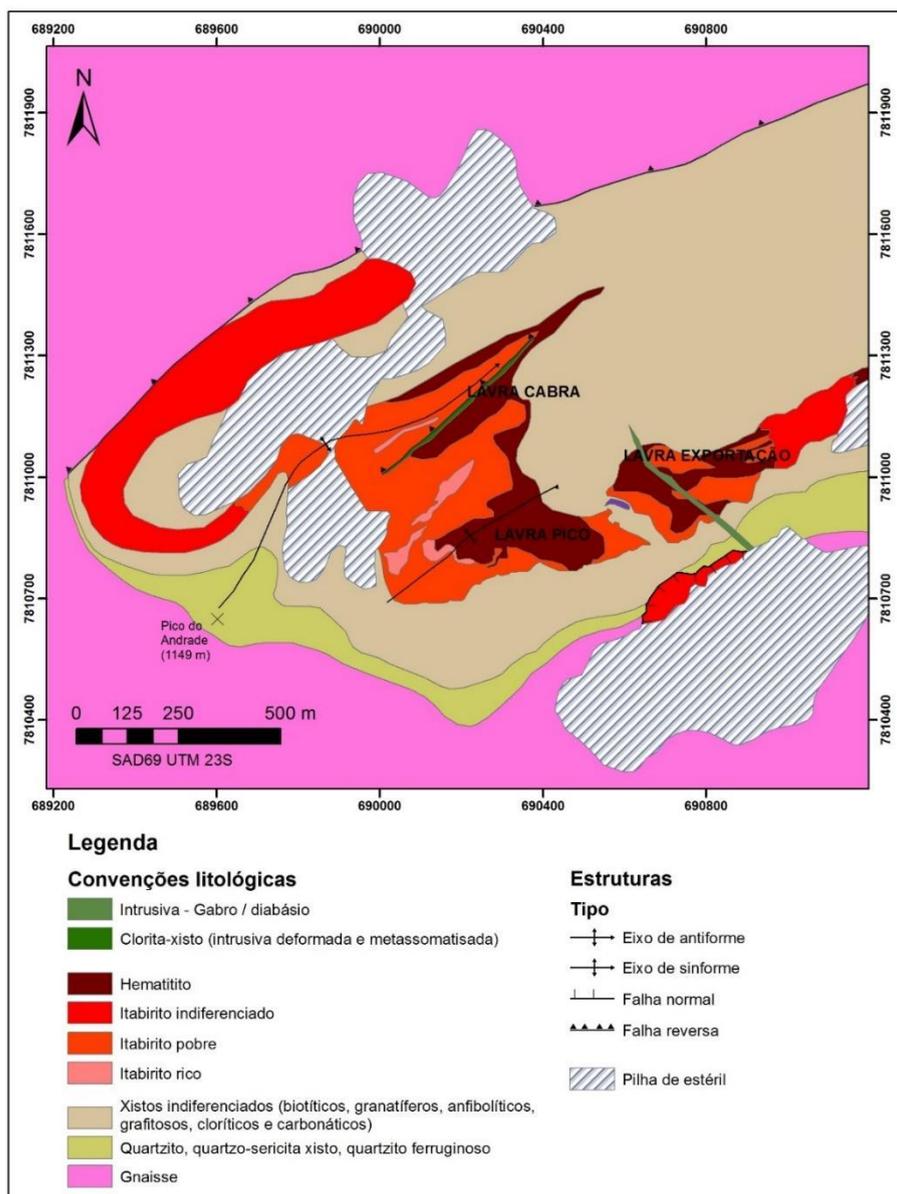
2.3 Geologia local da mina do Andrade

A sequência estratigráfica da mina do Andrade é constituída da base para o topo, pelo embasamento (composto por gnaisse e anfibolito), Supergrupo Minas (composto localmente por quartzitos, xistos, itabirito com corpos de minério de alto teor), rochas intrusivas e coberturas sedimentares (Figura 2) (MDGEO, 2008; PAGANIN NETO, 2016; RAMOS *et al.*, 1996). O itabirito possui espessura em torno de 100 metros na região central da mina e 50 m em seu prolongamento leste (PAGANIN NETO, 2016).

O xisto intrusivo (Figura 2) representa diques máficos que foram submetidos a metamorfismo e hidrotermalismo, afetando e obliterando dessa forma sua mineralogia e

textura ígnea. Raros corpos de gabro / diabásio são observados na área da mina. De acordo com Mendes *et al.* (2014), as rochas intrusivas apresentam persistência e espessura variáveis. As coberturas sedimentares constituem-se de depósitos de ganga laterítica que capeiam as unidades geológicas, apresentando espessura média de 10 metros.

Figura 2: Mapa geológico da mina do Andrade



Fonte: Modificado de PROMINAS, 2005 apud SALIBA, 2007.

Diversos trabalhos classificam os corpos de itabirito e minério de alto teor da região baseado em sua compacidade. Ramos *et al.* (1996) subdividem em hematita xistosa compacta, hematita semi-compacta, hematita xistosa friável e hematita pulverulenta. PROMINAS (2005 apud SALIBA, 2007) faz a subdivisão baseada no teor de ferro em hematitito, itabirito indiferenciado, pobre em Fe e rico em Fe (Figura 2). No tópico a seguir apresenta-se a classificação baseada na mineralogia e textura das amostras estudadas.

A mina está localizada no sinclinal Andrade, estrutura com eixo mergulhando para NE, e xistosidade com direções que variam entre E-W e NW-SE (JANUZZI *et al.*, 1995). A xistosidade é pervasiva e localmente milonítica, e acompanha o corpo mineralizado

(JANUZZI *et al.*, 1995). Os contatos são marcados por falhas de empurrão sendo estas zonas marcadas pelo processo de estiramento, milonitização e cominuição, que facilitam a atuação dos processos intempéricos.

3. METODOLOGIA

Foi realizado um trabalho de campo na mina do Andrade para descrição de afloramentos da frente de lavra e coleta de amostras. A partir das amostras coletadas foi realizada a confecção de seis seções polidas de minério e protominério pelos próprios autores, utilizando serra policorte e politriz, equipamentos disponíveis no laboratório de preparação de amostras do Centro Tecnológico da UEMG, Unidade João Monlevade - CTec. Após a seleção das amostras, realizou-se o corte das mesmas utilizando serra policorte com disco diamantado.

Após serem cortadas em seções de aproximadamente 2,5 cm x 1,5 cm x 1,0 cm, as amostras foram embutidas a quente em baquelite, um material tipicamente usado para embutimento de seções de aço. O embutimento foi feito em uma amostra por vez e o tempo de embutimento foi de 25 minutos para cada.

As amostras embutidas foram polidas a úmido, utilizando a politriz e lixas d'água de granulometria variando de 110 a 8,5 μm . O processo de polimento em cada lixa durou em torno de 15 a 20 minutos. Para dar o acabamento, após a utilização das lixas, utilizou-se pasta diamantada de 1 μm .

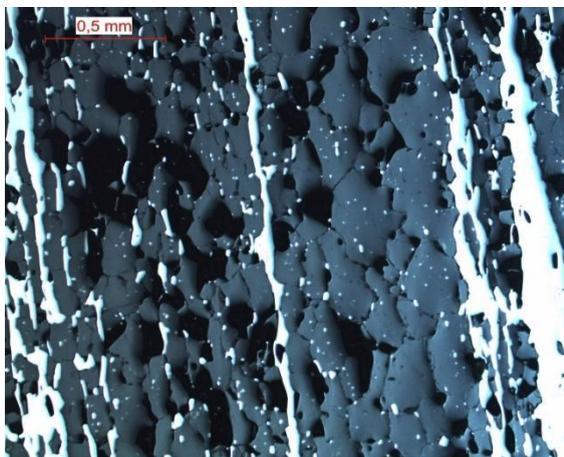
A caracterização mineralógica e textural foi feita por meio de microscopia ótica de luz refletida do CTec-UEMG e do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG). Nesta etapa foram descritas microscopicamente, além das seções confeccionadas, seções polidas do depósito do Andrade cedidas pelo professor Carlos Alberto Rosière do IGC-UFMG. Foi realizada ainda a avaliação da textura dos minerais minérios e da porosidade das amostras através de imagens de SE (*Secondary electron*) e BSE (*Back-scattered electrons*) obtidas no Microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) do IGC-UFMG. As amostras do depósito do Andrade foram fragmentadas em pequenos pedaços, com tamanhos de aproximadamente 1 cm³ cada, para serem inseridas no MEV.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da descrição macroscópica e microscópica das amostras foram discriminados os seguintes litotipos associados à mineralização de ferro do Andrade: itabirito, minério lamelar e granular, minério lamelar e minério lamelar manganésífero. Com relação à compacidade as rochas podem apresentar-se de forma friável, semi-friável e compacta. As seções polidas foram confeccionadas apenas nas amostras compactas.

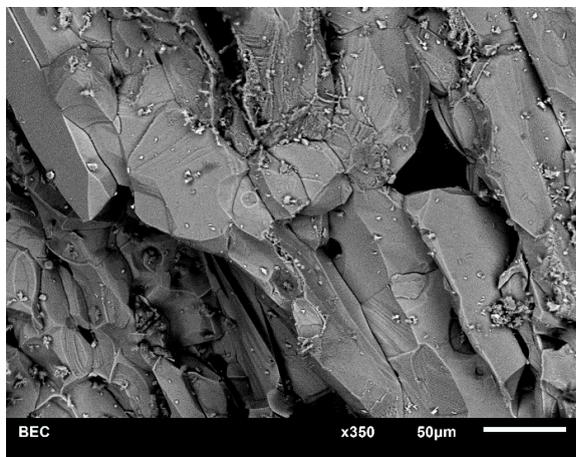
As amostras de itabirito possuem como minerais principais quartzo (45-50%), hematita lamelar (10-50%) e hematita granular (5-20%) – Figuras 3 e 4. O itabirito pode conter ainda até 10% de sericita próximo ao contato com o xisto. Apatita ocorre como mineral acessório. Fora da área da mina, observa-se porções do itabirito com intercalação de bandas milimétricas de óxidos/hidróxidos de manganês. Sua textura é lepidogranoblástica e a granulação é média a fina. Possui foliação paralela ao bandamento muitas vezes pouco definido, com alternância de bandas sub-milimétricas de quartzo e óxidos de ferro. Os cristais de quartzo são subédricos e apresentam em geral hábito alongado. O padrão textural da hematita é predominantemente lamelar e seus cristais são subédricos.

Figura 3: Textura geral do itabirito em microscópio de luz refletida. Hematita lamelar (cinza claro), quartzo (cinza escuro)



Fonte: Autoria própria, 2021.

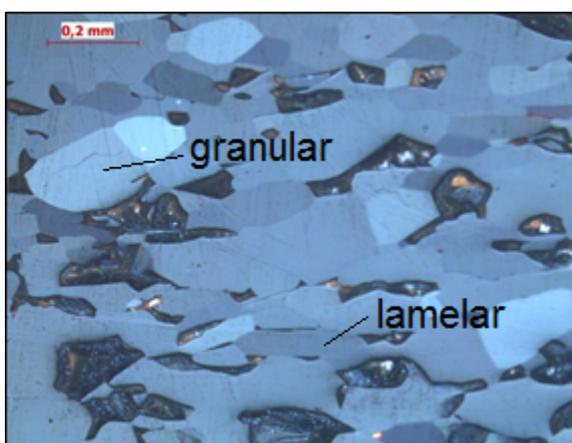
Figura 4: Detalhe da hematita lamelar do itabirito em imagem BSE



Fonte: Autoria própria, 2021.

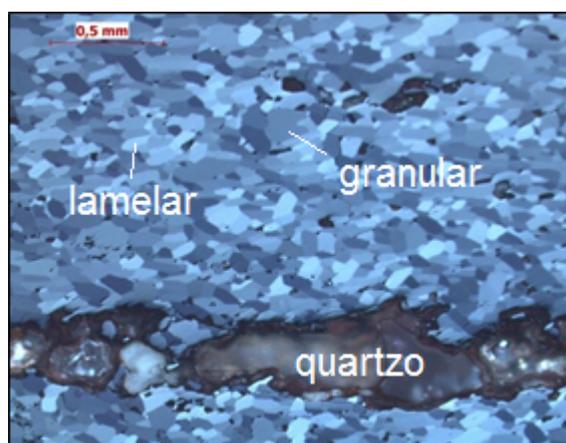
As amostras de minério de ferro lamelar e granular são assim classificadas por possuírem hematita de dois tipos morfológicos (Figuras 5 a 8). Os minerais principais são hematita lamelar (50-70%), hematita granular (20-70%), quartzo (3-20%) e sericita (5%), e a granulação varia de fina a média. Rara pirita e apatita ocorrem como minerais acessórios. A textura da rocha é lepidogranoblástica. Quartzo ocorre na forma de lentes dispostas paralelas a esta foliação, e possuem em geral granulação maior que a hematita (Figura 6). A amostras são frequentemente muito compactas, sendo difícil a identificação dos limites dos cristais em seção polida.

Figura 5: Detalhe da textura do minério de ferro hematítico lamelar e granular em microscópio de luz refletida



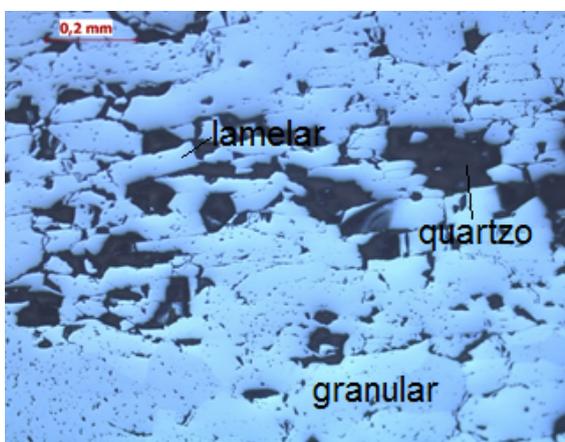
Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 6: Visão geral da textura do minério lamelar e granular em microscópio de luz refletida. Na parte inferior da imagem há vênula de quartzo



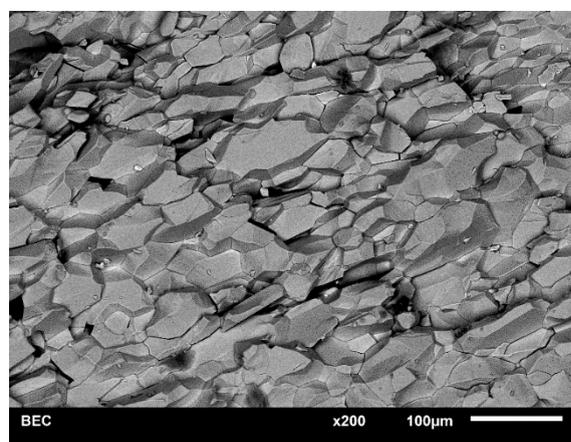
Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 7: Detalhe da textura do minério lamelar e granular em microscópio de luz refletida



Fonte: Autoria própria, 2021.

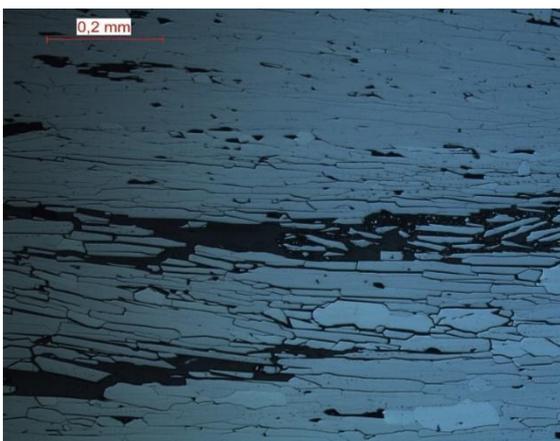
Figura 8: Detalhe da forma da hematita granular em imagem BSE



Fonte: Autoria própria, 2021.

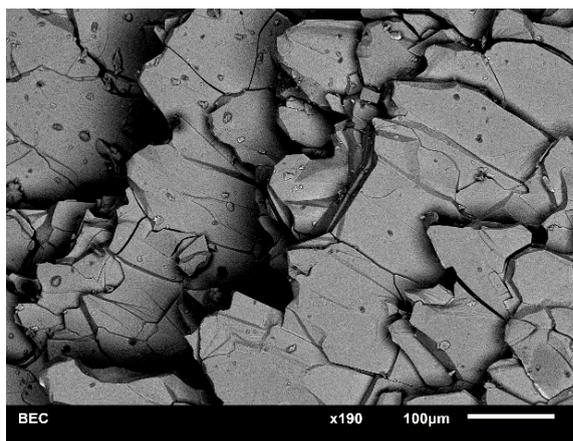
O minério de ferro lamelar tem como mineral predominante a hematita lamelar, a qual ocorre com granulometria frequentemente muito fina, sendo passível de classificação como minério microlamelar em algumas amostras (Figuras 9 e 10). Cristais classificados como microlamelares possuem espessura inferior a 125 μm . A mineralogia principal é constituída por hematita lamelar a microlamelar (80-95%), hematita granular (0-5%), quartzo (4-14%) e filossilicatos – sericita/caulinita sericita (0-5%). A textura da rocha é lepidoblástica. Cristais de hematita lamelar variam de euédricos a subédricos. A rocha possui foliação bastante marcante, penetrativa e contínua.

Figura 9: Detalhe da textura do minério hematítico microlamelar em microscópio de luz refletida



Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 10: Detalhe da hematita do minério microlamelar em imagem BSE

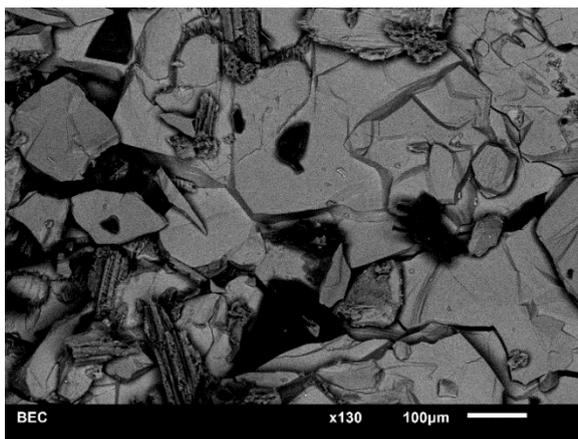


Fonte: Autoria própria, 2021.

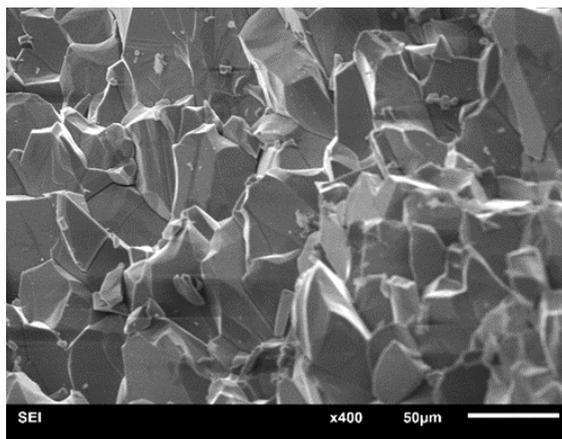
O minério lamelar manganésífero (Figuras 11 e 12) possui como diferencial do descrito anteriormente a presença de níveis de espessura milimétrica ricos em óxido/hidróxidos de manganês, que podem atingir até 5% do conteúdo mineralógico da amostra.

Figura 11: Imagem BSE do minério lamelar manganésífero

Figura 12: Detalhe da hematita lamelar do minério lamelar manganésífero em imagem SE



Fonte: Autoria própria, 2021.



Fonte: Autoria própria, 2021.

5. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado é notável que o depósito do Andrade apesar da aparente homogeneidade do minério, apresenta diferenças não apenas em termos de compactidade, mas também em termos texturais. Em termos de compactidade são descritos três tipos: compacto, semi-friável (ou semi-compacto) e friável. Os padrões texturais visualizados a partir da análise microscópica das seções variam entre lepidoblástico (hematita de formato microlamelar a lamelar), granoblástico (formato granular) e granolepidoblástico (lamelar e granular). O tamanho dos grãos de hematita apresentou variação entre 50 µm a 500 µm. A existência do padrão textural lamelar em muitas amostras estudadas por meio das seções deve-se ao elevado grau de metamorfismo presente na região de estudo (fácies anfíbolito), além da presença de zonas de cisalhamento.

No depósito de Andrade foram identificados quatro litotipos associados à mineralização de ferro: itabirito; minério lamelar; lamelar manganesífero e o lamelar granular. O itabirito é composto por quartzo, hematita lamelar e granular. Sua textura é lepidogranoblástica, devido ao predomínio de hematita lamelar em comparação com a granular. Quartzo apresenta indícios do processo de deformação sofrido pela rocha, pois seu hábito é alongado, paralelo à foliação da rocha. Os minérios lamelar e lamelar granular são composicionalmente parecidos, se diferindo apenas em termos texturais. No primeiro a granulometria é menor e a foliação da rocha é muito mais marcante e penetrativa. No segundo a foliação existe, mas é mais discreta. O minério manganesífero é texturalmente

semelhante ao minério lamelar, no entanto é marcante a presença de intercalações de níveis de Mn, um importante contaminante.

O modelo geológico de um depósito pode incorporar, além dos diferentes níveis de compacidade e teores, os diferentes níveis texturais uma vez que cada litotipo associado à mineralização terá dureza e graus de liberação distintos, o que influenciará no rendimento do processo de cominuição e beneficiamento adotado. Um maior controle do material predominante na alimentação da usina poderia gerar resultados mais previsíveis e processos adequados e mais eficientes. O estudo feito é importante para direcionar estudos de processamento mineral, bem como prever o comportamento dos minérios estudados na siderurgia.

Recomenda-se a continuidade do estudo, com caracterização química, determinação do PPC (percentual de perda por calcinação), análises granulométricas e do grau de liberação dos diferentes litotipos descritos.

REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F. DE; 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, n. 1–2, p. 29–58, 30 jun. 1998.

ALMEIDA, F. F. M. *O Cráton do São Francisco*. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, p. 349–364, 1977.

BABINSKI, M.; CHEMALE, F.; VAN SCHMUS, W. R. *The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. **Precambrian Research**, v. 72, n. 3–4, p. 235–245, abr. 1995.

CASTRO, P. DE T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A. L. (Org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.

DORR, J. V. N. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. US Government Printing Office, 1969.

GRASSO, C. B. *Geologia e Geometalurgia dos minérios de fosfato na base do manto de intemperismo da mina do Barreiro, Araxá*. 2015. 261 f. Tese de Doutorado, Curso de Geologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

HAGEMANN, S. G.; ANGERER, T.; DUURING, P.; ROSIÈRE, C. A.; FIGUEIREDO e SILVA, R.C.; LOBATO, L.; HENSLER, A.S.; WALDE, D.H.G. *BIF-hosted iron mineral system: a review*. **Ore Geology Reviews**, v. 76, p. 317–359, 2016.

HENSLER, A. S.; HAGEMANN, S. G.; BROWN, P. E.; ROSIÈRE, C. A. *Using oxygen isotope chemistry to track hydrothermal processes and fluid sources in itabirite-hosted iron ore deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. **Mineralium Deposita**, v. 49, n. 3, p. 293–311, 2014.

JANUZZI, A.; RAMOS, M. C. D.; ROSIÈRE, C. A.; GUIMARÃES, M. L. V. *A estruturação tectônica da mina do Andrade, NE do Quadrilátero Ferrífero, MG*. In: **V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos**, p. 351-353, 1995.

MDGEO. *Relatório técnico para a obtenção de outorga do rebaixamento do nível d'água subterrânea da Mina do Andrade*. Relatório interno CVRD, 2008.

PAGANIN NETO, M. *Estudo da influência do nível d'água nas análises de estabilidade dos taludes da cava da mina do Andrade*. 2016. 248 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

RAMOS, M. C. D.; ROSIÈRE, C. A.; HACKSPACHER, P. C.; SIEMES, H.; GUIMARÃES, M. L. V.; MORENO, M. M. T. *Tipologia e textura dos minérios de ferro da mina do Andrade (João Monlevade, MG)*. In: **Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia**, Sergipe, p. 459-463, 1996.

RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADA, N. *Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. **Geonomos**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 1994.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE, F. J. *Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - uma visão geral e discussão*. **Geonomos**, v. 8, n. 2, p. 27–43, 2000.

ROSIÈRE, C. A.; RIOS, F. J. *The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: The example of the Conceição Mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. **Economic Geology**, v. 99, n. 3, p. 611–624, 2004.

ROSIÈRE, C. A.; SIEMES, H.; QUADE, H.; BROKMEIER, H.; JANSEN, E. M. *Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite*. **Journal of Structural Geology**, v. 23, n. 9, p. 1429–1440, set. 2001.

ROSIÈRE, C. A.; SPIER, C. A.; RIOS, F. J.; SUCKAU, V. E. *The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview*. **Reviews Economic Geology**, v. 15, p. 223–254, 2008.

SALIBA, F. P. M. *Avaliação hidrogeotécnica da Fundação da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas (Minas Gerais)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SPIER, C. A.; OLIVEIRA, S. B. de; SIAL, A. N.; RIOS, F. J. *Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Precambrian Research*, v. 152, n. 3–4, p. 170–206, 20 jan. 2007.

VIEIRA, C. B.; ROSIÈRE, C. A.; PENA, E. Q.; SESHADRI, V.; ASSIS, P. S. *Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. REM: R. Esc. Minas*, v. 56, n. 2, p. 97–102, 2003.