

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

THALLES RIBEIRO DE MELLO

**MORFOLOGIA E RELAÇÕES CRISTALOGRÁFICAS EM AGREGADOS DE
HEMATITA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO/MG**

**CURITIBA
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

THALLES RIBEIRO DE MELLO

**MORFOLOGIA E RELAÇÕES CRISTALOGRÁFICAS EM AGREGADOS DE
HEMATITA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO/MG**

Projeto apresentado à disciplina de
Trabalho de Conclusão de Curso II
(GC-132), sob orientação do
Professor Dr. Leonardo Lagoeiro.

CURITIBA

2016

RESUMO

A caracterização microestrutural em formações ferríferas bandadas é um assunto que está em pauta principalmente em virtude do uso industrial do minério de ferro. Contudo a correlação existente entre contexto da geologia regional e as microestruturas não está completamente estabelecida. A literatura específica do Quadrilátero Ferrífero faz a separação da região em dois domínios principais de deformação. O metamorfismo segue esta tendência de modo análogo, não ultrapassando a fácies xisto verde a oeste num domínio considerado de baixa deformação. A leste, o contexto pode abranger até a fácies anfibolito, configurando assim maior metamorfismo. Este estudo elenca amostras do Quadrilátero Ferrífero, sendo que a maior parte é proveniente de áreas de mineração. Uma combinação de métodos de análise, como microscopia ótica, microscopia eletrônica e difração por elétrons retroespalhados (EBSD) foram utilizados. O resultado aponta que as morfologias encontradas nos cristais de hematita e sua relação com outros óxidos/hidróxidos de ferro variam conforme incremento das condições de metamorfismo e deformação. Nas formações ferríferas com menor deformação são preservadas microestruturas típicas dos estágios iniciais da transformação da magnetita para hematita e a textura não apresenta forte orientação, assim como não foram observadas orientações cristalográficas preferenciais. A leste, há uma forte mudança nas microestruturas, com o predomínio de cristais tabulares de hematita, em virtude de cisalhamento e intensa deformação, além de cristais maiores por causa da temperatura atingida na fácies anfibolito. Desta forma, os resultados obtidos se aproximam das conclusões retiradas da bibliografia.

Palavras chave: Minério de Ferro, Hematita, microestruturas, Quadrilátero Ferrífero.

ABSTRACT

The microstructure characterization of banded iron formation is a current subject, mainly due to the industrial use of iron ore. However, the comparison between existing context of the regional geology and the microstructures was not fully established. The specific literature in this area sets the separation of the region in two main domains of deformation and metamorphism. In the West, prevails the low metamorphic grade with weakly deformation rocks which do not exceed the greenschist facies. Towards the East the deformation and metamorphism increased and can reach the amphibolite facies. In this study, the samples are from Cuadrilátero Ferrífero and the majority came from mining areas. To carry out the analysis, a combination of optical, electron microscopy and electron backscatter diffraction (EBSD) techniques were applied. The results suggested that morphologies of hematite crystals and their relationship with the other iron oxides and hydroxides phases change as the deformation and metamorphism increase. In the less deformed and weakly metamorphosed iron rocks, the microstructures and crystallographic relationship typical of the first stage of the transformation of magnetite to hematite are preserved. The texture are somewhat random with no crystallographic preferred orientation observed. In the east, the microstructures change completely with predominance of tabular grain of hematite, due to the shearing and the intense deformation of the iron rocks. In this way, the results obtained are close to the conclusions drawn from the bibliography.

Keywords: Hematite, Iron Ore, microstructure, Cuadrilátero Ferrífero.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização	03
Figura 2: Coluna Estratigráfica do QF	04
Figura 3: Estruturas comuns em minério de Ferro do QF	11
Figura 4: Mina Itatiaiuçu	13
Figura 5: Mina Fábrica	14
Figura 6: Mina Córrego do Feijão	15
Figura 7: Mina Casa de Pedra	16
Figura 8: Mina Águas Claras	17
Figura 9: Mina do Baú	18
Figura 10: Mina do Pico	19
Figura 11: Mina Fazendão	21
Figura 12: Mina Gongo Soco	22
Figura 13: Mina Timbopeba	23
Figura 14: Mina Piedade	24
Figura 15: Mina Itabira	25
Figura 16: Transformação da Magnetita em Hematita	26
Figura 17: Modelo de evolução da morfologia conforme deformação	28
Figura 18: Exemplos de minas do QF	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista de Materiais	10
------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS

QF = Quadrilátero Ferrífero

USGS= Serviço Geológico Americano

EBSD= Electron backscatter diffraction (Difração por elétrons retroespalhados)

SEM/MEV= Microscopia eletrônica de varredura

OM= Microscopia óptica

Sumário

1. Introdução	2
1.1 Localização	3
1.2 Contexto e problema	4
1.3 Objetivos	4
2. Contexto geológico	5
2.1 Estratigrafia	5
2.2 Domínios estruturais e metamórficos do Quadrilátero Ferrífero	7
3. Materiais e métodos	10
4. Resultados	11
4.1 Setor oeste	12
4.1.1 Mina de Itatiaiuçu	13
4.1.2 Mina de Fábrica	14
4.1.3 Mina Córrego do Feijão	15
4.1.4 Mina Casa de Pedra	16
4.2 Setor Central (Transicional)	16
4.2.1 Mina Águas Claras	17
4.2.2 Mina do Baú	18
4.2.3 Mina do Pico	19
4.3 Setor Leste	19
4.3.1 Mina Fazendão	21
4.3.2 Mina Gongo Soco	22
4.3.3 Mina Piedade	23
4.3.4 Mina de Timbopeba	24
4.3.5 Mina de Itabira	25
5. Discussão	26
6. Conclusão	30
7. Referências bibliográficas	31

1. Introdução

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma região no sudeste de Minas Gerais com cerca de 7000 km² que possui grande importância histórica e econômica devido a importantes reservas de Ferro e Ouro. O ferro da região foi fundamental para a industrialização de base do país na primeira metade do século XX e até hoje ainda há grandes reservas de Ferro. Em razão de suas grandes reservas, a geologia da região vem sendo estudada em detalhe por conta de interesse econômico e científico. Dentre os estudos regionais clássicos, destacam-se o mapeamento pioneiro de Dorr (1969) em parceria com o serviço geológico americano (USGS) e a revisão estratigráfica proposta por Alkmin & Markshak (1998). São trabalhos de cunho regional que identificaram as feições geomorfológicas, estruturais e litoestratigráficas das rochas do Quadrilátero Ferrífero. Todavia, somente a partir da década de 1990 importantes trabalhos sobre as microestruturas do minério de ferro começaram a ser publicados. Dentre os trabalhos destacam-se os de Rosière & Chemale (1991), Lagoeiro (1998 A, 1998 B), Rosière *et al.* (1993, 2001, 2008), Barbosa (2009), Mendes & Lagoeiro (2012) e Graça *et al.* (2015). A caracterização microestrutural ganhou muita relevância por contribuir para aumento da eficácia do beneficiamento para cada tipo de minério de ferro. (Dwarapudi *et al.* 2008). Desta forma, empresas de mineração começaram a perceber a importância de estudos que detalham a composição mineralógica e microestrutural dos diferentes minérios de ferro (Graça *et al.* 2015). Mesmo assim, são poucos os trabalhos que integram estudos microestruturais com outros de cunho regional. Com o aumento da demanda e avanços técnicos, houve um grande incremento nos métodos de caracterização de minérios, principalmente por microscopia óptica, com novas técnicas de classificação automática elaborada por Iglesias *et al.* (2011). Com a introdução de métodos analíticos mais robustos envolvendo técnicas de difração acopladas aos microscópios eletrônicos de varredura (MEV), passou-se a completa automação dos métodos de aquisição e determinação de parâmetros microestruturais e também cristalográficos. Nesse trabalho foi utilizada combinação das técnicas de microscopia eletrônica de varredura com difratômetro de elétrons retroespalhados (EBSD) e microscopia óptica para uma completa caracterização dos tipos microestruturais encontrados nos minérios de ferro do QF.

1.1 Localização

O Quadrilátero Ferrífero está localizado nas proximidades de Belo Horizonte e abrange uma área com cerca de 7000 km² no sul do Cráton São Francisco, como pode ser visto na Fig. 01.

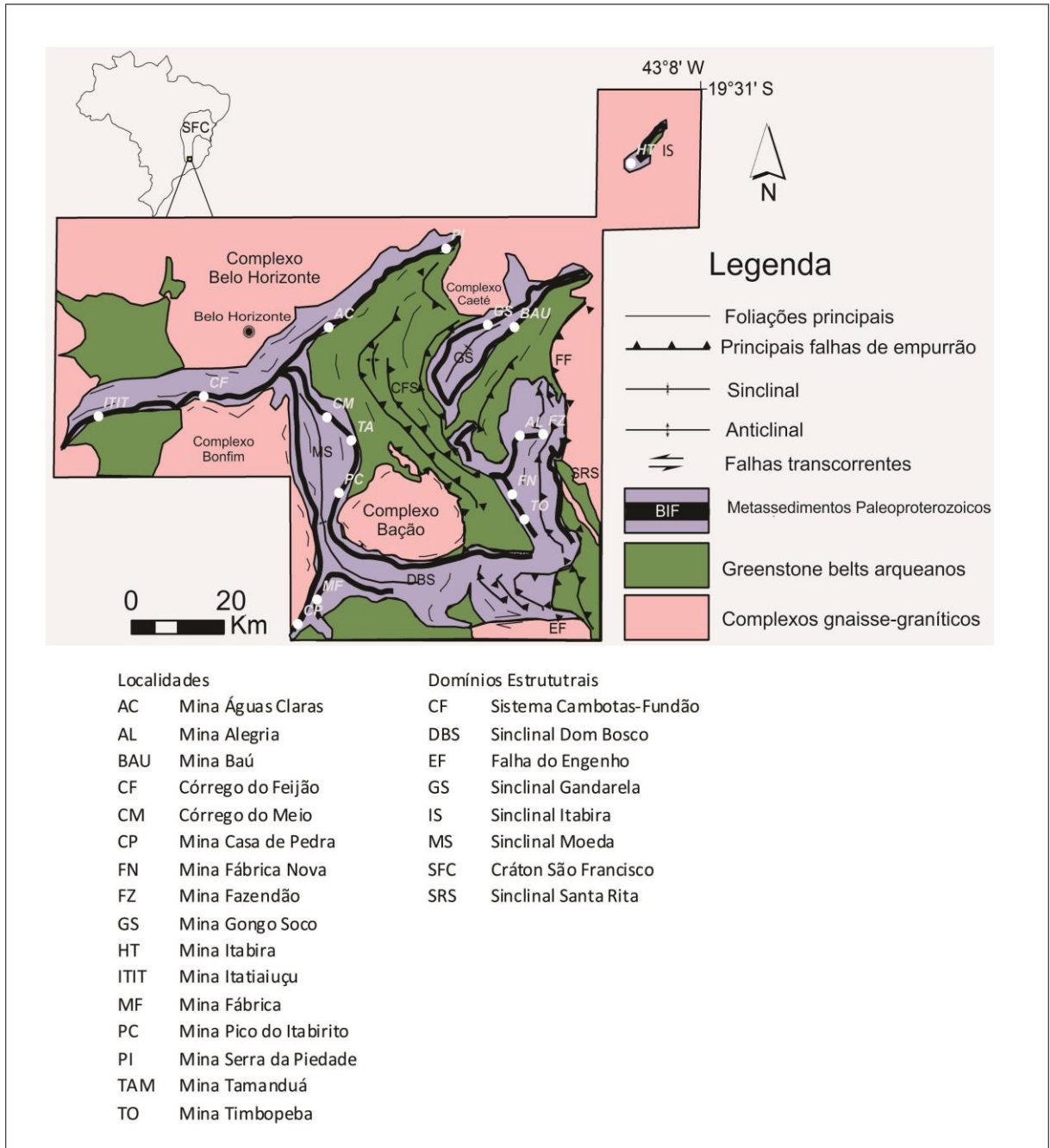


Figura 1: Localização das minas e detalhe da geologia regional do Quadrilátero Ferrífero. Em preto: formações ferríferas bandadas (Fm. Cauê). As siglas indicam os locais onde são provenientes as amostras. (Mod.Dorr 1969)

1.2 Contexto e problema

Não obstante o grande avanço em termos de caracterização de microestruturas e das texturas cristalográficas das formações ferríferas do QF, há uma lacuna observada quando se trata da identificação de tipos microestruturais. Isso é bastante relevante principalmente na indústria de processamento mineral, como é o caso do minério de ferro. Os trabalhos de natureza regional de maior relevância foram iniciados por Dorr (1969) e muitos outros esforços de autores posteriores promoveram o reconhecimento das principais feições estruturais do QF e também do tipo de metamorfismo registrados em suas rochas. Já a morfologia dos diferentes tipos de formações ferríferas é algo ainda pouco explorado no QF. Apenas recentemente com a escassez do minério de alto teor, e também da necessidade de reaproveitar rejeitos de finos de minério percebeu-se a importância da parametrização dos aspectos morfológicos dos agregados minerais das formações ferríferas. O resultado é aqui apresentado na forma de individualização de tipos de microestruturas especialmente em agregados de hematita nas diferentes minas. A intenção é agrupá-los por grupos de tipos afins, particularmente considerando modelos atuais de compartimentação deformacional e metamórfica do QF.

1.3 Objetivos

São dois os principais objetivos a serem alcançados nesse estudo. Um de cunho geral e outro específico. Do ponto de vista abrangente, o objetivo é estabelecer uma relação entre tipos microestruturais (morfológicos) de agregados de hematita em domínios previamente determinados para o QF em termos da deformação registrada em suas rochas, bem como o metamorfismo regional.

Do ponto de vista específico pretende-se classificar os agregados de cristais de hematita encontrados em diferentes contextos deformacionais e metamórficos de acordo com a forma de seus grãos e também a sua razão axial. Para assim fazer uma comparação dos tipos microestruturais com as orientações cristalográficas preferenciais, considerando que os tipos microestruturais são oriundos de diferentes mecanismos de deformação e metamorfismo.

2. Contexto geológico

2.1 Estratigrafia

O QF é um exemplo clássico de terreno granito-greenstone e está localizado na borda sudeste do Cráton do São Francisco (Fig. 01). Seu embasamento é composto por rochas graníticas e gnáissicas-migmatíticas na forma de domos aproximadamente circulares. A idade dessas rochas situa-se num limite de tempo desde o Mesoarqueano (3.2 Ga.) até o Neoarqueano (2.61 Ga) (Carneiro *et al.* 1995). As rochas supracrustais compreendem o Grupo Nova Lima de idade Arqueana, composto por rochas ultramáficas, riolitos, xistos, formações ferríferas bandadas do tipo Algoma e quartzitos. Sobreposto ao Grupo Nova Lima encontra-se o Supergrupo Minas de idade Paleoproterozoica. São rochas de natureza vulcânica, clástica e química, sendo que no Grupo Itabira, encontram-se extensos depósitos de formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior de onde são provenientes as amostras estudadas. (Alkmin & Marshak 1998) As idades atribuídas para essas rochas situam-se entre 2.5 e 1.8 Ga. (Carneiro *et al.* 1995). Uma síntese da litoestratigrafia (fig. 2) demonstra a posição das formações ferríferas Paleoproterozoicas da Formação Cauê (destacadas em preto). Uma breve síntese das litologias e idades segundo Alkmin & Marshak (1998) pode ser observada a seguir:

- 1) Embasamento Cristalino Arqueano: Constituído por gnaisses, migmatitos (3.2- 2.9 Ga) e granitóides (2.78 - 2.61 Ga).
- 2) Supergrupo Rio das Velhas: Constituído por greenstone belts, riolitos (2.78 Ga) intercalados com rochas sedimentares (2.8 Ga), entre elas formações ferríferas bandadas (BIF) do Tipo Algoma.
- 3) Supergrupo Minas: Constituído por rochas metassedimentares (2.65 - 2.12 Ga), que formam as cristas no relevo que permitem identificar geomorfologicamente o Quadrilátero, entre elas BIF no tipo Lago Superior (Formação Cauê).
- 4) Intrusivas pós Minas: Constituídas por Pegmatitos (2.08 Ga).

5) Grupo Itacolomi: Constituído por arenitos grossos (1.75 Ga) e conglomerados polimíticos com clastos de BIF.

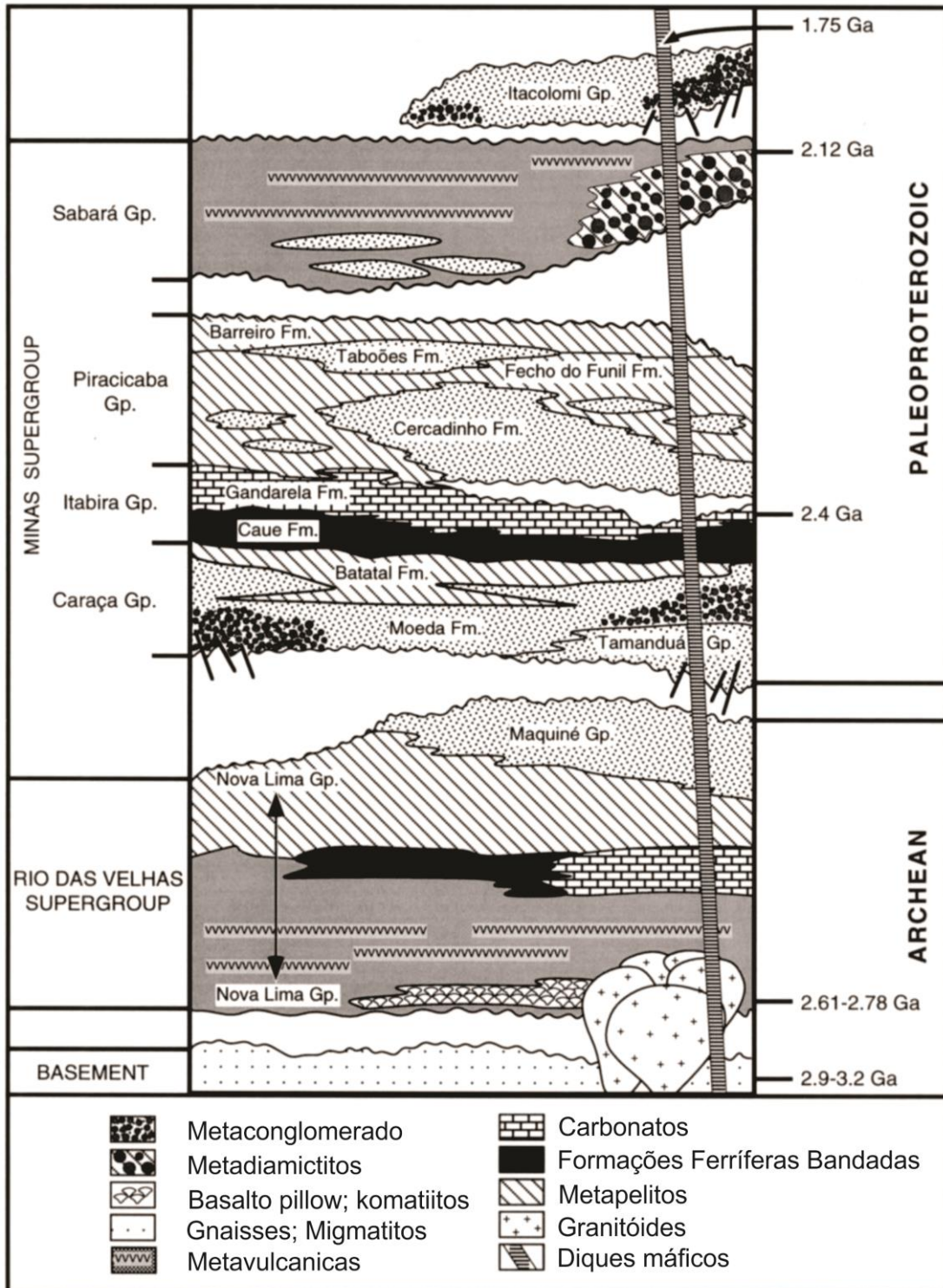


Figura 2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Mod. Alkmim & Marshak (1998)

2.2 Domínios estruturais e metamórficos do Quadrilátero Ferrífero.

A deformação no QF é bastante complexa, pois há evidências de várias fases de deformação que envolvem 5 eventos principais: O ciclo orogênico Jequié (2.8-2.6 Ga); ciclo orogênico Transamazônico (2.1-1.8 Ga); tafrogênese Estateriana (1.78-1.7 Ga); o ciclo orogênico Brasileiro (0.7-0.45 Ga). (Alkmim & Marshak 1998).

Os principais eventos metamórficos que envolvem as Formações Ferríferas Paleoproterozoicas do Quadrilátero Ferrífero são o ciclo Transamazônico (2.1-1.8 Ga) e ciclo Brasileiro (0.7 - 0.45 Ga.). O evento Transamazônico gerou falhas e dobras nas supracrustais. Além disso, boa parte das estruturas geradas neste evento foram obliteradas por zonas de cisalhamento próximo aos domos do embasamento, e nas regiões à leste do QF, onde o evento Brasileiro foi mais intenso.

O Evento Brasileiro gerou faixas móveis no entorno do Craton São Francisco. No QF, a polaridade é de Leste para Oeste, com deformação mais intensa na borda Leste. Junto com a deformação ocorre o metamorfismo de grau variado indo de xisto verde a anfíbolito. O intervalo de temperatura situa-se entre 250-300°C na borda oeste e pelo menos 450°C na borda leste. (Pires & Bertolino, 1991; Alkmim & Marshak, 1998).

A geometria do QF é delineada pelo conjunto de sinclinais e anticlinais entre domos de rochas graníticas, migmatíticas e gnaisses dos complexos Bonfim, Bação, Belo Horizonte, Santa Bárbara e Caeté. Os mergulhos das Serras que dão nomes as estruturas sinformais e antiformais são os pontos topográficos culminantes da região (Fig. 1). As Serras (pontos culminantes) são onde os diferentes tipos morfológicos de minério de ferro são observados, e por onde é possível separar os domínios. Uma breve descrição das Serras do QF pode ser vista a seguir:

Serra de Itatiaiuçu

Ao Oeste encontra-se Itatiaiuçu. É uma região com intensa atividade de mineração onde se encontram as rochas que melhor preservam o bandamento original das formações ferríferas. A rocha assemelha-se a um jaspelito com poucos sinais de deformação denotado pelo seu bandamento regular de espessura variável. A Serra de Itatiaiuçu mostra o bandamento dobrado em várias escalas e estilos (Fig

18 A) e é nesses locais que o minério de ferro apresenta o maior teor em magnetita. (Mendes & Lagoeiro, 2012).

Serra do Curral / Rola Moça

Em direção leste, na Serra do Curral, as formações ferríferas também são portadoras de porfiroclastos de magnetita em matriz hematítica e goetítica. A continuidade desta Serra é parte de uma estrutura maior denominada de homoclinal Serra do Curral / Rola Mola. Apenas o flanco normal do sinclinal que se estende do extremo oeste do QF até sua extremidade leste aflora neste local. (Mendes & Lagoeiro, 2012)

Serra da Piedade

Continuando em direção a Leste, a Serra do Curral transiciona para a Serra da Piedade, onde a deformação se mostra mais intensa através de dobramentos de estilos variáveis. Apesar disso, o minério apresenta ainda teores elevados de magnetita facilmente perceptíveis com o uso de imã. As dobras observadas nas formações ferríferas nesse local apresentam estilos variáveis, as vezes desarmônicas, outras apertadas a isoclinais com rompimento de flancos. Em conjunto as Serras Itatiaiuçu, Curral e Piedade tem uma direção aproximada SW-NE. (Mendes & Lagoeiro, 2012)

Serra da Moeda

O Sinclinal homônimo cujo trend é N-S tem minérios constituídos essencialmente por itabiritos típicos. Apresentam bandamentos de pouca espessura, da ordem de poucos milímetros, em que se alternam bandas de quartzo e óxidos de ferro (principalmente hematita). A estrutura do Sinclinal Moeda é de uma dobra recumbente com flanco leste invertido e com flanco oeste normal, semelhante ao que ocorre no homoclinal da Serra do Curral. No lado Oeste a estrutura faz contato com quartzitos e granitos do Complexo Bonfim através de zonas de cisalhamento normais. A estrutura segue até seu extremo Sul onde se encontra a Mina de Casa de Pedra. Lá são lavrados hematita compacta (sem bandamento visível macroscopicamente), e itabiritos com bandas de espessura variáveis. Nesses locais

são observadas dobras apertadas com desenvolvimento de clivagem plano axial que corta o bandamento composicional. (Mendes & Lagoeiro, 2012)

Sinclinal Dom Bosco

Em direção a Leste o Sinclinal Moeda (Serra da Moeda) migra para o Sinclinal Dom Bosco cuja direção é Oeste-Leste e que vai até as proximidades de Ouro Preto/MG, onde há o contato com o Sinclinal de Ouro Preto-Mariana. (Mendes & Lagoeiro, 2012)

Anticlinal Mariana - Ouro Preto

No Anticlinal Mariana - Ouro Preto ocorrem feições mais típicas de deformação mais intensa e de maior grau metamórfico. O Anticlinal Mariana segue em direção norte mais ou menos na direção N-S, onde faz contato com os quartzitos do Caraça, que é a parte frontal do empurrão do sistema de falhas de Água Quente. Por quase todo o anticlinal de Mariana, encontram-se em operação minas da Vale, como as minas de Timbopeba, Alegria, Fabrica Nova, Fazendão. Nessas o minério tem as características típicas da deformação Neoproterozoica, com o desenvolvimento de foliação penetrativa e zonas de cisalhamento intraestratais. Há forte transposição dos elementos da trama original, atribuídas às deformações brasileiras. A vergência das estruturas é para oeste, com forte mergulho para leste. (Mendes & Lagoeiro, 2012)

Sinclinal de Itabira

Em direção a Norte, há a estrutura de Itabira em sinformes onde as amostras estão mais fortemente foliadas com forte transposição e desenvolvimento de zonas de cisalhamento. Não há cristais macroscópicos de magnetita e é a região mais intensamente deformada do QF. A seguir serão descritas as microestruturas seguindo o critério observado nas separações macroscópicas das amostras. o conjunto de amostras foi dividido naquelas que registram as deformações menos intensas a oeste, ou seja as de Itatiaiuçu e Curral. As com deformações intermediárias e transicionais podem ser observadas nas amostras das minas de Tamanduá, Pico e Piedade. As mais intensamente deformadas são representadas

especialmente pela Mina de Itabira, junto com a de Fazendão e outras da borda leste do QF. (Mendes & Lagoeiro, 2012)

3. Materiais e métodos

Todas as amostras utilizadas nesse estudo são provenientes do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, na maior parte de áreas de mineração por conterem amostras mais preservadas do intemperismo. Foram agrupadas para análise fotos de afloramentos, fotomicrografias, imagens de microscópio eletrônico de varredura (SEM) e imagens EBSD (Electron backscatter diffraction). Com base na Literatura sobre microestruturas em Formações Ferríferas bandadas, e sobre os domínios regionais de deformação de Alkmim & Marshak (1998), os materiais foram agrupados em diferentes domínios de morfologia de hematita, relacionados com a deformação. A tabela 1 elenca as minas e os materiais disponíveis de cada uma. Os materiais foram tratados e editados com o software CorelDrawX7®.

Nº	Mina	Sigla	Foto afloramento	Fotomi- crografia	SEM	EBSD
1	Águas Claras	AC			X	X
2	Baú	BA		X	X	X
3	Córrego do Feijão	CF	X	X	X	X
4	Casa de Pedra	CP	X	X	X	X
5	Fábrica	MF	X	X		X
6	Fazendão	FZ		X	X	X
7	Gongo Soco	GS		X	X	X
8	Itabira	HT	X	X	X	X
9	Itatiaiuçu	IT	X	X	X	X
10	Pico	MP	X	X	X	X
11	Piedade	PI	X	X		X
12	Timbopeba	TO		X	X	X

Tabela 1: Materiais disponíveis para análise.

As microestruturas ou morfologia dos arranjos espaciais dos cristais ou grãos de hematita refletem os processos operantes durante sua formação. A maneira

como os cristais de hematita se arranjam espacialmente, ou seja, seus arranjos geométricos são fundamentais para a determinação da história de sua formação. Outro ponto importante que deve ser considerado são os arranjos cristalográficos. Esses são os mais difíceis serem obtidos, principalmente no caso dos óxidos de ferro por se tratarem de minerais opacos. Na luz refletida muitas características podem ser determinadas, porém aspectos cristalográficos, como a textura dos arranjos geométricos, necessitam de técnicas especiais. A técnica mais utilizada é a difração de elétrons retroespalhados (EBSD). Na caracterização desses agregados tentou-se aplicar as duas técnicas quando possível.

4. Resultados

Para contextualizar os resultados, algumas feições macroscópicas do QF serão apresentadas. Macroestruturas mais comuns são oriundas de cavalgamentos e transcorrências no Quadrilátero Ferrífero. São falhas de natureza dúctil-rúptil, com geração de foliação plano axial e dobras apertadas a isoclinais, com transposições variáveis, como demonstradas na Fig. 3.

A descrição das microestruturas seguiu o critério de compartimentação regional da deformação e do metamorfismo como descrito na literatura. Dessa forma um primeiro conjunto de microestruturas foi atribuído ao setor oeste. No setor leste encontra-se o conjunto de amostras mais representativas de deformação mais intensa. Entre os dois extremos está um domínio transicional em que encontrados tipos com ou menos intensidade de deformação.

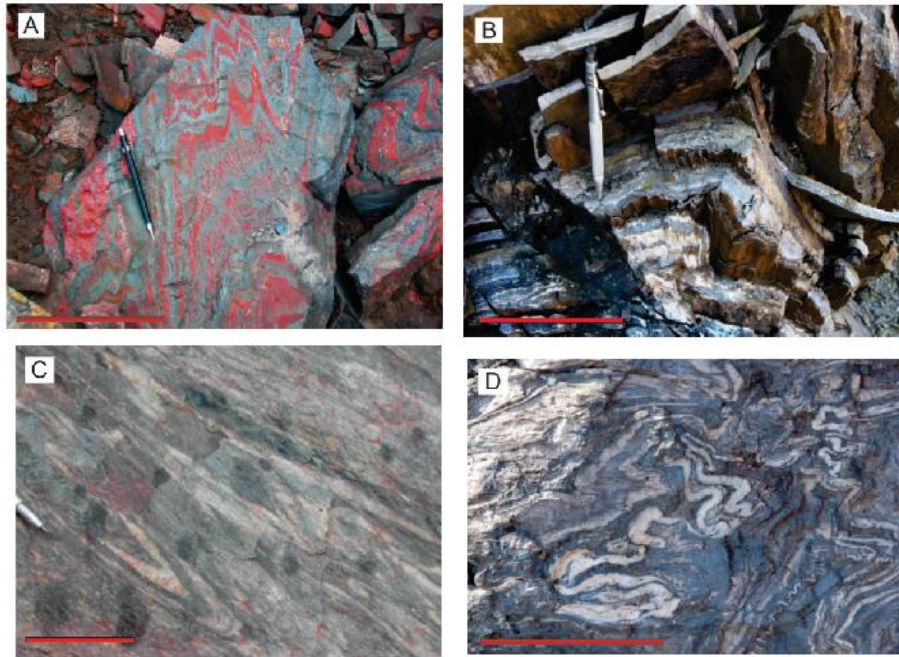


Figura 3: Estruturas comuns em minério de ferro no QF. A) Bandamento composicional dobrado, Mina de Itatiaiuçu. Escala: 15cm. B) Dobras com clivagem plano axial desenvolvida, Mina de Córrego do Feijão. Escala: 15cm. C) Dobras intrafoliares sem raízes, Mina de Itabira. Escala: 7 cm. D) Dobras disarmônicas, Serra de Piedade. Escala: 7cm.

4.1 Setor oeste

Compreende o setor do QF que abrange rochas ferríferas com poucos sinais de deformação, como por exemplo a presença marcante de magnetita e a ausência de foliação penetrativa com evidências de transformação controladas cristalograficamente em virtude da dissolução da magnetita e precipitação de hematita. Cristais longos e delgados de goetita indicam influência tectônica no crescimento deste mineral. Sombras de pressão em porfiroclastos de magnetita mostram crescimento de cristais fibrosos de quartzo e óxidos-hidróxidos de ferro. A morfologia da magnetita é granular, intensamente fraturada com superfícies irregulares e tamanhos variáveis. Ainda há relações complexas entre as fases magnetita, hematita e goetita. Microscopicamente consistem em bandas magnetita-hematita com diferentes proporções. Há porções mais oxidadas onde é possível observar a formação de hematita em cristais tabulares levemente orientados na direção do bandamento composicional. A maior parte das orientações observadas é decorrente das relações cristalográficas observadas durante a transformação magnetita para hematita segundo Barbosa & Lagoeiro (2010). Com relação ao aspecto macroscópico, algumas preservam feições originais como grãos de

magnetita parcialmente oxidadas para hematita. O bandamento observado deve-se a alternância de bandas de quartzo e bandas de hematita/magnetita. A geometria das bandas são paralelas a suavemente onduladas. Em alguns locais tem aspecto de jaspelitos, com fino bandamento composicional. O setor oeste abrange as minas de Itatiaiuçu, Fábrica, Casa de Pedra e Córrego do Feijão, descritas nas figuras 4 a 7. Essas minas estão no flanco oeste do Sinclinal Moeda.

4.1.1 Mina de Itatiaiuçu

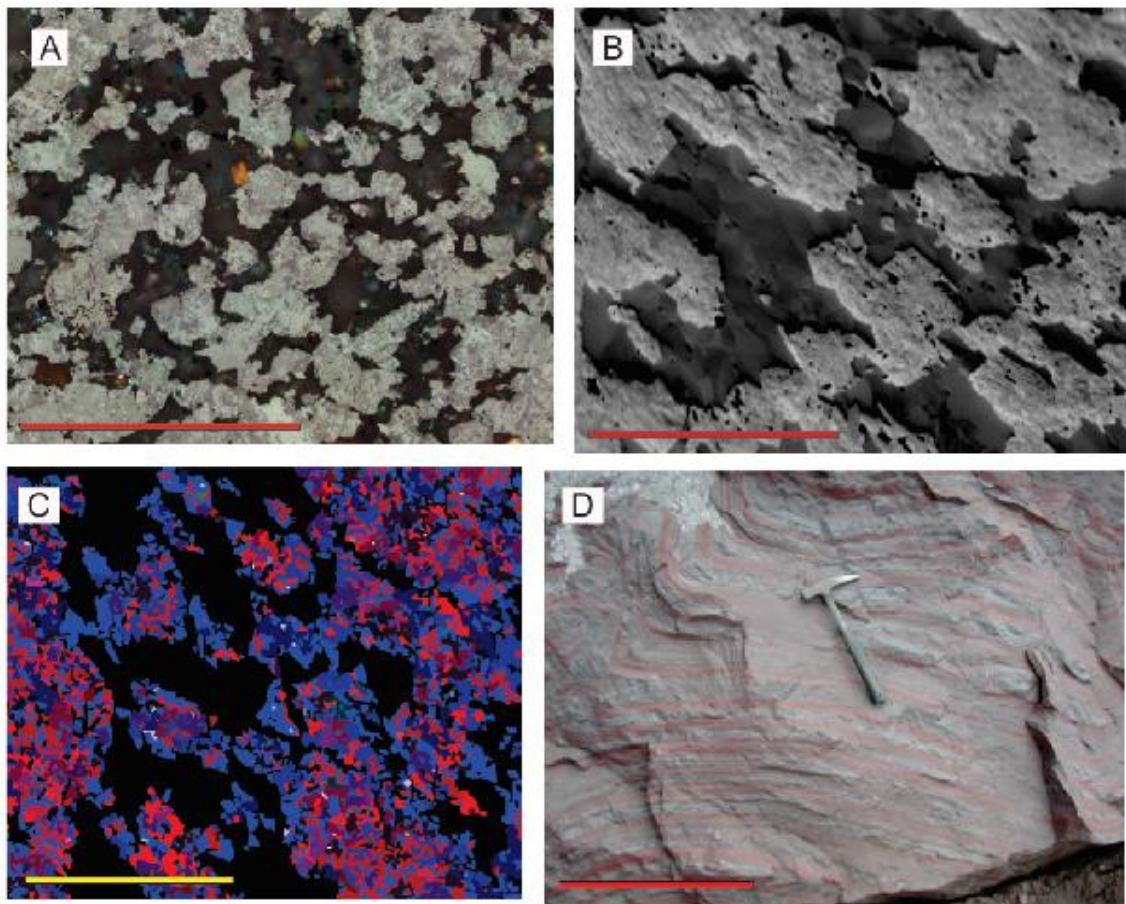


Figura 4: Mina de Itatiaiuçu. A) OM, escala = 0,2mm. B) SEM, escala = 0,2mm. C) EBSD, vermelho = magnetita (35%); azul = hematita (45%), escala = 2mm. D) Afloramento de itabirito bandado, escala = 45cm.

As amostras provenientes da Mina de Itatiaiuçu é composta por cristais de granulação fina a média. Macroscopicamente é possível observar bandamento sedimentar preservado, com foliação muito fraca. Na microscopia foi observado que a morfologia da hematita é predominantemente granular, assim como os cristais de magnetita, que ocorrem de forma abundante. Verifica-se a existência de agregados policristalinos. Portanto trata-se de material com grau de deformação muito baixo,

com teores acima 30% de magnetita e apresenta morfologia da hematita e da magnetita predominantemente granular.

4.1.2 Mina de Fábrica

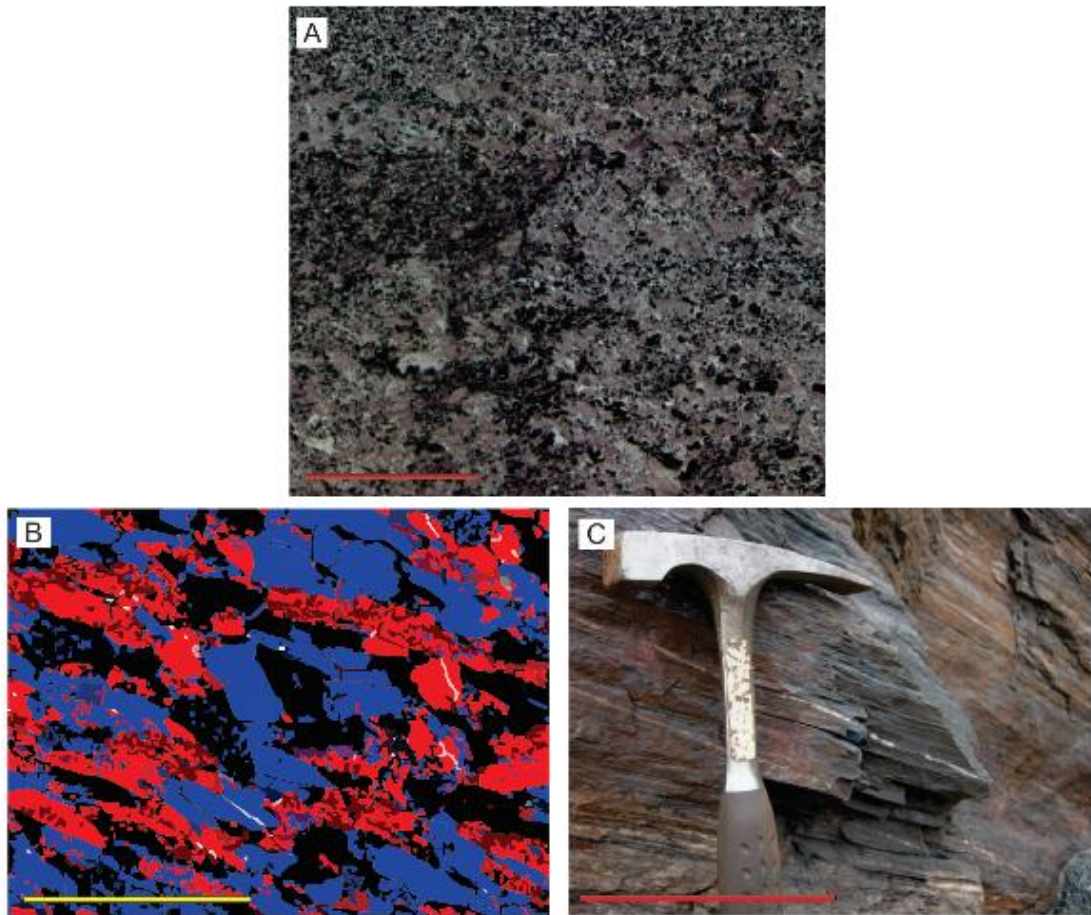


Figura 5: Mina de Fábrica. A) OM escala=0,2mm B) EBSD, vermelho = magnetita (40%) , azul = hematita (50%) escala = 0,2mm. C) Foto de Afloramento, minério de ferro finamente laminado, escala = 20 cm.

O material proveniente da Mina de Fábrica é composto por cristais de granulação fina a média. A morfologia da hematita é predominantemente granular, assim como os cristais de magnetita que ocorrem de forma abundante. A trama da rocha é fracamente foliada, com bandamento sedimentar parcialmente preservado. Trata-se, portanto de material com grau de deformação baixo a muito baixo, com teores acima de 40% de magnetita com o desenvolvimento morfológico da hematita e da magnetita predominantemente granular.

4.1.3 Mina Córrego do Feijão

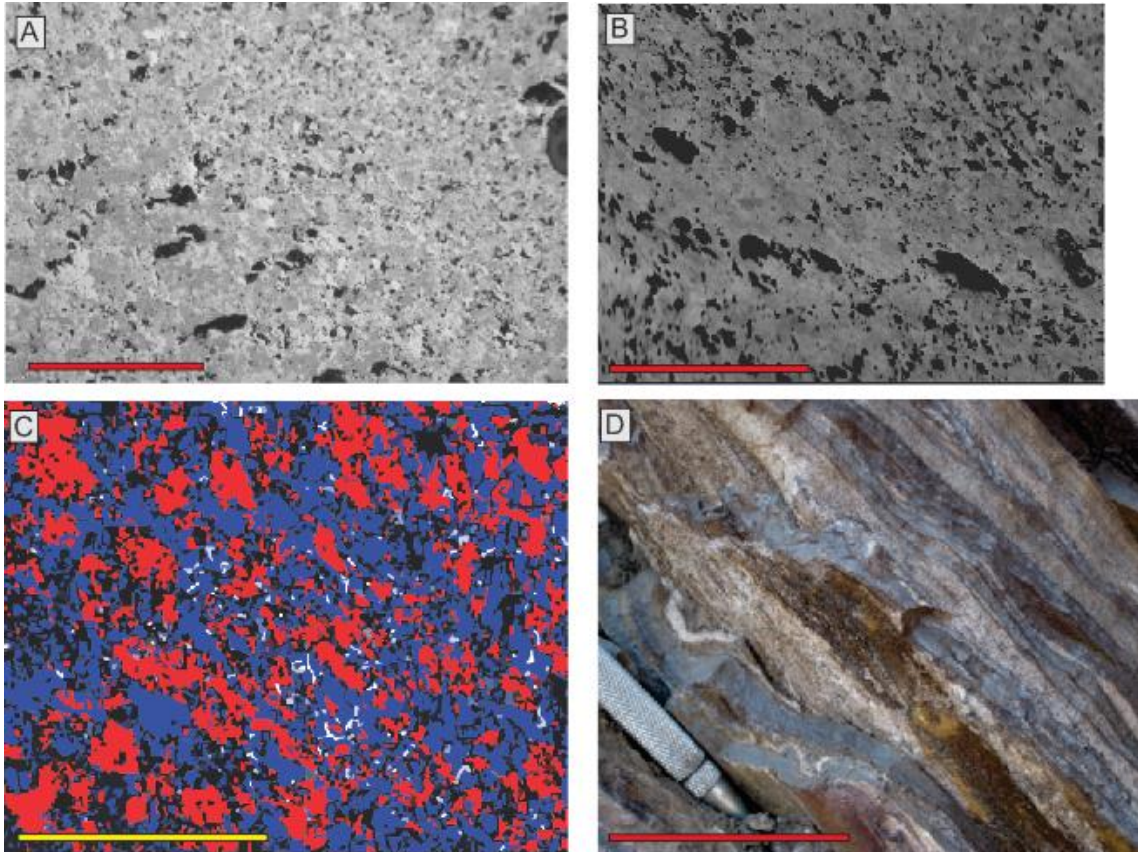


Figura 6: Mina Córrego do Feijão. A) OM, escala = 0,2mm. B) SEM, escala = 0,2mm. C) EBSD, vermelho = magnetita (30%) , azul = Hematita (40%), escala = 0,2mm. D) Afloramento. Bandas escuras = magnetita+hematita, bandas claras = quartzo. Escala = 5 cm.

O material proveniente da Mina Córrego do Feijão é composto por cristais de granulação fina. A morfologia da hematita é predominantemente granular, assim como os cristais de magnetita que ocorrem de forma abundante. A trama da rocha é fracamente foliada, com desenvolvimento de textura granolepidoblástica. Verifica-se o desenvolvimento da hematita circundando os porfiroclastos de magnetita com fraca orientação. Trata-se de material com grau de deformação baixo a muito baixo, com 30% de magnetita, e cuja morfologia da hematita e da magnetita é predominantemente granular com fraca orientação.

4.1.4 Mina Casa de Pedra

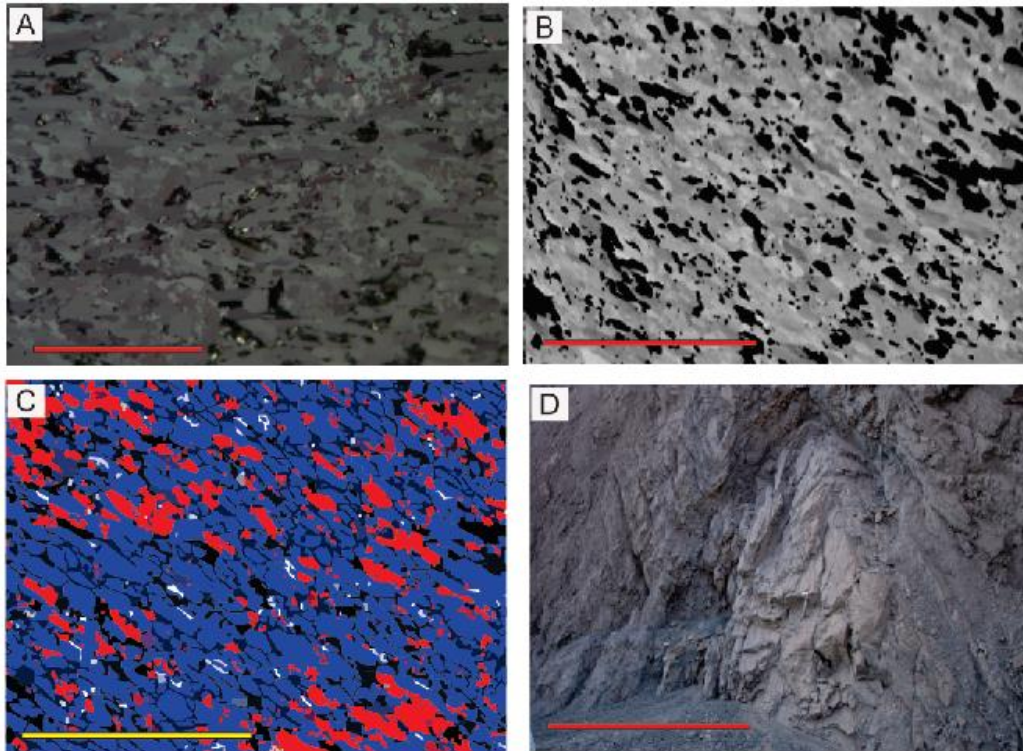


Figura 7: Mina Casa de Pedra. A) OM, escala = 0,2mm. B) SEM, escala = 0,2 mm. C) EBSD, vermelho = magnetita (15%); azul = hematita (80%), escala = 0,2mm. D) Dobra apertada no minério hematítico. Escala = 1,5m.

O material proveniente da Mina Casa de Pedra é composto por cristais de granulação muito fina, com granulometria com cerca de 0,2 mm. A morfologia é predominantemente tabular, com regiões com morfologia granular próximo aos porfiroclastos de magnetita. A magnetita é granular e levemente achatada no sentido paralelo à foliação. A trama da rocha é foliada com desenvolvimento de feições miloníticas de recristalização dinâmica localizadas. Portanto trata-se de material com grau de deformação moderado a baixo cujos teores estão acima de 10% de magnetita e que apresenta morfologia tabular da hematita moderadamente desenvolvida.

4.2 Setor Central (Transicional)

Compreende o setor central do QF. São rochas com sinais de deformação intermediária, em comparação entre os setores leste e oeste. O grau de oxigenação da magnetita é maior que no setor oeste, com porções com porfiroclastos de magnetita sem muitas feições de deformação. Os mecanismos de deformação são

os mesmos, porém com um desenvolvimento maior. O Setor Central abrange as minas de Águas Claras, do Pico e do Baú, descritas nas figs. 8 a 10. As minas de Águas Claras e do Pico estão no flanco leste do Sinclinal Moeda, enquanto a Mina do Baú no flanco sudeste do Sinclinal Gandarela.

4.2.1 Mina Águas Claras

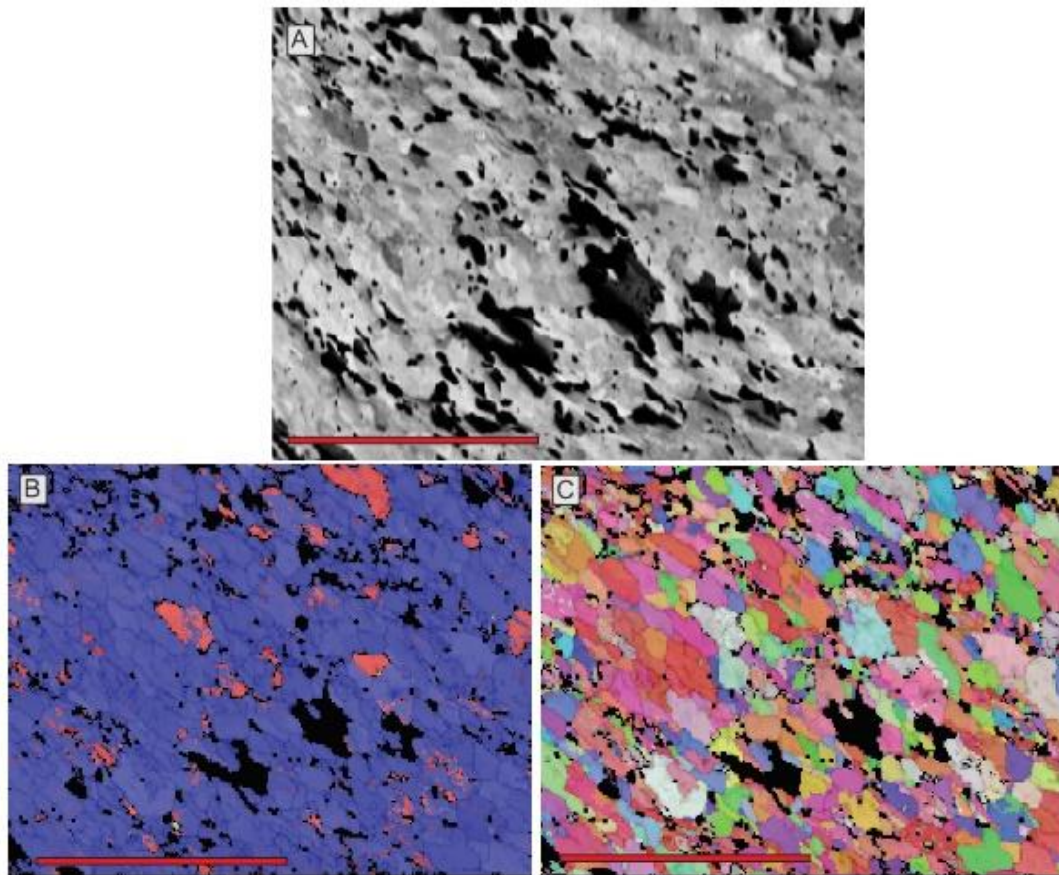


Figura 8: Mina Águas Claras. A) SEM, escala = 0,2mm. B) EBSD, vermelho = magnetita (15%), azul = hematita (85%), escala: 0,2mm. C) EBSD, cores iguais representam orientações cristalográficas iguais, portanto fraca orientação cristalográfica preferencial.

O material proveniente da Mina de Águas Claras é composto por cristais de granulação muito fina e granulometria menor que 0,1 mm. A morfologia é transicional entre granular e tabular, com contatos retilíneos a poligonais comuns que evidenciam um aumento de temperatura em relação ao domínio oeste. A magnetita é granular e apresenta granulação um pouco mais grossa que a hematita. A trama da rocha é moderadamente foliada e apresenta aspecto granoblástico na hematita. Trata-se de um material cujo grau de deformação é moderado, pelo fato de

ainda ter cerca de 15% de magnetita reliquiar, e os cristais de hematita gerados ainda não possuem forte orientação.

4.2.2 Mina do Baú

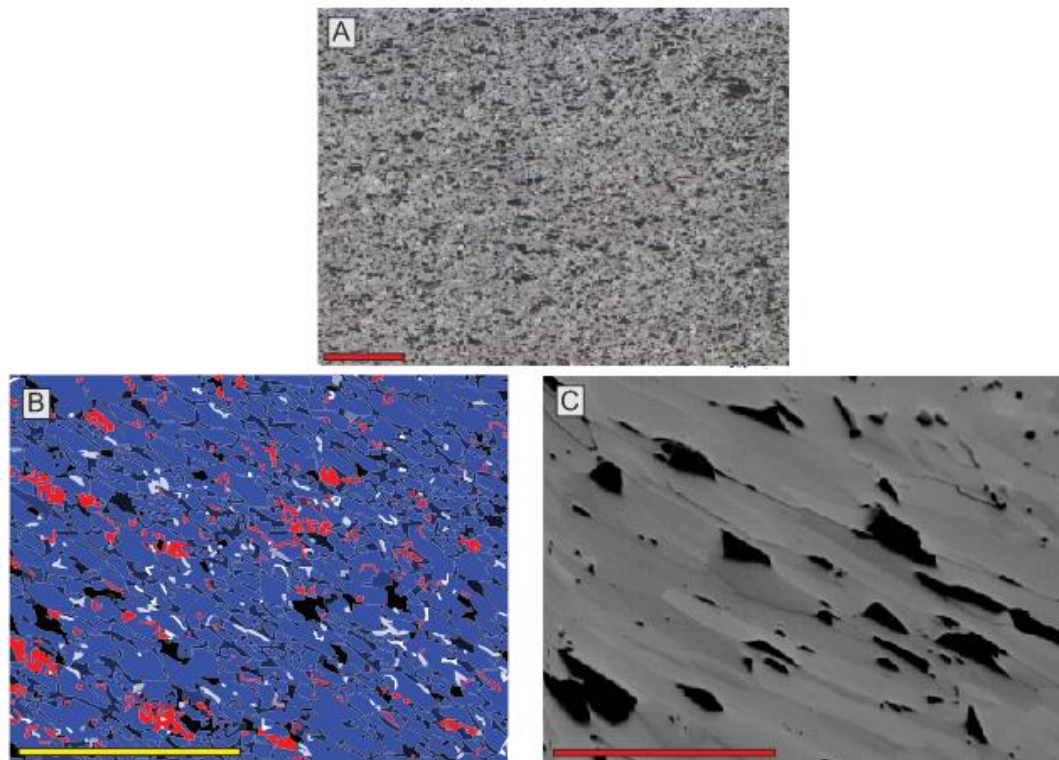


Figura 9: Mina do Baú. A) OM escala = 0,2mm B) EBSD, vermelho = magnetita (10%), azul = hematita (85%) escala = 0,2mm. C) SEM, escala 0,1 mm.

O material proveniente da Mina do Baú é composto por cristais de granulação muito fina, cuja granulometria é cerca de 0,1 mm. As amostras apresentam morfologia transicional entre granular e tabular, com regiões onde a morfologia tabular é bem nítida com contatos poligonais comuns. Os porfiroclastos de magnetita são granulares e levemente achatados na direção da foliação, e apresentam granulação, um pouco mais grossa que a hematita. A trama da rocha é predominantemente foliada por haver aspecto granoblástico na hematita e na magnetita. Portanto trata-se de material com grau de deformação moderado, com cerca de 10% de magnetita preservada. Porém há uma orientação mais forte das hematitas tabulares.

4.2.3 Mina do Pico

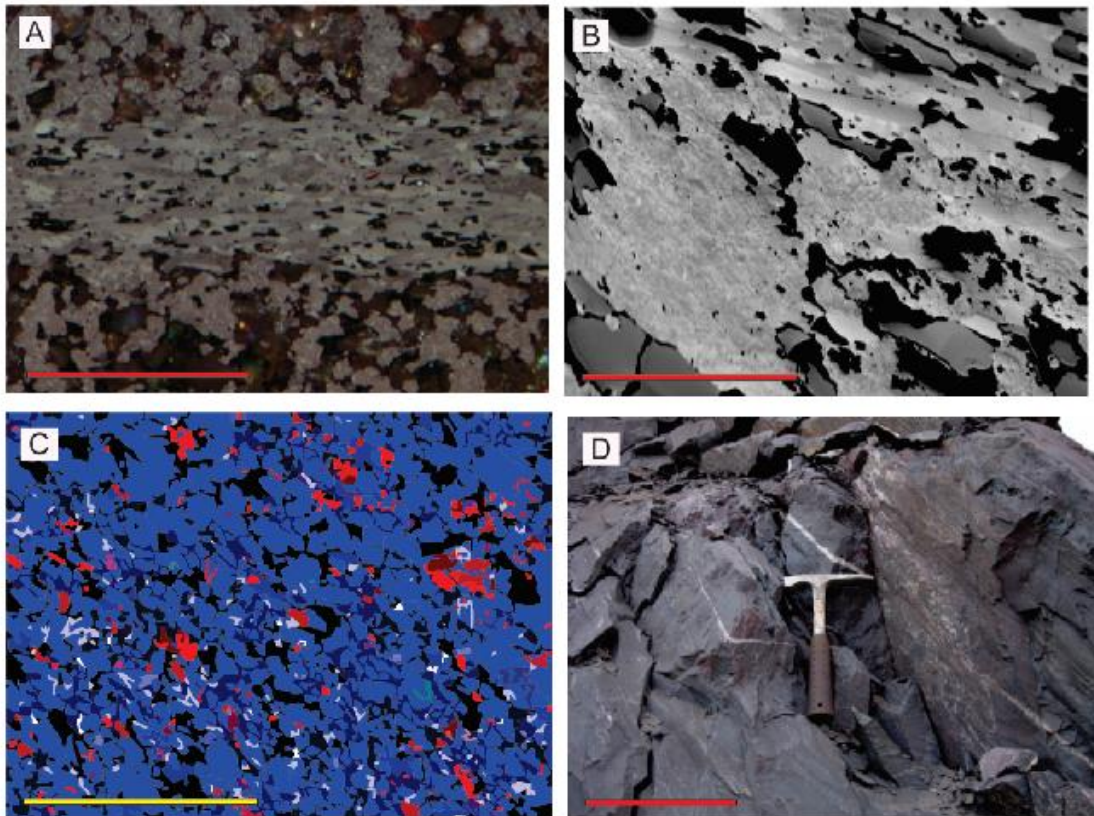


Figura 10: Mina do Pico. A) OM, escala = 0,5mm. B) SEM, escala = 0,2mm. C) EBSD, vermelho = magnetita (5%); azul = hematita (80%), escala = 2mm. D) Afloramento de itabirito bandado, escala = 45cm.

O material proveniente da Mina do Pico é composto por cristais de granulação fina. A morfologia da hematita é transicional de granular para tabular, com faixas miloníticas que geraram diminuição do tamanho do grão e que desenvolveram hematita tabular. A trama da rocha é foliada. Portanto, trata-se de material com grau de deformação moderado, com pequenas concentrações de magnetita (5%) e faixas com desenvolvimento de hematita tabular.

4.3 Setor Leste

Compreende o setor com rochas com sinais de deformação mais intensa. Neste contexto, ainda há cristais de magnetita isolados, residuais, nos quais a martitização é intensa. Constituem fragmentos de cristais na sua maioria anédricos. A Hematita é essencialmente tabular. Os grãos são em geral longos e delgados. Isso depende localmente do grau de deformação. Em zonas de mais alta

concentração de deformação (zonas de cisalhamento) os cristais são delgados e compridos, com razão axial que pode chegar a 1:20. Fora desse contexto os grãos tabulares tendem a ser mais espessos podendo gradar para tipos mais poligonais a granulares, como pode ser visto na Mina de Itabira (Fig 15), onde há variação na morfologia da hematita em escala de lâmina. Isso sugere temperaturas mais altas no setor leste o que é suportado pelos dados da assembleia mineral encontrada nas encaixantes carbonáticas e silicáticas que indicam temperaturas da ordem de 450°C. Os cristais individuais mais desenvolvidos de hematita mostram maclas que pela sua orientação oblíqua em relação ao comprimento dos grãos tabulares, são indicativas de geminações do tipo romboédrica, como descrito por Avila et al. (2015). Em geral predominam agregados fortemente orientados em sua forma com altas razões axiais. Além da orientação de forma, os cristais encontram-se fortemente orientados em relação ao plano basal {0001} os quais preferencialmente se paralelizam com o plano da foliação metamórfica/bandamento composicional das formações ferríferas nesse setor. Em alguns locais os cristais tabulares de hematita encontram-se crenulados e outras vezes mostrando estruturas do tipo kink. Isso pode refletir as intensas superposições e transposições observadas nessas rochas. Nos locais onde os aparecem porfiroclastos, a foliação os contornam, dando um aspecto anastomótico. O Setor Leste abrange as minas de Fazendão, Gongo Soco, Piedade, Timbopeba e Itabira, descritas nas figs. 11 a 15. As minas Fazendão e Timbopeba estão próximas as falhas de empurrão a oeste do Sinclinal Santa Rita, próximas ao Sinclinal de Ouro Preto-Mariana. A Mina de Gongo Soco está no flanco noroeste no Sinclinal Gandarela próximo a falhas de empurrão. A mina Piedade está no extremo nordeste da Serra da Piedade, já a Mina de Itabira está no Sinclinal de Itabira.

4.3.1 Mina Fazendão

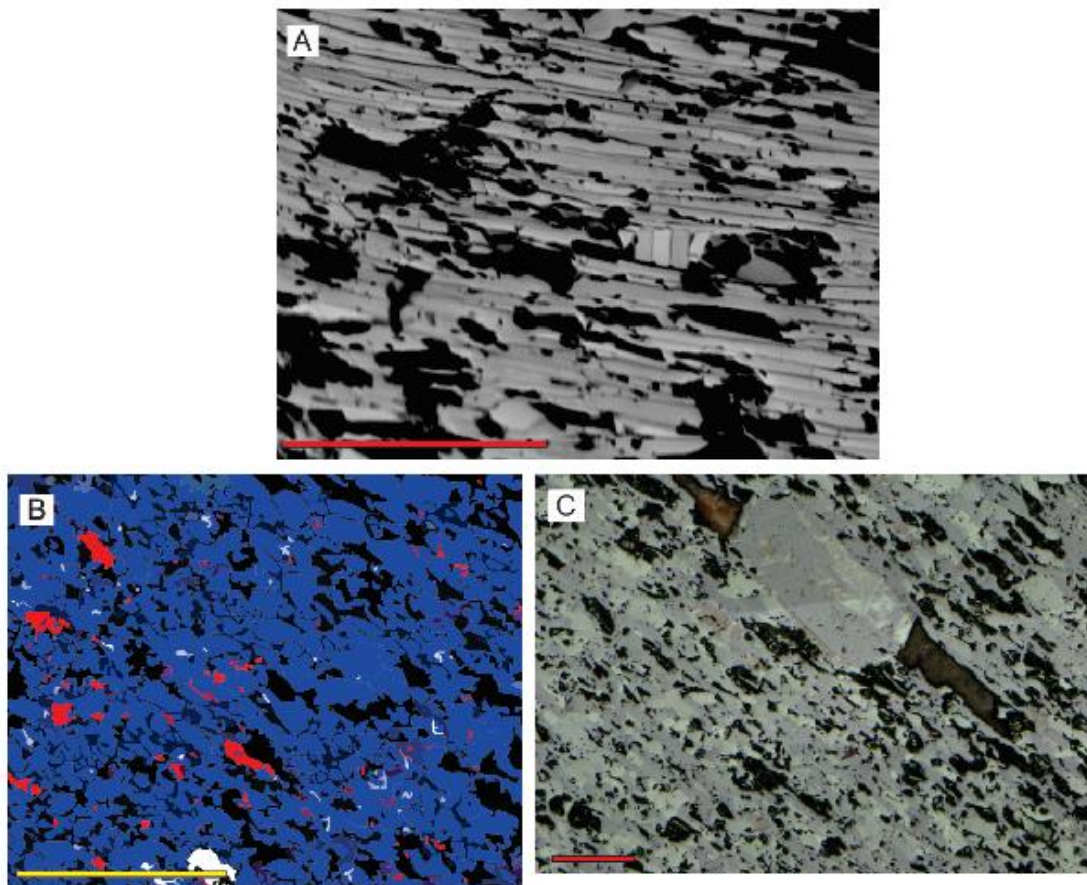


Figura 11: Mina Fazendão. A) SEM, escala = 0,2mm B) EBSD, vermelho = magnetita (3%) , azul = hematita (81%) escala = 0,2mm. C) OM, escala = 0,2 mm.

O material proveniente da Mina Fazendão é composto por cristais de granulação fina, com porfiroclastos relictos de magnetita cujas medidas são de até 1 mm. A morfologia da hematita é predominantemente tabular com contatos poligonais comuns. Ainda há núcleos de magnetita granular achatada no sentido paralelo a foliação, com cristais de hematita tabular circundando o porfiroclasto. A trama da rocha é foliada. Trata-se então de um material com grau de deformação alto cujas concentrações de magnetita são pequenas e que apresenta a hematita com morfologia tabular bem desenvolvida.

4.3.2 Mina Gongo Soco

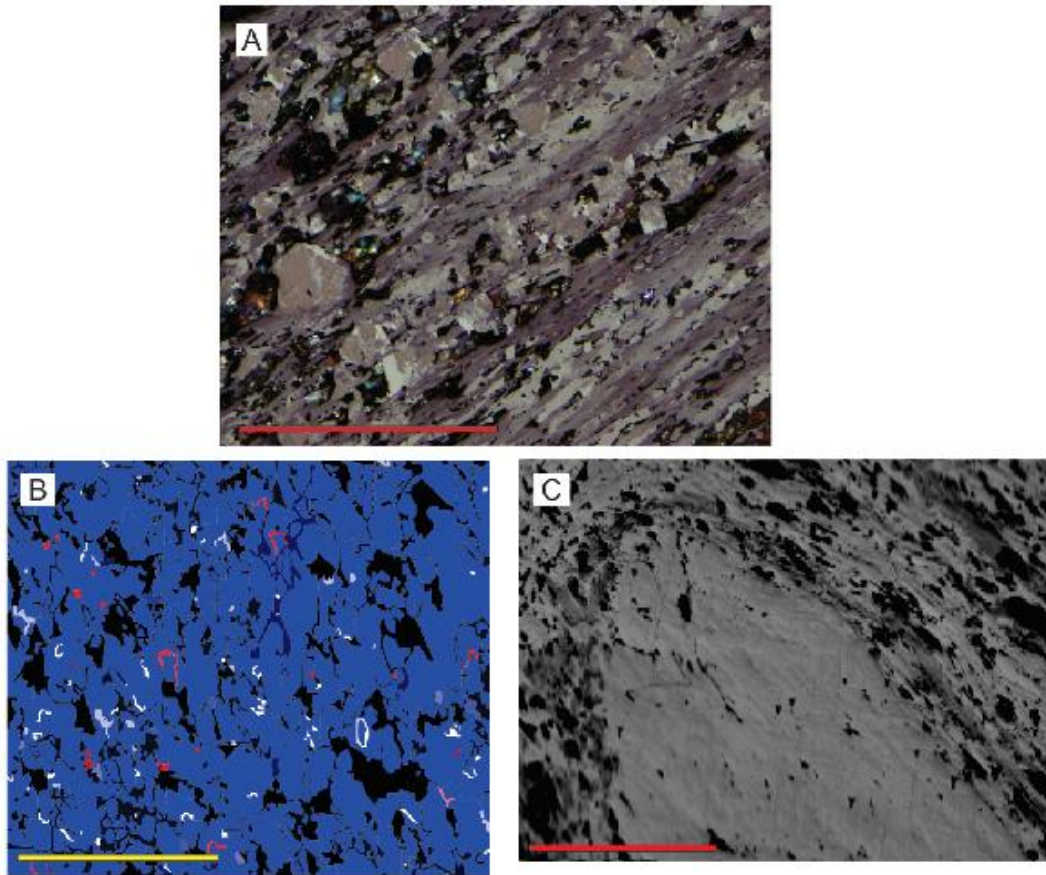


Figura 12: Mina de Gongo Soco. A) OM, escala = 0,2mm B) EBSD, vermelho = magnetita (1%) , azul = hematita (90%) escala = 0,2mm. C) SEM, porfiroclasto = magnetita relictta escala = 0,2 mm.

O material proveniente da Mina Gongo soco é composto por cristais de granulação muito fina com porfiroclastos relictos de magnetita que medem até 0,6mm. A morfologia da hematita é de granular a tabular, com faixas miloníticas que diminuíram o tamanho do grão e geraram hematita tabular. Nas faixas não miloníticas, o padrão de morfologia da hematita/magnetita tende a ser granular. A trama da rocha é fortemente foliada. Portanto trata-se de material com grau de deformação alto, com pequenas concentrações de magnetita, com hematita granular, que pode indicar evento de aquecimento.

4.3.3 Mina Piedade

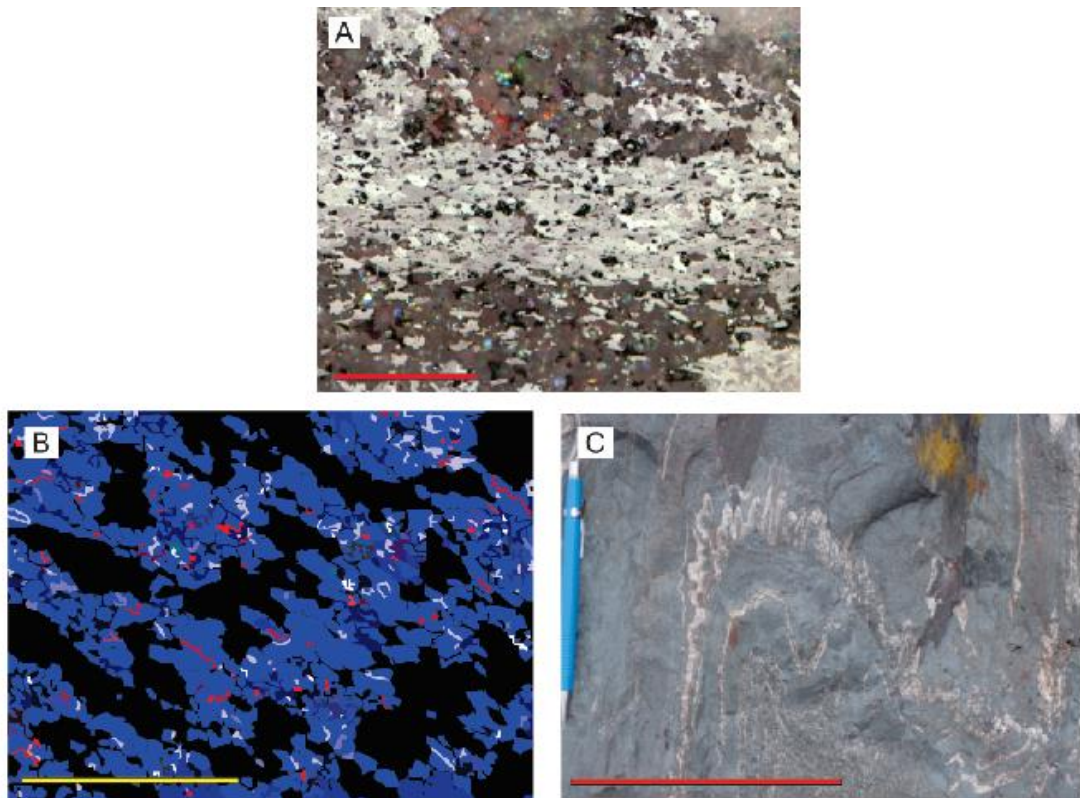


Figura 13: Serra da Piedade. A) OM, escala = 0,5mm. B) EBSD, vermelho = magnetita (>1%); azul = hematita (60%), escala = 0,2 mm. C) Afloramento de dobras com padrão pitgmático, escala = 15cm.

O material proveniente da Mina Piedade é composto por cristais de granulação fina. A morfologia da hematita é transicional de granular para tabular, com faixas miloníticas, que geraram diminuição do tamanho do grão e desenvolveram hematita tabular. A trama da rocha é foliada. Trata-se de material com grau de deformação alto, com pequenas concentrações de magnetita e com faixas de desenvolvimento de hematita tabular orientada.

4.3.4 Mina de Timbopeba

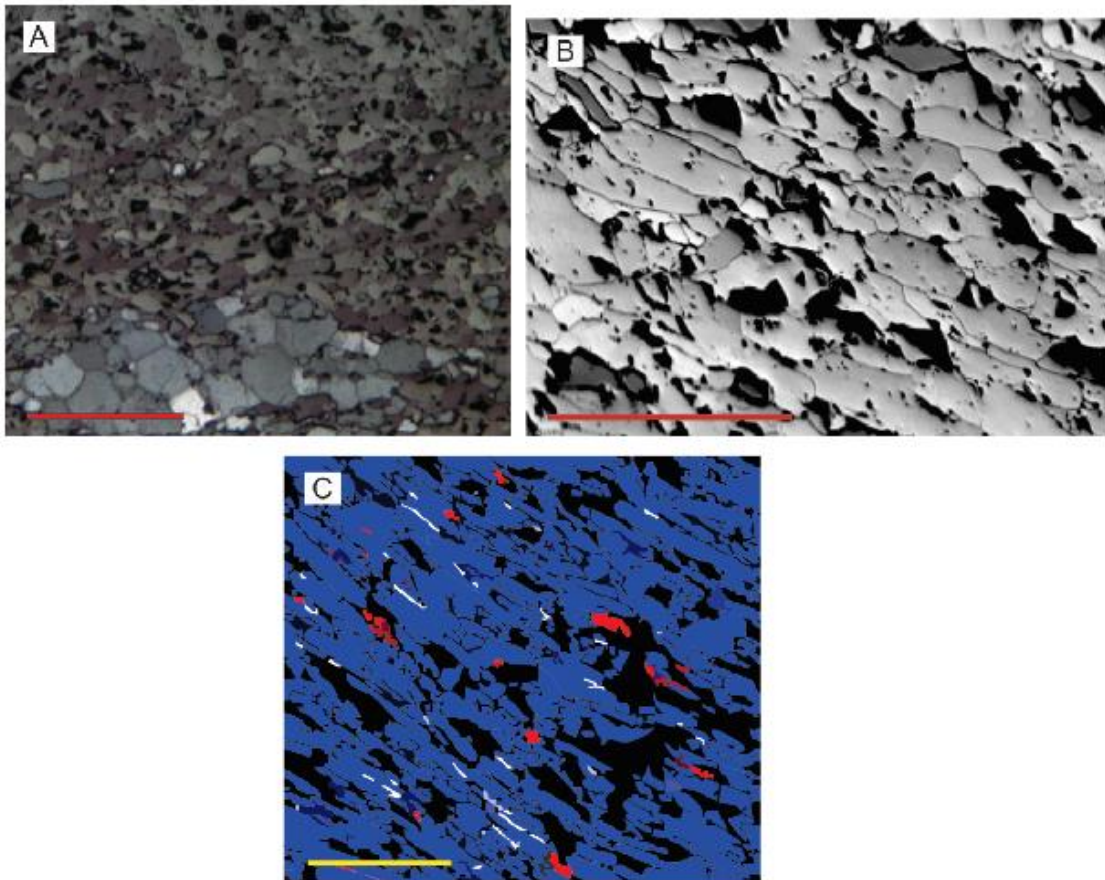


Figura 14: Mina de Timbopeba. A) OM, escala = 0,5mm. B) SEM , escala =0,2mm C) EBSD, vermelho = magnetita (>1%); azul = hematita (90%), escala = 0,2 mm. B) SEM , escala =0,2mm.

O material proveniente da Mina Timbopeba é composto por cristais de granulação fina. A morfologia da hematita é predominantemente tabular, com faixas miloníticas que geraram diminuição do tamanho do grão e desenvolveram hematita tabular. A trama da rocha é foliada. Portanto trata-se de material com grau de deformação alto, com pequenas concentrações de magnetita e com faixas de desenvolvimento de hematita tabular.

4.3.5 Mina de Itabira

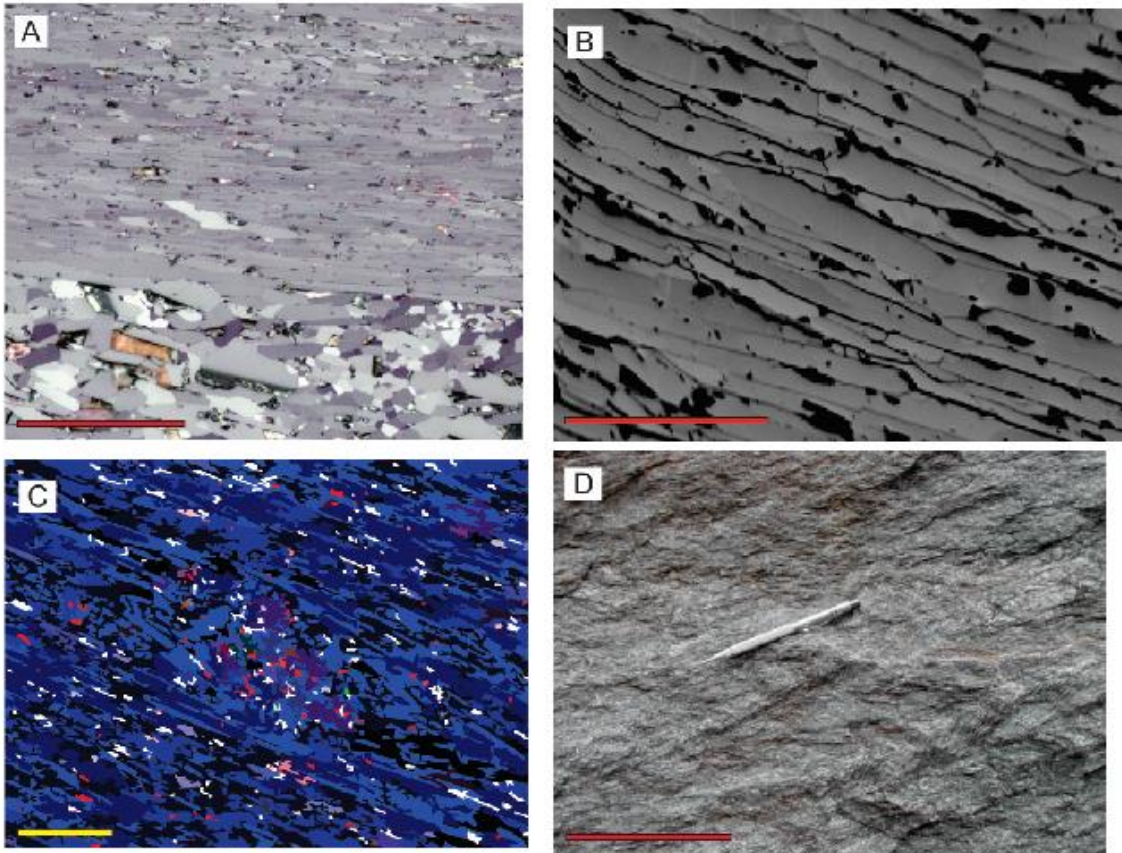


Figura 15: Mina de Itabira. A) OM, escala = 0,2mm. B) SEM, escala = 0,2mm. C) EBSD, vermelho = magnetita (1%); azul = hematita (90%), escala = 2mm. D) Afloramento hematítico intensamente foliado, escala = 20cm.

O material proveniente da Mina de Itabira é composto por cristais de granulação fina a média. A morfologia da hematita é nitidamente tabular, com faixas miloníticas que geraram diminuição do tamanho do grão. A trama da rocha é fortemente foliada. Portanto trata-se de material com grau de deformação muito alto, com pequenas concentrações de magnetita e morfologia predominante da hematita é tabular muito desenvolvida. Sendo esta a mina com maior grau de deformação.

5. Discussão

A transformação da magnetita em hematita no processo de deformação já foi descrito em publicações de Lagoeiro (1998), Barbosa (2009) e Mendes & Lagoeiro (2012). É um processo de oxidação preferencial que atinge os planos octaédricos da magnetita transformando-a em hematita e ou goethita. Os estágios de deformação, apresentados na fig 17, demonstram que nos processos mais avançados a magnetita tende a ser totalmente oxidada e a hematita tende a ficar tabular e fortemente orientada. A figura a seguir mostra alguns exemplos desta transformação.

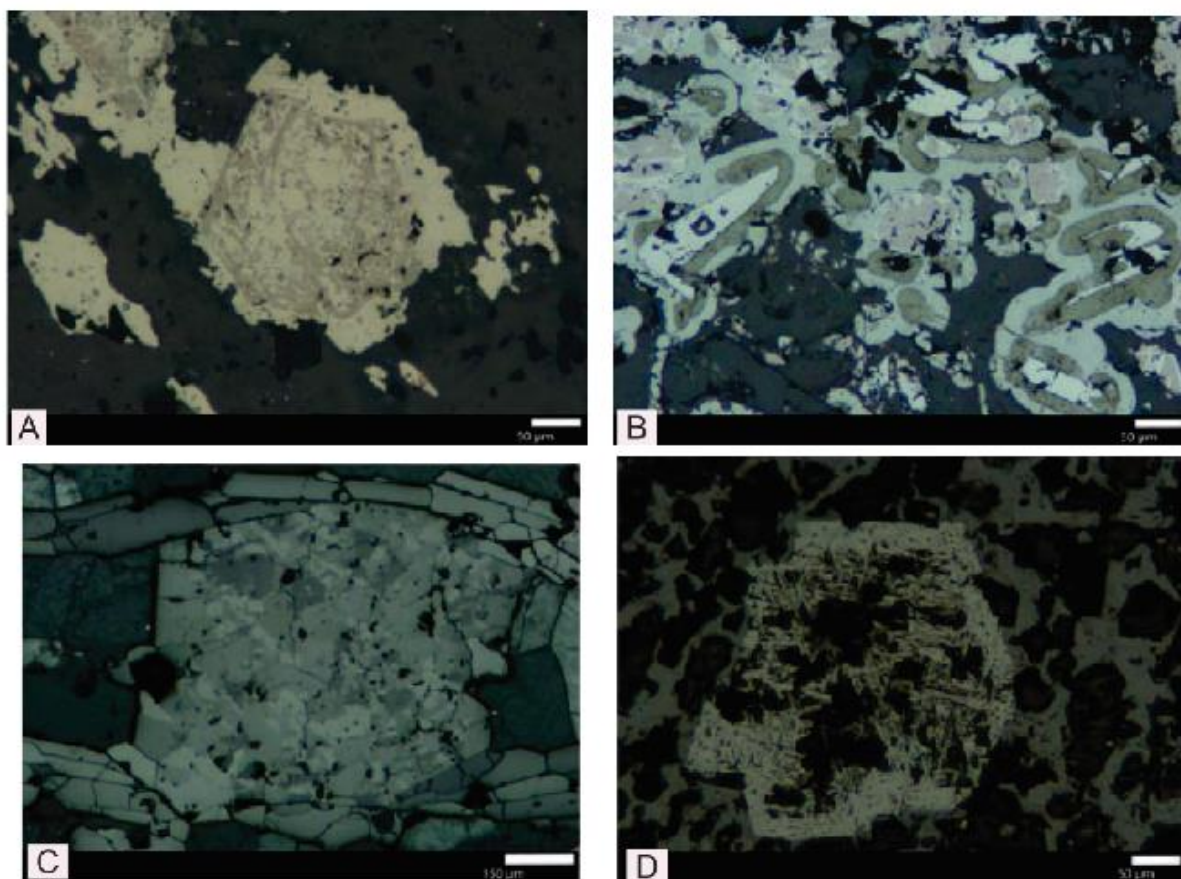


Figura 16: Oxidação da Magnetita para Hematita. A) Cristal de magnetita com geometria original parcialmente preservada Escala : 50 micra . B) Cristais reliquias de magnetita (tons cinza claros) circundados por goetita (cinza esverdeados) e mais externamente por hematita (cinza). Escala : 50 micra. C) Cristal de magnetita parcialmente preservada circundada por hematitas tabulares. Escala 150 micra. D) Cristal com textura esquelética de magnetita. Escala: 50 micra. Fonte: Modificado de Barbosa (2009).

A evolução das texturas e da morfologia da hematita nas formações ferríferas bandadas do Quadrilátero Ferrífero é oriunda de um processo gradual de incremento de temperatura e pressão em zonas de cisalhamento. O modelo apresentado na Fig. 17 demonstra como se deu essa evolução.

A primeira etapa (fig.17A) consiste em formações ferríferas mais enriquecidas em magnetita. Os grãos geralmente são granulares, irregulares e são resultado de intenso fraturamento e dissolução. O produto desse processo é o aparecimento de uma foliação incipiente, observada mais próxima aos clastos como pode ser observado na fig. 17B. Essas feições são tipicamente encontradas no setor oeste do QF, e as minas de Itatiaiuçu e do Córrego do Feijão são os melhores locais para encontrar exemplares desse processo. A medida que a deformação se torna mais intensa, a foliação gerada por cristais tabulares de hematita se torna mais penetrativa (fig. 17C). A presença de porfiroclastos de magnetita ainda é comum, os quais encontram-se em estágios avançado de oxidação (martitização). Em função desses porfiroclastos, a foliação tem aspecto bastante anastomótico. Na fig. 17E é possível observar uma diminuição na proporção de magnetita, cujos grãos tendem a ficar mais achatados, a medida que se aproximam com o domínio leste, de forma paralela á foliação. A fig. 17F representa o estágio final da deformação, sendo que porfiroclastos são raros, e quando aparecem, praticamente não perturbam o caráter essencialmente plano paralelo da foliação. Cristais tabulares com alta razão axial (superior a 1:5) são os que predominam. Em locais onde a temperatura é proeminente, os grãos tabulares finos foram modificados para grãos mais grosseiros de caráter poligonal de bordas retas. Essa é um característica também marcante dos agregados. Suas bordas são mais retilíneas, o que dá aos agregados um aspecto mais poligonizados.

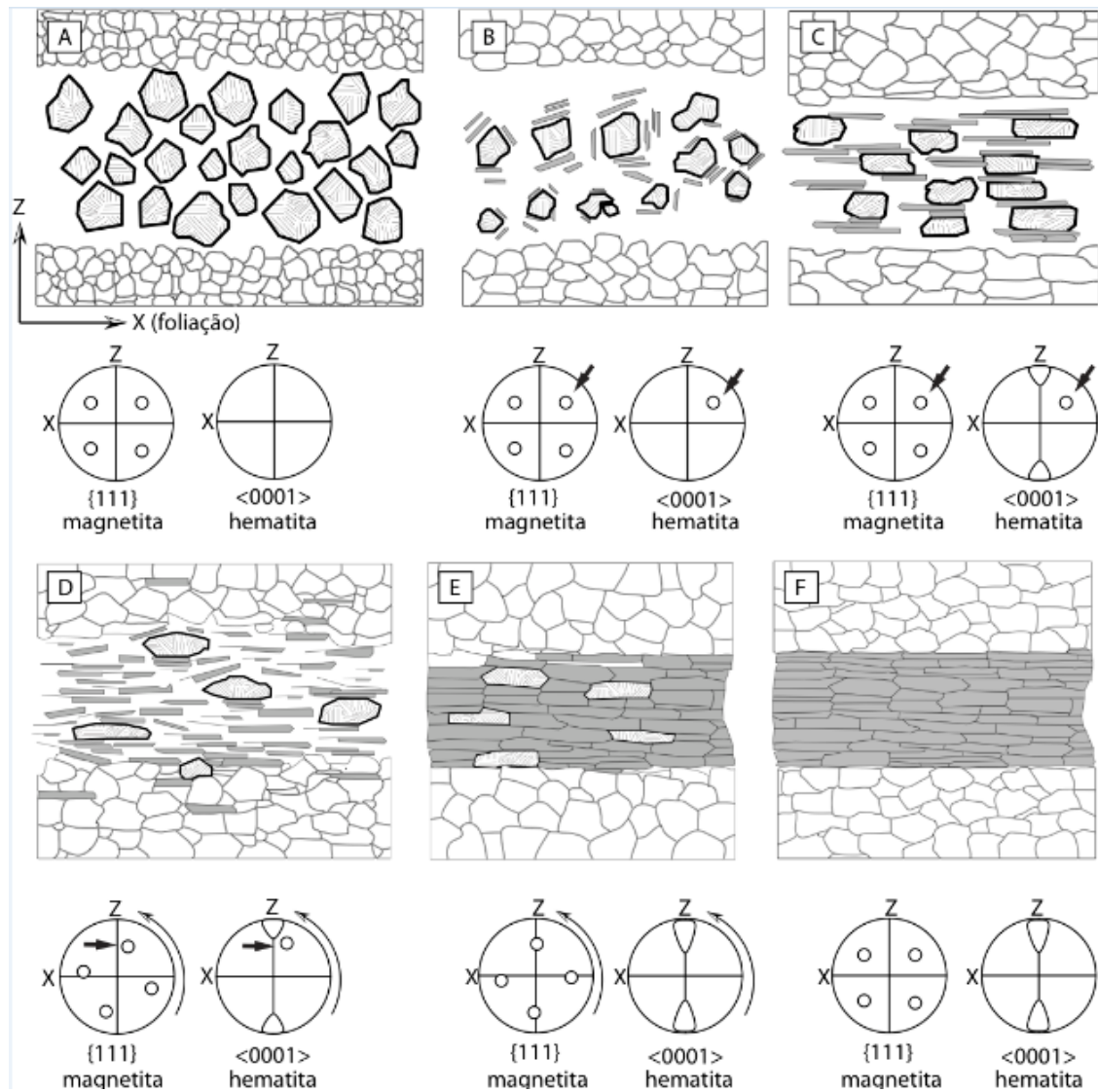


Figura 17: Modelo de evolução da morfologia da hematita. A) Magnetita granular sem rotação dos eixos cristalográficos nem evidências de oxidação. B) Hematita tabular é gerada ao redor de núcleos de magnetita por oxidação. C) Os cristais de magnetita e de hematita são orientados conforme a foliação. D) Os eixos cristalográficos são rotacionados e os porfiroclastos de magnetita deformam a foliação. E) A hematita é recrystalizada com forte orientação e com contatos triplíceis, porém com alguns cristais de magnetita ainda preservados. F) A magnetita é quase na totalidade transformada para hematita, na sua forma tabular, fortemente orientada.

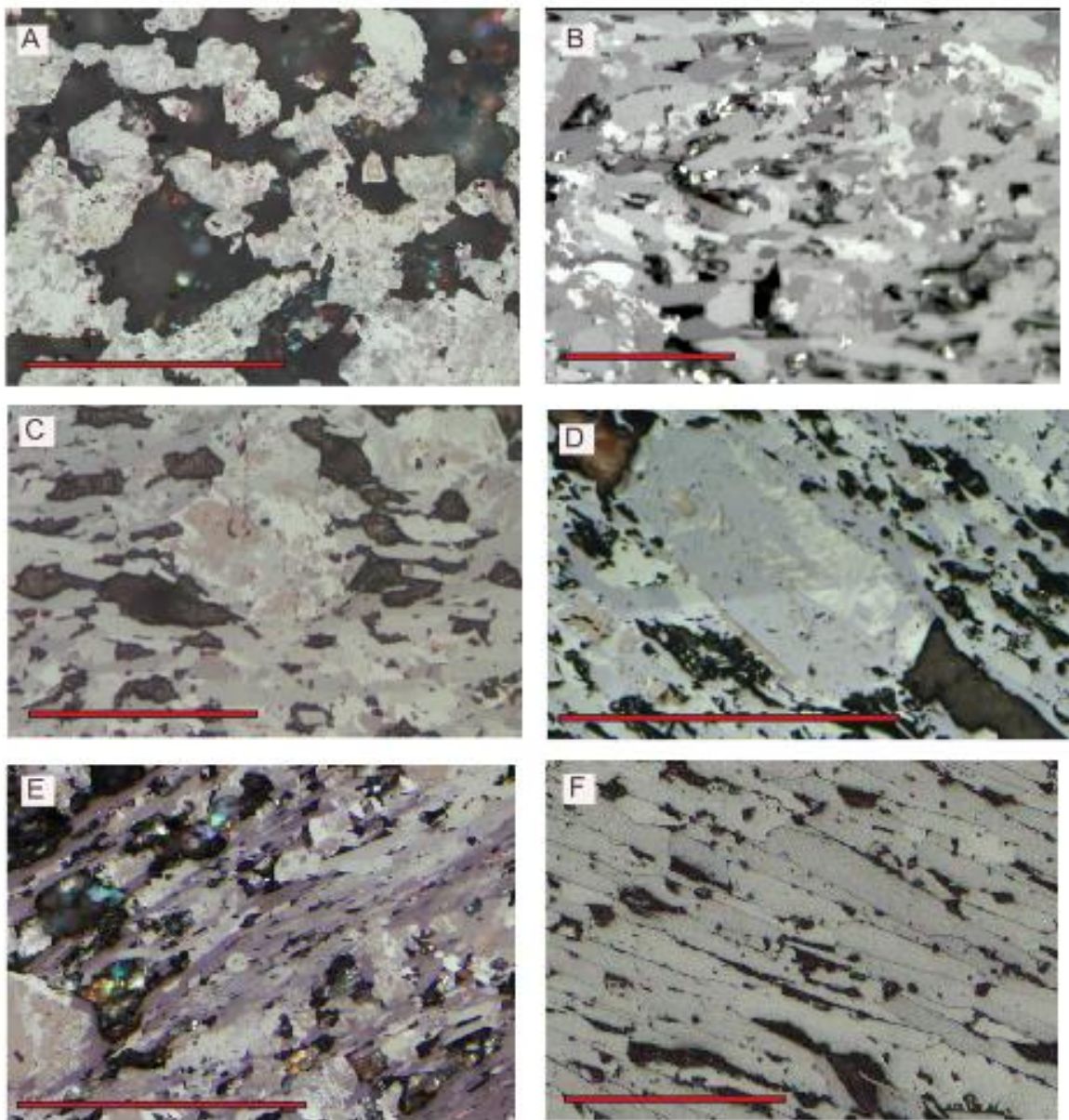


Figura 18: Exemplos das minas, comparadas ao modelo proposto na fig. 17. Todas as escalas = 0,2mm. A) Mina de Itatiaiuçu. B) Mina de Fábrica. C) Mina Timbopeba. D) Mina Fazendão. E) Mina Gongo Soco. F) Mina de Itabira.

6. Conclusão

Os principais resultados apontam que a transformação progressiva da magnetita para hematita resulta em uma mudança nas microestruturas dos agregados das formações ferríferas: de agregados mais granulares e irregulares passa-se a uma trama mais organizada onde predomina cristais tabulares de hematita. As magnetitas mais duras em relação a deformação comportam-se de maneira rúptil, fraturando-se intensamente. Isso proporcionou uma maior taxa de dissolução e geração de novos cristais de goetita e hematita, tanto *in situ*, pelas transformações ao longo de planos octaédricos, como por neocristalização, onde cristais longos de goetita e hematita são fortemente orientados nos planos de foliação. Os novos cristais de hematita tabular se comportam de maneira mais dúctil que cristais de magnetita, com contraste reológico. Os mecanismos de deformação mudam de microfraturamento e dissolução para uma deformação mais plástica nos agregados de hematita de comportamento mais dúctil. Isso leva a uma forte orientação preferencial tanto no que diz respeito a forma (cristais tabulares alongados de bordas retas) quanto na orientação preferencial de planos cristalográficos, com planos basais orientados paralelamente ao plano da foliação.

7. Referências bibliográficas

Alkmim, F. F; Marshak, S. (1998). *Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. Precambrian Research, Amsterdam, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 30 jun. 1998.

Avila, C. F; Lagoeiro, L; Ferreira Barbosa, P. F; Graça, L. (2015) *EBSD analysis of rhombohedral twinning in hematite crystals of naturally deformed iron formations*. Journal of Applied Crystallography. 48, 212-219.

Barbosa, P. F. 2009. *Caracterização microestrutural e textural de agregados de magnetita do Quadrilátero Ferrífero*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. 81pp.

Carneiro, M. A; Noce, C.M; Teixeira, W. 1995. *Evolução do Quadrilátero Ferrífero sob o ponto de vista da Geocronologia*. Revista da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (Brazil). 48, 264-274.

Dorr, J.V.N. 1969. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. USGS. prof. pap. 641 - a, 110 páginas, Washington DC USA..

Dwarapudi, S; Devi, T. U; Mohan Rao, S; and Ranjan, M. (2008). *Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets*. ISIJ International, 48(6), pp. 768–776.

Graça L, M; Lagoeiro L, E; Lima. R, M, F; Barbosa P, F; Machado, M. M. (2015) *Effect of the Morphological Types in Grinding of Iron-Ore Products, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 36:5, 324-331, DOI: 10.1080/08827508.2015.1004405

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

Lagoeiro, L.A. 1998 (A). *Mecanismos de deformação e orientação cristalográfica preferenciais em tectonitos de formações ferríferas bandadas -Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. IGC-USP, 160pp.

Lagoeiro, L. E., 1998 (B). *Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals*. Journal of Metamorphic Geology, **16**: 415-423.

Mendes, M; Lagoeiro, L. E. 2012. *Microstructures, crystallographic fabric development and deformation mechanisms in natural hematite aggregates deformed under varied metamorphic condition*. Journal of Structural Geology (40). pp. 29-43.

Pires, F. R . M; Bertolino, L. C. 1991. *Estudo do Metamorfismo nas formações Proterozóicas no Quadrilátero Ferrífero, MG*. Anuário do Instituto de Geociências, Vol 14 pp 1-9. 1991

Rosière, C. A. & Chemale, F. Jr., 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, F. Jr. & Guimarães, M.L.V. 1993. *Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Parte I - estruturas e recristalização. Geonomos, **1**(1): 65-84

Rosière, C. A; Chemale. 2001. *Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão*. GEONOMOS 8 (2): 27-43.

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*. Society of Economic Geologists SEG Reviews vol. 15, p. 000–000