NÃO CIRCULA

ALEDIR PAGANELLI BARBOUR

DEDALUS - Acervo - IGC

30900007846

TEXTURA, ABRANDAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO
NO MINÉRIO DE FERRO DE ITABIRA, MG

Tese de doutoramento apresentada à Cadeira de
Geologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e
Letras da Universidade de São Paulo

1968

ÍNDICE

RESUMO	1
TRABALHOS PRÉVIOS	2
PRIMEIRA PARTE	
INTRODUÇÃO	4
CAPÍTULO I - TRAÇOS GERAIS	
1 - GEOLOGIA GERAL	5
2 - ESTRATIGRAFIA	5
3 - FEIÇÕES ESTRUTURAIS	8
CAPÍTULO II - MÉTODOS DE ANÁLISE	
1 - MICROSCOPIA	10
2 - PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE ESPECTROGRÁFICA E QUÍMICA	11
3 - ANÁLISES	11
4 - PROVAS DE TOQUE	13
5 - PÊSO ESPECÍFICO	13
SEGUNDA PARTE	
OBSERVAÇÕES - INTERPRETAÇÕES	
CAPÍTULO I	
1 - CLASSIFICAÇÃO DO MINÉRIO	14
2 - DISTRIBUIÇÃO GERAL DO MINÉRIO	16
3 - TEXTURA DO MINÉRIO	20
A - Tipo de minério	22
a - Hematita xistosa	22
b - Hematita compacta	24
c - Porosidade	32
d - Itabirito	34
e - Magnetita	39
f - Canga	46

B - Estádio de alteração	48
a - Hematita dura, mole e pulverulenta	48
b - Itabirito pulverulento	51
4 - PROVAS DE TOQUE	54
5 - PÊSO ESPECÍFICO	54
6 - DISTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS TIPOS DE MINÉRIOS	55
7 - ABRANDAMENTO VERSUS AUMENTO DE COESÃO (ENDURECIMENTO)	64
8 - OXIDAÇÃO DO MINÉRIO	66
9 - RELAÇÕES ENTRE OS VÁRIOS TIPOS DE MINÉRIOS	74
10 - DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO EM PROFUNDIDADE	77
11 - DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NA ZONA SUPERFI- CIAL	90
CAPÍTULO III	
RELAÇÕES DOS TIPOS DE MINÉRIOS E ROCHAS E O COMPORTAMENTO DO ELEMENTO FÓSFORO	102
CAPÍTULO IV	
O COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS MAIORES E O FÓSFORO	115
TERCEIRA PARTE	
CONCLUSÃO	119
BIBLIOGRAFIA	124

AGRADECIMENTOS

Durante o desenvolvimento de qualquer pesquisa, há fases que dependem do auxílio prestado por instituições ou pessoas.

Não fôra a colaboração direta ou indireta prestada por várias pessoas e instituições e a elaboração dêste trabalho seria impossível.

- O Prof. Dr. Viktor Leinz, Catedrático de Geologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, que desde os entendimentos iniciais para escolha do local até a redação final da tese acompanhou e orientou o autor. Sua experiência fêz-se sentir em todos os momentos de solução de problemas de encaminhamento da pesquisa.

- A Companhia Vale do Rio Doce que subvencionou grande parte das passagens, bem como proporcionou alojamento e alimentação em sua casa de hóspedes durante a coleta de dados nas minas localizadas no Distrito de Itabira. Colocaram à disposição do autor os testemunhos de sondagem, análises químicas prévias, perfis, mapas, etc. Possibilitaram a análise nos laboratórios da Companhia de várias centenas de amostras coletadas durante a pesquisa.

- Tôda esta tarefa foi facilitada por geólogos, engenheiros e técnicos da Companhia entre os quais lembramos a extrema solicitude dos Srs. Ricardo A. Figueiredo, Vanderlei de Rui Beisegel, J. A. Vasconcelos, Domingos Drumond Tôrres, José Márcio Jardim Paixão, Carlos Paranhos e Edson Ribeiro Teixeira.

Especial atenção e solicitude foram prestadas pelo Dr. Paulo Miguel Bohomoletz, Diretor da Companhia, Dr. Francisco Fonseca Filho e Dr. Rômulo G. Oliveira, respectivamente Superintendente e Assistente do Departamento de Geologia e Engenharia de Minas, no sentido da necessidade da pesquisa a ser desenvolvida.

- A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, que subvencionou uma viagem pelas grandes jazidas de ferro do Quadrilátero Ferrífero com o objetivo de fazer observações geológicas e coleta de amostras. Foram também observadas e relacionadas as características geológicas destas jazidas e as jazidas do Distrito de Itabira.

- O engenheiro Fernando Lacourt, cujas observações técnicas e exposição de problemas concernentes ao minério orienta -

ram mais objetivamente a pesquisa. Sua larga experiência foi de extrema valia para a orientação da pesquisa das jazidas.

- O Prof. Dr. Reinholt Ellert, da Cadeira de Geologia Econômica da Fac. Fil. Ci. Letras da USP, que participou nas primeiras fases da pesquisa, colaborando com valiosas observações e cedendo parte do material amostrado para pesquisas de laboratório.

- O Prof. Dr. Evaristo Ribeiro Filho, Assistente da Cadeira de Geologia da Fac. Fil. Ci. Letras da USP, que com tanta gentileza e técnica bateu grande parte das fotografias de seções polidas contidas no texto e colaborou na preparação e estudo de algumas seções polidas.

- O Prof. Dr. Sérgio Estanislau do Amaral, que fez uma pormenorizada revisão dos originais no que diz respeito à geologia e à redação.

- O geólogo Sr. Adilson Carvalho, do Instituto Agrônomo de Campinas, que colaborou com a obtenção de diagramas de Raios X para identificação de alguns minerais.

- Os Srs. Joerg Bruder e Darcy Svisero, Instrutores da Cadeira de Mineralogia da Fac. Fil. Ci. Letras da USP, que fizeram alguns diagramas de Raios X para alguns minerais.

- Ao Sr. Vicente A. V. Girardi, Instrutor da Cadeira de Petrologia da Fac. Fil. Ci. Letras da USP, sem cujos auxílios não teria sido possível fazer o estudo microscópico de algumas lâminas delgadas.

- O Dr. Franco Levi e Sra. Mary Sziksay Lins e Silva, respectivamente Assistente e Instrutora da Cadeira de Geologia da Fac. Fil. Ci. Letras da USP, que instruíram e colaboraram com o autor na análise de elementos traços de algumas amostras pelo método espectroscópico óptico.

- O Sr. Moacyr R. Arruda, Instrutor da Cadeira de Mineralogia da Fac. Fil. Ci. Letras da USP e o aluno Yushiro Kihara que instruíram e colaboraram com o autor na obtenção de algumas análises termodiferenciais.

- O Sr. José M. Valadares do Instituto Agrônomo de Campinas que prestou substancial auxílio no que concerne ao comportamento do elemento fósforo, assim como forneceu grande parte da bibliografia a respeito do assunto.

- À Sra. Lisbeth K. Cordani que de maneira tão gentil corrigiu a redação do original.

- Os Srs. José Ponchirolli e Italo Bello, que colaboraram com tanta dedicação na datilografia, paginação e impressão deste trabalho.

- À Sra. Melany T. Izauk, do Serviço de Laminação do Departamento de Geologia da Fac. Fil. Ci. Letras da USP pelo cuidado na confecção de lâminas delgadas e preparação prévia de amostras para confecção de seções polidas.

Entre as pessoas e instituições citadas, outras há, que colaboraram anônimamente na realização deste trabalho e que o autor deseja consignar profundos agradecimentos.

ÍNDICE DAS ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Coluna estratigráfica - Distrito de Itabira	6
Figura 2 - Mapa Geológico e perfis do Distrito de Itabira	7
Figura 3 - Classificação do minério e rochas	15
Figura 4 - Perfil longitudinal da Mina Cauê	17
Figura 5 - Mapa da Mina Cauê	19
Figura 6 - Bloco diagrama da Mina Conceição	21
Figura 7 - Foto - Hematita xistosa fraturada	22
Figura 8 - Histograma - Granulação da hematita xistosa	23
Figura 9 - Foto - Microfratura em hematita pouco xistosa	25
Figura 10 - Foto - Hematita xistosa com goetita em cavidades	25
Figura 11 - Foto - Hematita compacta recristalizada	26
Figura 12 - Histograma - Granulação da hematita compacta recristalizada	27
Figura 13 - Foto - Faixa de hematita compacta recristalizada em hematita xistosa	28
Figura 14 - Zonas de hematita neoformada em hematita xistosa	29
Figura 15 - Substituição de hematita por talco	30
Figura 16 - Foto - Núcleo de hematita compacta recristalizada em hematita xistosa	31
Figura 17 - Fotos - Porosidades diferentes	33
Figura 18 - Foto - Hematita xistosa crenulada	34
Figura 19 - Substituição de quartzo por hematita	36
Figura 20 - Foto - Itabirito substituído por hematita compacta recristalizada	37
Figura 21 - Foto - Itabirito substituído por hematita compacta recristalizada	38
Figura 22 - Foto - Itabirito com faixas porosas	38
Figura 23 - Foto - Itabirito com núcleo de hematita compacta recristalizada	40
Figura 24 - Foto - Magnetita em início de martitização	40
Figura 25 - Foto - Magnetita com duas direções de martitização	43
Figura 26 - Magnetita martitizada - Hematita neoformada	44
Figura 27 - Crescimento de macrocristais de magnetita martitizada	45
Figura 28 - Foto - Canga	47
Figura 29 - Foto - Hematita semipulverulenta	47

Figura 30 - Foto - Hematita pulverulenta do tipo pouco xistoso	49
Figura 31 - Foto - Hematita pulverulenta do tipo pouco xistoso	49
Figura 32 - Histograma - Granulação da hematita pulverulenta	50
Figura 33 - Granulação da hematita xistosa, hematita compacta recristalizada e hematita pulverulenta.	51
Figura 34 - Foto - Itabirito com lixiviação do quartzo	52
Figura 35 - Foto - Lentes de hematita compacta recristalizada em itabirito pulverulento	56
Figura 36 - Foto - Lente de hematita compacta recristalizada em itabirito pouco mole	57
Figura 37 - Foto - Hematita compacta recristalizada discordante em itabirito mole	57
Figura 38 - Foto - Hematita e itabirito pulverulento	59
Figura 39 - Hematita xistosa compacta fraturada	59
Figura 40 - Foto - Tectonismo em hematita compacta xistosa	61
Figura 41 - Foto - Itabirito mole a pulverulento em talus consolidado	63
Figura 42 - Foto - Desagregação mecânica de Itabirito	63
Figura 43 - Porcentagem de FeO em amostras de Canga	71
Figura 44 - Relação da razão de oxidação com a profundidade	73
Figura 45 - Foto - Itabirito mole com hematita compacta recristalizada	76
Figura 46 - Foto - Contacto de hematita compacta recristalizada e itabirito mole	76
Figura 47 - Foto - Passagem de itabirito a hematita compacta	78
Figura 48 - Foto - Relações entre vários tipos de minérios e intrusiva	78
Figura 49 - Foto - Intrusiva fresca	91
Figura 50 - Foto - Intrusiva fresca com quartzo	91
Figura 51 - Foto - Canga porosa	93
Figura 52 - Perfil químico para fósforo	97
Figura 53 - Histogramas - Distribuição do elemento fósforo	100
Figura 54 - Histogramas - Distribuição do elemento fósforo	101
Figura 55 - Histograma - Distribuição do elemento fósforo em minério duro e brando	104
Figura 56 - Histograma - Distribuição do elemento fósforo em hematita xistosa, compacta e hematita pulverulenta	106
Figura 57 - Teor de fósforo no contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes	106
Figura 58 - Fósforo na canga	107

Figura 59 - Fósforo em canga capeando hematita pulverulenta	108
Figura 60 - Fósforo em canga capeando o xisto	109
Figura 61 - Análise granulométrica de itabirito	111
Figura 62 - Análises granulométricas de itabirito friável	112
Figura 63 - Análise granulométrica de hematita pulverulenta	113
Figura 64 - Resumo dos eventos geológicos do Distrito de Itabira	120

TABELAS

1 - Provas de toque	53
2 - Pêso específico do minério	54
3 - Hematita pulverulenta	69
4 - Razão de oxidação para os vários tipos de minérios	69
5 - Minério oxidado e não oxidado	70
6 - Análise de hematita	72
7 - Análise de xisto Nova Lima	80
8 - Análise de filito Batatal	81
9 - Análise de hematita xistosa	83
10 - Análise de hematita compacta recristalizada	84
11 - Análise de hematita pulverulenta	86, 87
12 - Análise de itabirito duro	88
13 - Análise de itabirito pulverulento	89
14 - Análise de intrusiva metamorfisada	92
15 - Análise de canga porosa	94
16 - Análise de canga maciça	95
17 - Variação dos teores de fósforo no minério e rochas	99
18 - Variação dos teores de fósforo com a profundidade	110
19 - Média da porcentagem de óxidos e elementos	115
20 - Média da porcentagem de óxidos e elementos.	118

RESUMO

A pesquisa desenvolvida no Distrito de Itabira (MG) teve como objetivo principal o estudo da textura, oxidação, abrandamento e distribuição do fósforo no minério de ferro. Desdobrou-se em itens menores, incluindo distribuição do minério, granulometria, recristalização e composição mineralógica e química.

A concentração secundária do fósforo ocorre na canga a uma profundidade de 3,0 a 4,0 m. Concentra-se também no minério brando, na intrusiva metamorfisada alterada e na encaixante alterada. Em alguns casos o teor de fósforo pôde ser utilizado para determinar se a encaixante fresca e semi-alterada é um xisto ou filito.

Há quatro gerações de hematita: xistosa, proveniente dos sedimentos metamorfisados; compacta, formada pela recristalizaçã da xistosa; neoformada que ocorre em bordos de cristais de martita e a última formada pela martitização da magnetita. As duas últimas não são representativas.

A hematita e itabirito foram recristalizados, de iní-cio, em "núcleos" dispersos e depois constituíram lentes ou zonas.

O grau de oxidação do minério diminui com a profun-didade. A oxidação inicia-se antes do abrandamento e prossegue lentamente, mesmo após o abrandamento total do minério.

O abrandamento do minério depende da granulação, porcentagem de talco, quartzo, tectonismo e os fatôres morfológicos e topográficos da jazida.

As características do minério duro e brando indicam que o segundo originou-se pelo abrandamento do primeiro. Apenas na zona superficial ocorre endurecimento do minério brando com um processo de cimentação que ocorre paralelamente à laterização e forma-ção da canga. O cimento da canga é constituído em grande porcenta-gem de hematita de granulação mais fina.

O teor de fósforo na canga é alto no cimento e mantem-se sem alteração nos blocos de hematita englobados.

TRABALHOS PRÉVIOS

- Eschwege, W.L. von (1833) - faz referências gerais ao Distrito de Itabira. Cita as cinco lavras ainda lá existentes, o número de trabalhadores e produção de ouro em 1814.

- Henwood (1871) - descreve locais e quantidades de ouro extraídas especialmente do Pico Conceição.

- Scott (1902) - relaciona locais e quantidade de ouro extraída em Itabira, citando o Pico Cauê.

- Harder e Chamberlin (1915) - estabeleceram uma estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero que serviu de base para as modificações introduzidas posteriormente. Discutiram a origem e fizeram uma classificação do minério de ferro. Fazem referências ao teor de fósforo do minério superficial. Citaram a Formação Ferrífera constituindo uma faixa contínua desde o Pico Cauê até o Pico Conceição.

- Sanders (1933) - descreve cavidades e marcas no minério duro da Mina Cauê, que interpreta como sendo causadas por grupos de cristais de turmalina. Parece ter sido o primeiro a propor para os corpos de hematita uma origem por substituição que inferiu ser derivada de ação de soluções hidrotermais.

- Freyberg (1934) - faz diversas citações e comparações sobre a geologia do Distrito de Itabira.

- Barbosa, O. (1945) - (segundo citação de Dorr e Barbosa (1963), estabeleceu a estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero, introduzindo modificações na coluna estratigráfica estabelecida por Harder e Chamberlin em 1915.

Tyler (1948) - examinou amostras de itabirito do Quadrilátero Ferrífero, incluindo o Distrito de Itabira. Fêz um histórico do termo itabirito. Observou que a fase quartzosa é idêntica ao sílex (chert) recristalizado do Distrito de Marquette, Michigan, apresentando textura em mosaico.

Pulverizou 20 amostras de itabirito e não encontrou vestígios de minerais acessórios pesados de origem clástica.

Concluiu que o quartzo é proveniente de um sílex (chert) recristalizado.

- Effenberger (1954) - faz descrição do fluxograma de tratamento do minério de ferro de Itabira com detalhes sobre britagem e peneiramento.

- Dorr, Gair, Pomerene e Ryneanson (1957) - fizeram uma revisão da estratigrafia Pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero relacionando a terminologia estratigráfica com o Código Estratigráfico (Ashley e outros, 1933).

- Herz e Dutra (1958) - fizeram determinações de idade do gnaiss granítico do Distrito de Itabira pelo método K^{40}/Ar^{40} encontrando 500-550 milhões de anos.

- Hurley (1958) - fez determinações de idade absoluta de amostras do granito Borrachudos datando as amostras com 475 milhões de anos.

- Dorr e Barbosa (1963) - descreveram pormenorizadamente a geologia do distrito estabelecendo a estratigrafia, estrutura e caracterizando os vários tipos de minérios. É o trabalho mais completo sobre o distrito, finalizando com a estimativa de reserva das várias minas e jazidas.

- James, H. L. - em comunicação oral a Dorr (1963) acredita que as medidas da dimensão dos grãos do itabirito do Distrito de Itabira, indicam um grau de metamorfismo maior do que aquele da fácies xisto-verde.

- Dorr (1963) - faz o estudo do minério de alto teor de Minas Gerais fazendo especial referência aos tipos descritos no Distrito de Itabira durante sua pesquisa nos anos precedentes.

- Dorr (1964) - em uma publicação sobre os minérios de ferro de origem supérgena, localizados em Minas Gerais, faz especial referência aos tipos representativos encontrados no Distrito de Itabira, local de suas pesquisas mais prolongadas.

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO

A Companhia Vale do Rio Doce, que opera no Distrito de Itabira, Minas Gerais, produz anualmente aproximadamente 11 milhões de toneladas de minério de ferro de alto teor. Fornece cerca de 80 por cento da produção brasileira de minério de ferro de alto teor para exportação.

O Distrito de Itabira, objetivo das pesquisas, apresenta uma reserva aproximada de 400 milhões de toneladas de hematita de alto teor, elevando-se esta estimativa para bilhões de toneladas, uma vez considerado o itabirito.

Com exploração a céu aberto, geralmente em bancadas de 13 metros de altura produz em operação totalmente mecanizada 4.200 toneladas de minério por hora.

Com o objetivo de incrementar a produção e controle de teor, iniciou um programa de pesquisas do qual participamos, com o objetivo de estudar pormenores dos vários tipos de minérios de suas jazidas de Itabira.

A despeito da diversidade física e em parte química, a pesquisa objetivou em linhas gerais, o estudo de três aspectos principais concernentes ao minério do Distrito de Itabira: a - textura; b - oxidação-abrandamento e c - distribuição do elemento fósforo. Para o estudo destes três aspectos a pesquisa foi desdobrada em itens menores, incluindo observações sobre distribuição do minério, granulometria, composição mineralógica e química, recristalização, possíveis relações entre a oxidação e o abrandamento e aspectos outros de menor importância.

Os resultados obtidos, além de apresentarem interesse acadêmico, podem ser úteis em pesquisas técnico-econômicas, especialmente no que diz respeito à distribuição do elemento fósforo nos vários tipos de minérios do Distrito.

Para a classificação do minério caracterizaram dois fatores de distinção desde o início da pesquisa, pelo fato de julgarmos de maior relevância: primeiramente, a variação dos tipos de minérios, e superimpôsto a este fator, o estágio de alteração.

CAPITULO I - TRAÇOS GERAIS

1 - GEOLOGIA GERAL

Geològicamente o Distrito de Itabira é um apêndice do conjunto estratigráfico que constitui o Quadrilátero Ferrífero. Este Distrito foi insulado pela erosão, e localiza-se a aproximadamente 100 km a nordeste de Belo Horizonte.

Esta ilha afastada conserva as características geológicas gerais das rochas do Quadrilátero, constituindo-se de rochas dobradas e encravadas em rochas regionais graníticas e gnáissicas. A estrutura em sinclinal e constituição geológica preservaram as rochas da erosão regional. Mesmo assim, as cristas dos anticlinais subsidiários foram erodidas sendo em parte preservadas graças à resistência à erosão que a Formação Ferrífera oferece.

O mapa da Figura 2 representa os traços geológicos gerais do Distrito.

Em um trabalho bem elaborado, Dorr e Barbosa (1963) estudaram a geologia regional e local do Distrito, concluindo com hipóteses sobre a gênese do minério. Os demais pormenores geológicos sobre geologia regional podem ser consultados nos autores citados acima.

2 - ESTRATIGRAFIA

A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero foi estudada por vários autores entre os quais pode-se citar Harder e Chamberlin (1915), O. Barbosa (1954), Dorr et al. (1957). Dorr e Barbosa (1963) estabeleceram a estratigrafia do Distrito de Itabira. Esta coluna estratigráfica foi escolhida pelo caráter mais específico, por ter sido estabelecida no próprio Distrito e também por ser o estudo mais recente.

Necessário se torna observar que o Filito Caraça (Formação Batatal ?) está ausente em certas áreas do Distrito, assentando-se o Itabirito Cauê diretamente sobre xisto da Série Rio das Velhas (Grupo Nova Lima?), correspondendo a um hiato estratigráfico.

A coluna estratigráfica do Distrito de Itabira estabelecida por Dorr e Barbosa (1963) acha-se representada na Figura 1. O mapa geológico, segundo os mesmos autores, na Figura 2.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA - DISTRITO DE ITABIRA
(Segundo Dorr e Barbosa)

SÉRIE	GRUPO	FORMAÇÃO	ROCHAS
Minas	Piracicaba	Indiviso	Clorita xistos, filitos, filito grafítico, formação ferrífera, quartzito, quartzito micáceo, quartzito conglomerático.
	Itabira		Dolomito, fino para ser mapeado.
		Itabirito Cauê	Formação ferrífera da fácies-óxido com lentes de quartzito e dolomito muito finos para serem mapeados.
	Caraça	Indiviso	Quartzito, filito, conglomerado.
Grande discordância			
Rio das Velhas	Indiviso	Indiviso	Xisto dolomítico, subgrauvaca, arcósio, cloritaxisto, biotita xisto, xisto quartzoso, formação ferrífera (provavelmente correlata com grupo Nova Lima)
Pré Cambriano antigo			Sem exposição

Figura 1

MAPA GEOLÓGICO E PERFIS DO DISTRITO DE ITABIRA, MINAS GERAIS (SIMPLIFICADO DE DORR E BARBOSA, 1963)

- gp GRUPO PIRACICABA
- gi (h) GRUPO ITABIRA COM LENTES DE HEMATITA
- gc GRUPO CARAÇA
- rv DISCORDÂNCIA
- ff SÉRIE RIO DAS VELHAS COM FORMAÇÃO FERRÍFERA

- b ROCHAS BÁSICAS SEM FOLIAÇÃO (DIABÁSIO E GABRO)
- gb GRANITO BORRACHUDOS
- gg GRANITO GNAISSE
- qm QUARTZO MACIÇO
- ps PEDRA SABÃO, SERPENTINITO E ROCHAS SIMILARES

- gx GNAISSE E XISTO AMFIBOLÍTICO
- LINHA CHEIA, CONTATO APROXIMADO
- - - LINHA TRACEJADA, CONTATO INFERIDO
- LINHA CHEIA, FALHA APROXIMADA
- - - LINHA TRACEJADA, FALHA INFERIDA
- 80 DIREÇÃO E MERGULHO DAS CAMADAS
- 70 DIREÇÃO E MERGULHO DAS CAMADAS INVERTIDAS

Fig. 2

Com respeito ao mapa da Figura 2 e da Coluna Estratigráfica da Figura 1, pode-se resumir sucintamente a litologia segundo Dorr e Barbosa (1963) como constituída das seguintes rochas: um gnaiss granítico com fases intergradacionais, às vezes foliadas, outras com dobras ptigmáticas e abundantes pegmatitos, composto localmente de quartzo muscovita, outras vezes rico de biotita gradando a biotita xisto. Este gnaiss granítico está em contacto com rochas pré-cambrianas.

Ainda segundo os mesmos autores, intrusivo nas rochas da Série Rio das Velhas, ocorre um grupo de rochas máficas e ultramáficas agora alteradas a esteatitas, serpentinitos, anfibolitos e talco e actinolita xistos.

Intrusivo no gnaiss granítico, o granito Borrachudos, de granulação grossa levemente foliado com fluorita como acessório. Diques de diabásio de provável idade mesozóica cortam o granito Borrachudos e o gnaiss granítico.

O xisto da Série Rio das Velhas, encaixante da Formação Ferrífera foi colocado tentativamente no Grupo Nova Lima. Na coluna consta como indiviso dadas as características e posição estratigráfica ainda não definitivamente determinadas.

O mesmo se dá com o filito do Grupo Caraça, encaixante da Formação Ferrífera, que é colocado tentativamente na Formação Batatal. Estabelecida sua provável posição, para facilidade de expressão estas rochas serão designadas simplesmente xisto Nova Lima e filito Batatal.

Sedimentos relativamente recentes e rochas sedimentares quaternárias e terciárias como argilas, areias e cascalho em fundos de vales e terraços fluviais.

3 - FEIÇÕES ESTRUTURAIS

As rochas da Série Minas estão encaixadas nos granitos gnaisses formando contactos curvos, indicando que o fator relevante é a estrutura complexa constituída de sinclinais e anticlinais dobrados em duas ou mais fases tectônicas. Na aba noroeste do sinclinal geral formaram-se anticlinais e sinclinais menores subsidiários, conectados ao sinclinal maior (Ver Figura 2). As grandes e pequenas dobras assim como a microestrutura seguem direção geral nordeste.

O traço principal da estrutura do distrito é um sinclinal com eixo na direção nordeste mergulhando nesta mesma direção.

Dobramentos em sinclinais e anticlinais e fraturamento das camadas menos competentes tornaram-se fatores preponderantes na distribuição dos tipos de minérios, no controle do abrandamento do minério e distribuição do elemento fósforo.

Segundo Dorr e Barbosa (1963) "Presumivelmente o metamorfismo das rochas Minas e pós-Minas foi contemporâneo ou veio logo depois do período de máxima deformação".

Estes traços largos da estrutura visam apenas explicá-la no que concerne ao objetivo do trabalho. Mais pormenores poderão ser encontrados nos autores citados no texto.

Para finalizar as observações sobre a geologia, estratigrafia e estrutura poder-se-ia resumir nos seguintes itens:

- A mineralogia da Formação Ferrífera é extremamente simples, refletindo a monotonia ecológica que permitiu a sedimentação primária das camadas ricas em ferro.
- Diferenças na textura e em menor grau na composição do minério surgiram posteriormente, após os processos de metamorfismo, que culminaram com a formação de uma estrutura complexa e importante para a preservação do minério.
- Intensifica-se a diferença de textura e composição com a oxidação e lixiviação do minério em zonas preferenciais.

CAPÍTULO II - MÉTODOS DE ANÁLISE

1 - MICROSCOPIA

O estudo ao microscópio objetivou a identificação do mineral portador do fósforo e classificação da textura dos diversos tipos de minérios. A técnica de estudo ao microscópio pode ser dividida nos seguintes itens:

A - Luz transmitida

- As lâminas delgadas foram montadas com bálsamo do Canadá segundo a técnica usual. Lâminas de minério e rochas com certa friabilidade ou início de decomposição foram previamente cozidas em bálsamo.

Montou-se 35 lâminas para o estudo do xisto Nova Lima(?), filito Batatal, intrusiva fresca, itabirito duro e os vários tipos de minérios de hematita.

- Preparações sedimentares - para identificação do mineral portador do fósforo na intrusiva, foram lavados e concentrados os minerais resistentes e pesados de 8 amostras de intrusiva friável, alterada. Cada amostra foi montada em lâminas delgadas e estudada ao microscópio. Em vários esquemas desenhados ao microscópio foi utilizada câmara clara Leitz Wetzlar.

B - Luz refletida

- As seções polidas foram montadas com dois tipos diferentes de resina sintética. Uma constituída de EPIKOTE 828, FENIL GLICEDIL ETHER (PGE) e DTA, misturados respectivamente na proporção de 81, 11 e 8 por cento em peso. Outro tipo de resina utilizada denomina-se EPOXY 334.

Estas amostras foram montadas e antes do endurecimento da resina, colocadas em bomba de vácuo para possibilitar a impregnação das amostras especialmente as friáveis. Os métodos clássicos não

permitem polimento de amostras extremamente frias, a exemplo da hematita pulverulenta. O polimento foi realizado em três fases sobre discos de aço com abrasivo imerso em óleo e outras três fases com pasta de diamante em discos revestidos de um tecido especial. Os detalhes do método podem ser consultados em Short (1940) e obras similares.

Prepararam-se 45 seções polidas dos vários tipos de minérios. Dentre elas, 8 são de hematita pulverulenta.

O estudo destas seções constou da caracterização dos minerais pelo hábito, cor, resistência ao polimento, estado de agregação, refletividade, granulação e anisotropia. Para este estudo consultou-se Short (1940), Uytendogaardt (1951), Cameron (1961) e Schouten (1962).

Efetua-se estudo de amostras naturais e seções polidas com lupa binocular, para verificação da distribuição e forma dos grãos no espaço.

2 - PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE ESPECTROGRÁFICA E QUÍMICA

- 1ª fase - A amostra é submetida a um britador de mandíbula que reduz a granulação a 1,90 mm (3/4 pol.). Outro reduz a granulação a 0,95 mm (3/8 pol.).
- 2ª fase - É feita secagem da amostra em estufa, com temperatura máxima de 200°C.
- 3ª fase - A amostra seca é submetida a um pulverizador com abertura de 1,00 mm e finalmente reduzida a uma abertura de 0,074 mm. Esta granulação é própria para espectrografia e análise química por via úmida.

3 - ANÁLISES

A - Espectrômetro de raio X

Uma certa porcentagem das análises foi feita em espectrômetro de raio X automático, tipo PW 1210 marca Phillips. Para

compreender a precisão e limitações do aparelho serão dadas algumas características técnicas. Contem 15 canais para análise de elementos, mas apenas 3 estão abertos e calibrados para P, Si e Al. A análise de P é dada diretamente, mas Si e Al exigem cálculo e uso de tabela para os respectivos óxidos de Si e Al.

Para cada análise de amostras a ser feita é necessário antes avaliar grosseiramente o teor do elemento P e dos óxidos de Al e Si. Esta avaliação é feita para verificar se a amostra tem limites de teor dentro do padrão colocado no aparelho. Exemplo: Padrão 4 - Teores:

	Mínimo	Máximo
SiO ₂	0,1	15,0
Al ₂ O ₃	0,1	9,3
P	0,01	0,72

Acima ou abaixo destes teores, é necessário colocar no aparelho um outro padrão e calcular uma nova tabela. Neste caso pela falta de um outro padrão, a amostra com teor muito alto ou baixo é enviada para análise por via úmida.

Observação: Amostras com teor de sílica acima do padrão, ou seja, 15 por cento, alteram os teores de Al₂O₃ e SiO₂. Assim todas as vezes que uma amostra apresentar teor de sílica acima daquele valor, é necessário repetir as análises dosando isoladamente a Al₂O₃ e a SiO₂, com um só canal aberto. Se forem analisados os três ao mesmo tempo os teores de Al₂O₃ e P serão falsos. Normalmente confirma-se este tipo de análise por via úmida.

A precisão das análises é dada pelo padrão 4, citado acima. O número de casas dos teores máximo e mínimo indicam a precisão do aparelho.

B - Via úmida

Análises por via úmida foram feitas ou calculadas para os seguintes elementos e óxidos: Fe, FeO, SiO₂, Al₂O₃ e P. Para a análise do elemento Fe foi usado o seguinte critério:

1 - Determinação de FeO, calculado pela dosagem de Fe²⁺.

2 - Determinação de Fe₂O₃, calculado pela dosagem

de ferro total (Fe t.).

- 3 - Em algumas análises, não foram dosados os teores de Fe^{2+} , determinando-se apenas o Fe_2O_3 calculado pela dosagem do ferro total. Com referência a este item, observar que nas tabelas há várias análises de amostras em que não consta o valor de FeO .

4 - PROVAS DE TOQUE

Para desenvolvimento de possíveis relíquias de textura, clivagem, geminações, bordas de grãos recristalizados etc, foram realizadas várias reações "etch" em algumas seções polidas de alguns tipos de minérios.

Para cada teste o tempo de reação variou entre um e dois minutos de acordo com os resultados obtidos (Ver pormenores do método em Short (1940). As seções polidas foram observadas logo após a colocação da gota de reagente, permitindo fazer anotações desde o início da reação. Apenas para a reação com ácido fluorídrico (HF) não foi seguido este procedimento, dadas as precauções que tiveram de ser tomadas para evitar danos ao observador e equipamento utilizado. Os reagentes utilizados foram: HCl conc.; HNO_3 conc.; Água régia; $\text{HCl} + \text{SnCl}_2$ e HF .

5 - PÊSO ESPECÍFICO

Empregou-se o Método do Picnômetro para determinações de peso específico de alguns tipos de minérios.

No caso específico da hematita pulverulenta fez-se de terminação do peso específico real e aparente. Para a determinação do peso específico real, foi feito o desmembramento manual da amostra, já por si extremamente friável, a uma granulação convenientemente fina.

O peso específico aparente foi obtido com uma película de parafina envolvendo a amostra.

Os cálculos foram feitos de modo a eliminar nos valores obtidos a variação do peso específico relativo à parafina.

SEGUNDA PARTE
OBSERVAÇÕES - INTERPRETAÇÕES
CAPÍTULO I

1 - CLASSIFICAÇÃO DO MINÉRIO

Para o estudo das relações entre os vários tipos de minérios e o comportamento do elemento fósforo, foi mister primeiramente fazer uma classificação dos tipos de minérios de acordo com o objetivo da pesquisa.

De modo a facilitar a comparação da classificação ora seguida com aquela de Dorr e Barbosa (1963), transcreveu-se a última, com as observações necessárias feitas pelos autores. Uma das observações feitas é que a classificação proposta por eles atendia ao objetivo da pesquisa e mapeamento, qual seja, dar um caráter econômico à classificação. Assim é que o minério do Distrito de Itabira foi dividido em:

1 - Hematita de alto teor

	maciço
a - Minério duro	xistoso
	finamente bandado
b - Minério brando	
c - Minério intermediário	

2 - Minério rolado

3 - Minério de canga

4 - Itabirito

Minério de alto teor, à semelhança daquele do Quadrilátero Ferrífero, tem características químicas e físicas bem definidas, contendo acima de 66 por cento de ferro.

Neste grupo, ainda é estimada a porcentagem de material que ficaria acima de 1,27 cm após o desmonte, britagem e peneiramento, classificando-se então nos sub itens a, b e c, respectivamente denominados minério duro, brando e intermediário.

Como pode-se depreender das observações acima a classificação baseia-se fundamentalmente no teor de ferro e propriedades físicas, especialmente a granulação do minério. As implicações genéticas na classificação são secundárias.

Como poderá ser observado no quadro da Figura 3, a classificação proposta não difere basicamente daquela de Dorr e Barbosa (1963), mas separa distintamente o tipo de minério e o estágio de alteração, não distinguindo qualquer aspecto econômico do minério.

À semelhança da outra classificação, dentro de cada tipo de minério gradou-se o estado físico e químico de alteração em vários grupos. Estas subdivisões, como será visto adiante, foram propostas apenas com o objetivo de estudar a textura dos vários tipos de minérios, a oxidação e abrandamento, e determinar, se possível, o comportamento diferencial do elemento fósforo em cada um dos tipos descritos.

ROCHA MINERIO	TIPO	ESTÁDIO DE ALTERAÇÃO
Hematita	Xistosa Compacta	Dura mole pulverulenta
Itabirito		Duro mole pulverulento
Canga	Porosa Compacta	
Encaixantes e Intrusiva		Fresca Semi-alterada Alterada

Figura 3

Naturalmente existe toda gradação no "Tipo" e no "Estádio de alteração". Por exemplo, xistosa e compacta são os membros extremos de toda uma série intergradacional. Assim também quanto ao "Estádio de alteração" que inclui uma série intergradacional entre "duro, mole e pulverulento" e "fresca, semi-alterada e alterada".

2 - DISTRIBUIÇÃO GERAL DO MINÉRIO

O programa de sondagem desenvolvido pela Companhia Vale do Rio Doce nos quatro últimos anos permitiu um estudo mais por menorizado da estrutura das minas, da distribuição do minério, descrição dos testemunhos e amostragem dos mesmos. A elaboração dos perfis com dados de sondagem e mapeamento das minas em operação permitiram uma caracterização mais perfeita da geologia do Distrito. Para o estudo da distribuição dos vários tipos de minérios foram selecionados furos de sondagem em um total de 90, localizados em pontos representativos da estrutura em sinclinal, compreendendo aproximadamente 10.000 metros de testemunhos recuperados. A alta recuperação do minério facilitou sobremodo este trabalho. Classificou-se o minério e rochas encaixantes assim como a intrusiva segundo o quadro da Figura 3.

Os furos de sondagem perfurados ao longo do eixo do sinclinal do Cauê foram descritos em pormenores. Estes dados permitiram a elaboração de um perfil longitudinal ao longo do eixo do sinclinal da Mina Cauê. (Ver perfil da Figura 4).

Precedendo à consulta de perfis e tabelas com análises químicas torna-se mister explicar antes os símbolos usados. O local e furo onde foram coletadas as amostras foram representados pelos seguintes símbolos:

Ca - 26: que significa furo número 26 da Mina Cauê (Ca). Assim também para os outros locais e furos tais como:

Ca - mina Cauê

Co - mina Conceição

DC - mina Dois Córregos

Pi - mina Piriquito

Ca - Ba 1115 - significa banco da mina Cauê, que é seguido de sua cota.

Os números que identificam as amostras para análise química podem ser seguidos de letras ou mesmo apenas de um número (por exemplo: D-156 ou apenas 156). Estes símbolos são para controle cronológico interno das análises efetuadas na Companhia Vale do Rio Doce.

PERFIL A-B-MINA CAUÊ.

ESCALA HORIZONTAL: 1:3.300

Fig. 4

xisto da Formação Nova Lima e no filito da Formação Batatal, na forma de horizontes ou em cristais dispersos. Como já havia sido notado por Dorr (1965), os cristais de magnetita cortam a foliação da hematita e a estrutura do xisto e filito sem perturbá-los, provavelmente indicando seu crescimento após a formação da hematita e encaixantes.

Não há outras características que confirmem esta origem para a magnetita. Poderia-se admitir uma origem primária, suposição esta confirmada por vários autores que estudaram ocorrências semelhantes àsquelas do Distrito de Itabira.

Krotov (1940) fez observações sobre magnetita formada de soluções de origem superficial a baixa temperatura, ocorrendo nos Urais, Rússia.

Spiroff (1938) que preparou uma mistura de materiais ferrosos e férricos obtendo, em temperatura e pressão ordinárias, a magnetita.

Miles (1941) cita o mesmo fato em formações da Austrália, assim como Taylor (1949) que observou magnetita como constituinte de oólitos em arenitos da Inglaterra. Hallimond (1925) refere-se a ocorrências na Grã-Bretanha observando que a magnetita é um constituinte primário do minério.

Gruner (1926) cita minério da Formação Soudan, Vermillion, no qual ocorrem associados cristais euhédricos de hematita e octaedros de magnetita cristalizados independentemente. É dispensável a citação de outros trabalhos referentes ao mesmo assunto.

Na falta de dados mais conclusivos, podem ser indicadas três origens para a magnetita dispersa e em veios. A opção recai apenas na 1^a e 2^a hipóteses - a 3^a, referente aos veios parece ter ocorrido realmente:

1^a - Magnetita primária, formada na fase de sedimentação das rochas que vieram a constituir a Formação Ferrífera.

2^a - Magnetita formada penecontemporaneamente com a hematita xistosa, originada na fase final do metamorfismo. Condições geoquímicas locais permitiram a formação de zonas com magnetita na forma de cristais euhédricos esparsos, cortando a foliação da hematita e encaixantes sem pertur-

No perfil de direção W-E (Figura 4), a Formação Ferrífera é constituída predominantemente de hematita e itabirito. Estes tipos extremos intergradam-se no espaço. A Formação Ferrífera as senta-se sobre xistos considerados da Formação Nova Lima. Para leste parece interpor-se entre a Formação Ferrífera e o xisto Nova Lima um filito supostamente considerado da Formação Batatal, do Grupo Caraja. Sua localização exata no espaço é difícil, dada a alteração da rocha que constitui a base do sinclinal. Cortando concordantemente a Formação Ferrífera encontra-se uma intrusiva metamorfizada e alterada de composição e origem ainda duvidosa. Em outras seções esta intrusiva toma caráter discordante em relação à estrutura geral da mina. Na zona topográfica baixa, no centro leste da seção, há capeamento de canga. A oeste, nos furos de número Ca 35, 19 e 20 não há recuperação dos primeiros metros de testemunhos, impedindo a identificação da rocha que capeava a Formação Ferrífera (canga?).

O elemento fósforo foi observado quanto à sua distribuição, especialmente na zona superficial sujeita à laterização, nas zonas de abrandamento parcial e total da hematita e itabirito e na zona de alteração da intrusiva, do xisto e do filito encaixantes.

A Figura 5 constitui um mapa com isóbatas e a localização dos furos de sondagem e os limites da Formação Ferrífera com o xisto Nova Lima (?). Embaixo de cada furo foi acrescido um número que indica o número de amostras coletadas e analisadas. Nos gráficos e tabelas de análises químicas foram anotadas as profundidades de amostragem. Ao longo dos furos Ca 35, 19, 20, 21, 22, 23, 42, passa o perfil indicado na Figura 4.

Dorr e Barbosa (1963), traçaram perfis seccionando todos os corpos de minério do Distrito. Com base em dados de superfície e alguns furos de sondagem, delinearam a estrutura da Formação Ferrífera e os corpos de minério de alto teor. A falta de maior número de dados de subsuperfície não permitiu àqueles autores delimitar mais precisamente a distribuição dos vários tipos de minérios, especialmente no que diz respeito ao abrandamento.

O grande número de sondagens, a exposição em frentes contínuas de lavra e o mapeamento superficial forneceram dados valiosos para o estudo do Corpo C da Mina Conceição. Seis seções com direção N 30 W permitiram a elaboração de um bloco diagrama

Mapa parcial da Mina Cauê com o plano de furos de sondagem executado, número de amostras coletadas em cada furo e isóbatas do contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes.

Figura 5

com a distribuição dos vários tipos de minérios, representados na Figura 6.

A estrutura geral, especialmente aquela que delimita a hematita pulverulenta sugere um sinclinal até os limites da seção descrita. Mas o conjunto representado nesta figura está localizado no limbo sudeste de um sinclinal (Ver Dorr e Barbosa (1963)). A hematita pulverulenta que tem uma orientação incipiente e deslizamentos superficiais não possibilita medidas de direção e mergulho da estrutura. Os afloramentos de hematita pulverulenta "in situ" sem escorregamentos não são muito comuns, e encontrados apenas no corpo C da Mina Conceição.

Os fatos relevantes e que merecem atenção nas seções são:

- Alteração de uma faixa de espessura variável do Filito Batatal(?) no contacto com a Formação Ferrífera e cuja espessura chega a atingir mais de uma dezena de metros.
- Nos perfis de número 4 e 5 a passagem de hematita dura a hematita pulverulenta é gradual.

Neste bloco diagrama nota-se grande variação dos tipos de rochas e minérios. O estágio de alteração também é variável desde o extremo fresco ao extremo alterado. Cada tipo de rocha e estado de alteração foi amostrado para verificar o comportamento do elemento fósforo. A análise dos fatos será feita em capítulos posteriores.

3 - TEXTURA DO MINÉRIO

Muito embora o minério seja constituído primariamente de dois tipos fundamentais, i.e., hematita e itabirito, o refinamento do estudo da textura culminou com observações várias, especialmente de implicações genéticas.

A textura do minério foi estudada com respeito à mineralogia, granulação, microtectônica, substituições e preenchimentos, recristalização, geminação, porosidade, abrandamento, provas de toque e peso específico.

Alguns destes itens acham-se separados individualmente em subcapítulos; outros como granulação, microtectônica, subs

CORPO C - MINA CONCEIÇÃO

LEGENDA

E.H. - 1:6250

Fig. 6

tituição, preenchimento e geminação não foram separados pelo fato de ocorrerem nos vários tipos de minérios com características diferentes e estarem por várias vezes associados intimamente entre si.

A - Tipo de minério

No quadro da Figura 3, inicialmente será fixada a primeira coluna, contendo o "Tipo" de minério, verificando-se a variação de textura e relações genéticas dos vários "Tipos". Posteriormente será analisado o "Estádio de alteração".

a - Hematita xistosa

No grupo da hematita alinham-se dois extremos denominados xistoso e compacto. A hematita xistosa (H.x.) é constituída de cristais euhédricos alongados, placóides de hematita. Em áreas de tectonismo com veios de quartzo a hematita está representada pela especularita. A foto da Figura 7 ilustra a hematita xistosa fraturada.

Figura 7 - Hematita xistosa fraturada - Vista de uma frente de mineração-Mina Cauê-Banco 1193

A granulação dos cristais é variável com o grau de tectonismo e fatores outros desconhecidos. O estudo e medida do diâmetro maior e menor de 200 grãos em 5 seções polidas permitiu a

elaboração de um histograma. Faz-se mister lembrar que as duas dimensões medidas não representam individualmente a maior e menor dimensão dos grãos. Foram medidas em um plano apenas. Estes dados acham-se representados na Figura 8. A maior porcentagem do diâmetro maior acha-se entre 0,03 e 0,06 mm. O menor está disperso entre 0,01 e 0,04 mm. Como será visto adiante, o diâmetro maior e menor da hematita compacta acha-se disperso em uma faixa quase coincidente, caracterizando a textura em mosaico daquele tipo de minério.

Figura 8 - Histograma da distribuição da frequência granulométrica do diâmetro maior e menor da hematita xistosa.

A hematita xistosa apresenta comumente microfraturas com formas geométricas ou irregulares, anastomosadas às vezes. Estas microfraturas costumam normalmente fazer pequenos ângulos com a xistosidade. Ao longo das microfraturas formaram-se cristais placóides de hematita paralelos às bordas da microfratura. Não há indícios de serem de origem secundária posto que a granulação é a mesma da hematita xistosa e não apresentam reflexões internas caracte-

rísticas de óxidos de origem secundária. A foto da Figura 9 ilustra duas destas microfraturas.

O microfraturamento e recristalização da hematita ao longo das fraturas, parece ter ocorrido em uma fase menos plástica, pós-tectônica. A recristalização deu-se ainda sob certa pressão motivo pelo qual os cristais são placóides e orientados. É sugestivo acrescentar que estas microfraturas convergem ou cruzam em zonas de talco, como pode ser verificado na foto da Figura 9.

Na zona de hematita xistosa localizada imediatamente abaixo da canga que capeia a Formação Ferrífera ocorrem fraturas e cavidades de dimensões maiores que aquelas citadas, revestidas por óxidos de ferro de origem secundária. De maneira bastante distinta das microfraturas, as cavidades da hematita xistosa foram percoladas por águas vadasas que fluíram ao longo das mesmas, precipitando óxidos e hidróxidos secundários cujo revestimento hoje constitui goetita (Figura 10).

b - Hematita compacta

O segundo tipo de hematita denomina-se compacta (H. c.). Em termos de mineração é propriamente denominada hematita dura. Na classificação ora proposta o termo "dura" refere-se ao "Estádio de alteração" e não ao "Tipo" de minério" (Ver quadro da Figura 3).

Este tipo de minério apresenta como características principais a ausência parcial ou total de xistosidade, dureza alta e fratura que varia de irregular a conchoidal. Examinada ao microscópio de luz refletida mostra textura em mosaico, constituída de cristais de hematita sem forma e orientação óptica preferencial (Vide foto da Figura 11).

As dimensões maiores e menores de 200 grãos de hematita medidos em 5 seções polidas foram representados no histograma da Figura 12. O diâmetro maior acha-se disperso entre 0,02 e 0,09 mm e o menor entre 0,03 - 0,06 mm. Nota-se que não há uma dimensão preferencial dos cristais, caracterizando-se a textura em mosaico e uma dispersão mais ampla da granulometria.

Quatro seções polidas de hematita compacta recristalizada apresentaram lamelas de geminação muito comuns nos cristais. As maclas desenvolvem-se formando um reticulado losangular ou constituindo losangos compactos. Parecem desenvolver-se por

Figura 9 - Microfraturas em hematita pouco xistosa. Ao longo das microfraturas, cristais placóides de hematita, com granulação mais grossa, sem reflexões internas avermelhadas, típicas de óxidos de ferro de origem secundária. As duas microfraturas ligam manchas de talco (côr preta) - Fotomicrografia de seção polida, nícols paralelos (x 90). Mina Cauê.

Figura 10 - Hematita xistosa fraturada (cinza claro). As cavidades são forradas por microcristais de goetita (cinza escuro) que é anisótropo, de refletividade mais baixa que a hematita. Cavidades com coloração preta. Fotomicrografia de seção polida, nícols paralelos (x 90).

Figura 11 - Hematita compacta recrystalizada, anhedral, não orientada, grosseiramente equidimensional com textura em mosaico. Cinza claro a escuro, hematita. Escuro a preto, cavidades. Fotomicrografia de seção polida, nícol semi cruzado (x 50)

esforços impostos aos cristais.

Em faixas submilimétricas de hematita compacta recrystalizada cortando a hematita xistosa, foram observados cristais daquele mineral com extinção ondulante, que denotam esforços. Na hematita xistosa adjacente não foi observado este tipo de extinção. As características destas faixas de hematita compacta indicam que a recrystalização não foi estática.

Na foto da Figura 13 nota-se as lamelas de geminação. Os cristais de hematita desta foto são anormalmente grandes. Cristais de hematita curvos, associados à geminação indicam também esforços durante a recrystalização.

A hematita xistosa e a compacta, como extremos de uma série intergradacional não são muito comuns. O tipo mais representativo é um meio termo entre a xistosa e a compacta, denominada hematita xistosa compacta (H. x. c.). A textura é mais xistosa que compacta.

O tipo de hematita denominada compacta ocorre mais

Figura 12 - Histograma da distribuição da frequência granulométrica do diâmetro maior e menor da hematita recristalizada.

raramente que os outros tipos. Todos os tipos de minérios da Formação Ferrífera contêm talco disperso ao longo da xistosidade, na forma de veios preenchendo fraturas e associados a veios de quartzo.

No Banco 1193 da Mina Cauê, próximo ao contacto da Formação Ferrífera com o xisto Nova Lima encaixante, ocorre uma lente de hematita dentro do xisto. A lente apresenta talco ao longo da xistosidade e em fraturas. O xisto pelo seu caráter menos permeável impediu a penetração do talco.

O estudo de várias seções polidas demonstrou que a gênese da hematita compacta está geralmente direta ou indiretamente relacionada ao mineral talco. Difícil se torna afirmar se o talco é ou não proveniente de outro mineral. Ele atua ou pelo menos associa-se aos fenômenos que originaram a hematita com textura em mosaico. O tectonismo é um destes fatores.

A Figura 14, desenhada com câmara clara mostra o desenvolvimento de "zonas" de hematita compacta neoformada junto e nas proximidades de manchas de talco. Na figura da esquerda, a faixa de talco atravessa hematita xistosa, formando "zonas" de hematita compacta neoformada. A figura da direita representa hematita

Figura 13 - Faixa de hematita compacta recristalizada, de granulação grossa, envolvida por hematita xistosa de granulação fina. As lamelas de geminação da hematita compacta recristalizada foram causadas por esforços. Cinza escura - quartzo. Preto - cavidades. Fotomicrografia de seção polida, nícol semicruzados (x 54).

xistosa compacta, levemente recristalizada com cristais placóides de hematita sem orientação óptica preferencial. Junto às manchas de talco formam-se zonas de hematita compacta neoformada de textura em mosaico. A associação da "zona" de hematita compacta neoformada com o talco é bastante comum mas não é uma condição necessária. Várias ocorrências de hematita compacta não apresentam vestígios de talco. É razoável supor que ao fator responsável pela gênese da hematita neoformada, provavelmente tectônico, associa-se o talco ou o mineral anterior que transformou-se em talco.

A Figura 15, desenhada com câmara clara repre -
senta substituição da hematita por talco. Na massa de talco são no -
tados pequenos cristais remanescentes de hematita com bordos acen -
tuadamente irregulares. Em cristais raros, de dimensões acima da
média, a substituição da hematita por talco ocorre em faixas alter -
nadas dentro do cristal de hematita, segundo o maior alongamento.

Figura 14 - Zonas de hematita compacta neoformada, associada ao talco. Nas proximidades do talco a hematita apresenta textura em mosáico, com cristais anhédricos e sem orientação óptica preferencial. Dentro das zonas de hematita compacta não há talco disperso. Esquematizado com câmara clara.

O estudo minucioso de algumas "zonas" de hematita compacta associadas ao talco, indica que os cristais de hematita estão em parte ópticamente isorientados e que esta orientação é diferente daquela apresentada pela hematita xistosa adjacente. Os cristais de hematita neoformada durante sua gênese estiveram sob esforços com componentes tectônicos em direções diferentes daqueles que orientaram a hematita xistosa, constituindo uma segunda fase tectônica, muito embora de menor intensidade que a anterior. Acresce ainda observar que as análises químicas de hematita compacta dão alto teor de ferro, acima dos outros tipos de minérios. O fósforo, ao contrário, apresenta-se anormalmente baixo (Ver Tabela 10).

Figura 15 - Substituição da hematita por talco. Os cristais remanescentes de hematita têm bordos crenulados, irregulares. Desenhando com câmara clara.

Relações de campo a serem citadas posteriormente, associadas às características descritas nas seções polidas confirmam a recristalização da hematita ou itabirito imprimindo textura em mosaico ao minério.

Na hematita compacta recristalizada não foram encontradas microfraturas contendo hematita. Em se tratando de hematita que foi totalmente recristalizada era de se esperar, que de fato, as microfraturas fossem obliteradas neste tipo de minério.

Em seções de hematita xistosa contendo grande número de microfraturas é mais ou menos comum encontrar-se "núcleos" de hematita compacta recristalizada e textura em mosaico com forma arredondada ou lenticular. As microfraturas ao atingir estes "núcleos" sofrem uma inflexão lateral contornando-o. O talco é segregado para

fora dos "núcleos" concentrando-se na periferia.

Figura 16 - Hematita compacta xistosa com "núcleo" de hematita recrystalizada de granulação mais fina.
Hematita xistosa: euhedral, placóide, orientada.
Hematita compacta recrystalizada: anhedral, textura em mosaico.
Cinza claro, hematita. Cinza escuro, quartzo e cavidades. Fotomicrografia de seção polida, nícols semicruzados (x 57).

A foto da Figura 16 contém um "núcleo" de hematita compacta recrystalizada sem microfraturas. Pela forma aproximada e dimensão, poder-se-ia supor que estes núcleos fôsem formados pela martitização da magnetita e rearranjo posterior dos cristais de hematita. Os fatores citados a seguir são contrários a esta origem:

- 1 - Ocorrem lado a lado núcleos de hematita compacta de textura em mosaico e cristais de magnetita martitizados.
- 2 - Em uma amostra foi encontrado um cristal de magnetita martitizado dentro de um núcleo de hematita compacta com textura em mosaico.
- 3 - A granulação dos cristais de hematita que compõem o núcleo é bem menor do que aquela apresentada pelos cristais de hematita que compõem a magnetita martitizada.

O fenômeno da formação de microfraturas e núcleos, que é a bem dizer o gérmen da recristalização, parece ser penecon-temporâneo.

A formação de núcleos de certas zonas do minério as socia-se geralmente com as microfraturas provenientes do tectonis-mo. Em raras amostras nota-se a nucleação sem vestígios de micro-fraturas. A forma e distribuição dos núcleos parecem indicar que de modo geral o processo de recristalização foi estático. Provàvelmen-te outro fator associado ao tectonismo, qual seja, temperatura ou agentes químicos devem ter sido também ativos na formação dos nú-cleos.

Segundo Edwards (1954), durante o metamorfismo minerais de alta dureza recristalizam-se com deformações a alta tem-peratura, entre os quais cita a pirita, cobaltita, arsenopirita e mag-netita. Minerais de dureza intermediária recristalizam-se mais fà-cilmente. Neste caso, para a recristalização da hematita é possível admitir-se que a alta temperatura foi um dos fatores que condiciona-ram a recristalização.

Uma certa porcentagem de cristais de hematita xistosa e hematita compacta, que chega a atingir 40%, apresenta finas la-melas ou intercrescimentos microscópicos alongados e paralelos. Em geral, seu alongamento coincide com o maior alongamento dos cris-tais. Sua dimensão submicroscópica não permitiu identificação mine-ralógica. Tanto podem constituir lamelas de hematita com orientação óptica diferente, produzidas por microgeminção, quanto intercresci-mento natural de outro óxido em hematita.

c - Porosidade

A hematita xistosa e a compacta apresentam porosida-des diferentes. A hematita xistosa tem poros mais finos, porém mais numerosos por unidade de área. As fotos da Figura 17 ilustram vá-rios tipos de porosidades.

Muito embora não tenham sido feitos testes de perme-abilidade, dados de campo comprovam que a hematita xistosa apresen-ta permeabilidade maior do que a hematita compacta recristalizada. Se pelas fotografias (Figura 17) pode-se observar que a porosidade da hematita compacta recristalizada é maior pode-se também inferir que a isorientação dos grãos placóides da hematita xistosa deve facilitar

A-Hematita xistosa de granulação média.

B-Hematita compacta recristalizada de granulação grossa. A zona escura contém poros e talco.

C-Hematita pouco xistosa de granulação fina.

D-Hematita pouco xistosa, porosa, de granulação média.

Figura 17 - A, B, C e D - Nícols descruzados (x 37). Fotomicrografias de seções polidas.

a percolação de soluções superficiais, aumentando consideravelmente a permeabilidade deste tipo de minério. De fato, grosso modo verifica-se nas minas que quanto mais xistosa a hematita, mais passível de abrandamento ela é. A permeabilidade é fator relevante no processo de abrandamento do minério.

A hematita xistosa quando crenulada apresenta maior porosidade. (Foto da Figura 18). A crenulação é um fenômeno comum no contacto da Formação Ferrífera com as rochas encaixantes. É curioso notar que o abrandamento do minério ocorre com mais frequência preferencialmente nesta zona de contacto do minério com as encaixantes, onde a crenulação do minério é bastante comum. Provavelmente a porosidade maior nesta área seja fator importante para a ativação do processo de abrandamento.

Figura 18 - Hematita xistosa crenulada - Cristais tabulares de hematita, orientados, euhedrais. Porosidade maior. Cinza claro, hematita. Cinza escuro, resina e cavidades. - Fotomicrografia de seção polida, nículos descruzados (x 50).

d - Itabirito

O itabirito, que é constituído essencialmente de hematita, quartzo e/ou dolomita, não apresenta variações que permitam subdividi-lo em dois ou mais tipos.

Este tipo de rocha foi descrito por vários autores que visitaram o Quadrilátero Ferrífero e o Distrito de Itabira, entre os quais pode-se citar: Derby (1910), Leith and Harder (1911), Harder and Chamberlin (1915), Tyler (1948) e Dorr e Barbosa (1963). As numerosas descrições dispensam novos pormenores.

O estudo do abrandamento do minério do Distrito de Itabira suscitou intensas e extensas pesquisas com o objetivo de localizar itabiritos dolomíticos. Até a pesquisa de Dorr e Barbosa (1963) nada de positivo havia sido ainda encontrado. Graças ao grande número de furos de sondagem realizados recentemente foi localizada uma sequência de itabiritos dolomíticos com sete metros, coletados no Furo F-3 da Mina Piriquito. Acima e abaixo desta sequência seguem-se zonas alteradas constituídas de material de difícil identificação, talvez itabirito dolomítico alterado. O itabirito não tem um bandamento nítido como aquele encontrado na maioria dos itabiritos quartzosos. A maior plasticidade do dolomito permitiu deformações, com movimentação ao longo da xistosidade e de fraturas discordantes da xistosidade.

O itabirito dolomítico apresenta uma certa porcentagem de quartzo associado às bandas dolomíticas.

Segundo o mapa de Dorr e Barbosa (1963), representado simplificado na Figura 2, a jazida Piriquito está próxima de uma falha cujos contactos indicam que o bloco onde se localiza a jazida foi deprimido, sendo mais bem preservado da erosão. Segundo os autores citados acima é uma falha que parece deslocar a Formação Ferrífera de aproximadamente 100 metros no vale de Dois Córregos.

Segundo conclusões dos geólogos do DNPM e do USGS, em algumas zonas do itabirito, o quartzo é substituído parcial ou totalmente por dolomita, formando assim itabirito-dolomítico. Estas rochas estão normalmente no terço superior da Formação Itabirito Cauê e vão até a zona de transição entre o Cauê e a Formação Gandarela, à qual se sotopõe.

O fato do bloco da Formação Ferrífera que constitui a jazida Piriquito ter sido relativamente deprimido pode ter preservado uma zona estratigráficamente superior em relação às demais rochas do Distrito, explicando assim a ocorrência de uma pequena faixa de itabirito dolomítico naquela jazida. A falta de dados seguros de espes

sura, profundidade e estrutura colocam esta assertiva no campo da cogitação. De qualquer forma, o fato do itabirito dolomítico ter sido localizado apenas e justamente nesta mina é bastante sugestivo.

À semelhança do minério constituído de hematita xistosa, as bandas de hematita do itabirito que contém talco e fraturas, apresentam granulação maior que a média da amostra. Embora em ocorrências raras, notam-se algumas microfraturas com cristais de hematita placóide. O quartzo é ocasionalmente substituído pela hematita. A Figura 19, desenhada com câmara clara ilustra esta substituição. Notar o bordo crenulado na zona de substituição do quartzo. Esta

Figura 19 - Substituição do quartzo por hematita - Na zona de substituição o quartzo apresenta bordos crenulados. Desenhado com câmara clara.

substituição foi notada apenas em raras ocorrências e em pequena escala. Não há dados que comprovem uma ação regional de substituição. Mesmo assim, este fenômeno foi registrado também no itabirito. Seg-

mentos de itabirito apresentam zonas irregulares (Foto da Figura 20), ou faixas regulares de contacto abrupto entre a hematita e o quartzo, este sendo substituído por aquela (Foto da Figura 21). As espessuras destas faixas variam de alguns cm até 30 cm. O estudo em seção polida da zona substituída mostrou uma porcentagem mínima de quartzo, frequentes vezes mesmo ausente. A xistosidade é parcial ou ausente. Na foto da Figura 20 nota-se que o contacto da zona de hematita com o itabirito normal é de um lado discordante. Uma das zonas de substituição da hematita apresenta-se excepcionalmente porosa. É difícil afirmar-se se esta porosidade é natural ou proveniente da lixiviação do quartzo do antigo itabirito. É visível entre os cristais de hematita

Figura 20 - Faixa de hematita compacta, pouco xistosa cortando em discordância itabirito. Os cristais de hematita são anhedrais, com pequena porcentagem de cristais placóides. A textura é em mosaico, muito pouco xistosa. A hematita do itabirito é euedral, placóide, orientada segundo a xistosidade. Testemunho de sondagem. Escala = 2 cm. Furo Co2-F.49 - Profundidade: 290,5 m.

a existência de duas gerações: uma constituída de cristais placóides, euhédricos, remanescentes do itabirito, que dão textura xistosa, opticamente isorientada e outra geração mais nova, constituída de cristais anhédricos sem orientação óptica preferencial. As duas texturas se sobrepõe na zona de substituição do itabirito por hematita, caracterizando um minério de alta porosidade. Não há dados, nes

Figura 21 - Faixa de hematita compacta cortando concordantemente itabirito normal. Na faixa, os cristais de hematita são anhedrais, não orientados, com textura em mosaico. A hematita que constitui o itabirito é euhedral, isorientada, tabular. Face polida de um testemunho de sondagem. Escala = 2 cm. Furo: Co 12A. Profundidade 137,9 m.

Figura 22 - Itabirito dobrado, constituído de camadas de hematita euhedral, placóide (cinza clara) e camadas de quartzo com talco (cinza escura). O quartzo e talco são mais facilmente lixiviados formando zonas porosas - Notar pequenas falhas, uma delas, à esquerda com rejeito. Ao longo e próximo das falhas, cristalização de hematita. Face polida. Escala = 2 cm. Banco 1190. Mina Cauê.

te caso, para afirmar se houve apenas recristalização com lixiviação do quartzo ou se ocorreu substituição, com ferro carreado de áreas adjacentes.

A foto da Figura 21 ilustra uma faixa bem delimitada de hematita no itabirito. A ausência de quartzo, os contactos paralelos e bruscos, a ausência parcial ou total de xistosidade sugerem substituição e/ou recristalização nestas faixas. Foi verificado apenas em segmentos pequenos, sendo provavelmente confundidos com lentes de hematita quando de grandes dimensões. O abrandamento do itabirito ocorre muitas vezes de forma diferencial. As zonas que contêm maior porcentagem de talco e quartzo são mais facilmente lixiviadas, ficando como remanescente, hematita mole e branda. Na foto da Figura 22 vê-se itabirito com bandas dobradas com certa porcentagem de talco e quartzo. O talco deve ter penetrado com mais facilidade ao longo das bandas quartzosas, que são mais porosas. O talco e quartzo são alterados e lixiviados mais facilmente formando as faixas porosas. O talco é um fator importante no abrandamento do minério.

Na foto da Figura 16 foram ilustrados núcleos de hematita compacta recristalizada de forma arredondada ou lenticular em hematita xistosa. Estes núcleos ocorrem também em itabiritos. Eles são constituídos de cristais anédricos de hematita de forma equidimensional, textura em mosaico, sem orientação óptica preferencial. Ocorrem encravados em zonas de quartzo ou pelo menos com predominância deste mineral. Nas bordas, junto ao contacto da hematita com o quartzo é nítida a substituição do quartzo por hematita. A foto da Figura 23 ilustra parte das observações feitas.

e - Magnetita

Associada com os vários tipos de minérios, ocorre magnetita na forma de cristais euhédricos de dimensões que variam de submilimétricas a 20 mm. Estes cristais ocorrem na forma de veios cuja espessura varia de alguns cm até 40 cm, e também em macrocristais dispersos no minério de granulação mais fina.

Estes veios de magnetita euhédrica de granulação mais grossa são interpretados por Dorr (1965), como indicativos de flúidos de natureza diferente daqueles que supôs-se formaram os corpos principais de minérios.

Cristais euhédricos de magnetita ocorrem também no

Figura 23 - Itabirito com núcleos de hematita compacta recrystalizada de forma arredondada a lenticular: Os cristais de hematita (não visíveis) são anhedrais sem orientação óptica preferencial com textura em mosaico. Cinza claro núcleos de hematita. Cinza escuro, quartzo. Fotomicrografia de seção polida, nícols semicruzados (x 45).

Figura 24 - Cristal de magnetita em início de martitização. Cinza escuro, magnetita remanescente. Cinza claro, hematita. Fotomicrografia de seção polida, nícols descruzados (x 55).

xisto da Formação Nova Lima e no filito da Formação Batatal, na forma de horizontes ou em cristais dispersos. Como já havia sido notado por Dorr (1965), os cristais de magnetita cortam a foliação da hematita e a estrutura do xisto e filito sem perturbá-los, provavelmente indicando seu crescimento após a formação da hematita e encaixantes.

Não há outras características que confirmem esta origem para a magnetita. Poderia-se admitir uma origem primária, suposição esta confirmada por vários autores que estudaram ocorrências semelhantes àquelas do Distrito de Itabira.

Krotov (1940) fez observações sobre magnetita formada de soluções de origem superficial a baixa temperatura, ocorrendo nos Urais, Rússia.

Spiroff (1938) que preparou uma mistura de materiais ferrosos e férricos obtendo, em temperatura e pressão ordinárias, a magnetita.

Miles (1941) cita o mesmo fato em formações da Austrália, assim como Taylor (1949) que observou magnetita como constituinte de oólitos em arenitos da Inglaterra. Hallimond (1925) refere-se a ocorrências na Grã-Bretanha observando que a magnetita é um constituinte primário do minério.

Gruner (1926) cita minério da Formação Soudan, Vermillion, no qual ocorrem associados cristais euhédricos de hematita e octaedros de magnetita cristalizados independentemente. É dispensável a citação de outros trabalhos referentes ao mesmo assunto.

Na falta de dados mais conclusivos, podem ser indicadas três origens para a magnetita dispersa e em veios. A opção recai apenas na 1^a e 2^a hipóteses - a 3^a, referente aos veios parece ter ocorrido realmente:

- 1^a - Magnetita primária, formada na fase de sedimentação das rochas que vieram a constituir a Formação Ferrífera.
- 2^a - Magnetita formada penecontemporaneamente com a hematita xistosa, originada na fase final do metamorfismo. Condições geoquímicas locais permitiram a formação de zonas com magnetita na forma de cristais euhédricos esparsos, cortando a foliação da hematita e encaixantes sem pertur-

bá-los.

3^a - Veios de magnetita de granulação mais grossa, ocorrendo em prováveis paleofraturas, formados por soluções hidrotermais que cortaram o minério após o metamorfismo. Estes veios são discordantes da estrutura do minério.

Segundo Muan (1955), a temperatura de conversão de hematita a magnetita aumenta com o crescimento da pressão de oxigênio. Sob pressão de oxigênio de uma atmosfera, a conversão de hematita a magnetita por ação de flúidos ocorre a aproximadamente 1450°C. A equação que representa esta conversão é a seguinte:

Provavelmente a matéria prima para a formação destes veios foi a própria Formação Ferrífera, especialmente pelo fato de não terem sido descritos veios com magnetita nas rochas encaixantes.

Como será visto posteriormente na Figura 44, a oxidação da magnetita a hematita (martitização), diminui com a profundidade.

A porcentagem de magnetita no minério é muito pequena. Dorr (1965) calculou a porcentagem no Quadrilátero Ferrífero (?) como menor de 3 por cento. Em Itabira, provavelmente a porcentagem aproxima-se deste valor. Não foram encontrados cristais de magnetita no itabirito embora devam ocorrer, posto que apresentam um certo teor de FeO nas análises químicas. A pseudomorfose da magnetita em martita é comum. Na zona superficial do minério praticamente toda a magnetita foi martitizada, oxidando-se a hematita. Alguns raros cristais de magnetita apresentam-se em início de martitização (Foto da Figura 24).

A foto da Figura 25 ilustra um cristal de magnetita martitizada com manchas reliquiais de magnetita remanescente. Notam-se duas direções preferenciais de martitização segundo as quais formam-se os cristais de hematita ou manchas alongadas. São as direções dos planos de octaedro (111) da magnetita.

Os cristais de hematita formados por martitização da magnetita têm geralmente dimensões maiores do que aqueles que constituem a amostra e circundam o cristal de magnetita.

Figura 25 - Octaedro de magnetita martitizada. Remanescentes de magnetita de cor cinza pouco mais escura, bordos irregulares, porosos. Cristais de hematita de granulação grossa (pouco visíveis) intercrescidos nos planos (111) da magnetita (visíveis apenas dois planos). Fotomicrografia de seção polida, nicols semicruzados (x 45).

Em algumas zonas restritas do minério, cristais de magnetita foram martitizados de forma homogênea constituindo um só cristal de hematita, pseudomorfo de magnetita, com forma externa deste mineral. Estas ocorrências são raras. Estes cristais são substituídos em suas bordas e ao longo de direções preferenciais de octaedro (111), por hematita de uma geração mais jovem e orientação óptica diferente (Figura 26). Com respeito a este fenômeno Dunn (1937) cita duas variedades de hematita, α e β . Diz ele que a hematita α substitui magnetita e mostra refletividade um pouco maior. Hematita β é mais jovem e ocorre apenas como material intersticial ou como bordas ao redor da hematita.

A dificuldade em determinar as características ópticas (com exclusão da anisotropia) da hematita intersticial impediram sua comparação com a descrição de Dunn. Mesmo assim a comparação é possível dadas as características convergentes das duas ocorrências.

Figura 26 - Magnetita martitizada constituindo um só cristal de hematita. Ao redor deste cristal, hematita xistosa, não representada no esquema. Nas bordas e ao longo dos planos de octaedro (111) da martita, nova geração de hematita mais jovem, neoformada, substituindo a geração mais antiga. Mina Cauê - Seção polida, desenhada com câmara clara.

É de se notar que estes dois tipos de hematita ocorrem exclusivamente em cristais de magnetita que foram martitizados homogêaneamente, constituindo apenas um cristal de martita. Em várias zonas do minério, a magnetita é lixiviada, deixando relictos

octaédricos com a forma externa do cristal. Raramente estas cavidades reliquias permanecem vazias, sendo via de regra preenchidas por talco. Por outro lado o talco substitui a magnetita. Há várias ocorrências de cristais de magnetita parcialmente substituídos por talco. A quase totalidade dos cristais de magnetita acham-se revestidos por uma película de talco intersticial que preenche o contacto do cristal de magnetita com a hematita circunjacente.

Com relação à dimensão, a magnetita constitui macrocristais dentro do minério. Seu crescimento deu-se sem perturbação dos cristais de hematita circunjacentes, cortando a foliação do minério.

Figura 27 - Crescimento de macrocristais de magnetita martitizada. A magnetita envolve cristais euhédricos placóides maiores de hematita. Desenhada de seção polida, com câmara clara.
- Mina Cauê.

Segundo cálculos de Gruner (1926) baseados nas células unitárias, com a oxidação da magnetita a hematita há um aumento de volume de 5,2 por cento. A Figura 27 mostra martitização da magnetita com aumento de volume. Não há dados para afirmar se o aumento foi anterior à martitização. Várias características parecem indi -

car um crescimento pós-tectônico. Com o crescimento por cristalização e/ou oxidação, a magnetita circundou a extremidade de alguns cristais placóides maiores de hematita.

A magnetita distribui-se no minério em zonas extensas (rever a Figura 4). Nos locais onde ocorre, o abrandamento do minério é mais lento. Parece que a magnetita acha-se relacionada a zonas de recristalização branda. Com a recristalização, o minério perde o caráter xistoso, diminui a porosidade, oblitera as microfaturas e apresenta teor de ferro alto, e de sílica e alumina baixos. Todos estes fatores conjugados devem concorrer para uma maior resistência do minério ao abrandamento.

f - Canga

A descrição macroscópica e classificação da canga será omitida neste capítulo. Posteriormente será descrita. Considerações serão feitas somente com respeito à textura do cimento e dos blocos de hematita englobados.

Os blocos cimentados na canga são constituídos de hematita xistosa, itabirito e hematita compacta recristalizada. Eventualmente as encaixantes participam da fração mecânica grosseira da canga.

Na periferia dos blocos de hematita e itabirito, no contacto com o cimento há indícios de lixiviação dos cristais de hematita, que tomam aspecto crenulado. A porosidade dos blocos mantém-se original. Os blocos de hematita não apresentam reflexões internas avermelhadas. Algumas cangas localizadas nas proximidades de itabiritos apresentam numerosos grãos de quartzo agregados no cimento. O cimento é constituído de cristais irregulares e placóides de hematita com granulação bastante variável. A dimensão média dos cristais é menor do que aquela dos cristais que constituem os blocos de hematita. Ver foto da Figura 28.

Os cristais alongados, que constituem de 20 a 30 por cento do cimento, orientam-se paralelos com as bordas dos blocos mais próximos, circundando-os. Nem sempre isto ocorre. Os cristais menores, equigranulares, distribuem-se caoticamente. O cimento é extremamente poroso. Nas zonas mais porosas, cavernosas, com cristais mais esparsos, a dimensão dos cristais de hematita é maior. Possivelmente, dada a alta porosidade, o fluxo de soluções nestas

Figura 28 - Blocos de hematita pouco xistosa agregados por cimento constituído de cristais de hematita (centro) dispostos em tórno dos blocos. A granulação do cimento hematítico é localmente maior do que aquela da hematita que constitui os blocos. Cinza escuro: cavidades. Fotomicrografia de seção polida, nícol des cruzados (x 50).

Figura 29 - Hematita semipulverulenta - Início de abran damento de hematita xistosa. Seção perpendicular à xistosidade. Branco: hematita - Cinza claro: resina. Fotomicrografia de seção polida, nícol des cruzado (x 63). Mina Con-
ceição.

áreas era mais fácil, possibilitando o crescimento mais rápido e desimpedido dos cristais. Sua dimensão chega a ser maior do que aquela dos cristais de hematita que constituem os blocos. Nas zonas de cimento menos poroso os cristais são irregulares e de dimensões menores. Nestas duas áreas, reflexões internas avermelhadas em material microcristalino indicam a presença de uma pequena porcentagem de óxidos de ferro hidratados. Os cristais de hematita que delimitam as bordas dos blocos de hematita apresentam zonas com reentrâncias, poros dentro dos cristais, que indicam lixiviação recente. Os bordos dos cristais ficam crenulados.

B - Estádio de alteração

a - Hematita dura, mole e pulverulenta

Serão feitas referências a um processo que não pertence ao tipo primário do minério, mas foi superimposto em uma fase posterior. Denomina-se abrandamento do minério e corresponde a um processo de alteração secundário (e/ou primário?) que leva em sua fase final à desagregação completa dos componentes mineralógicos do minério. Entende-se então por minério duro o minério fresco, isento de qualquer alteração química. No extremo oposto encontra-se o minério pulverulento, poroso, que se desagrega ao simples toque dos dedos.

Dentro deste conceito subjetivo e com um fim específico foram estudados os vários estádios de alteração do minério. No grupo hematita dura, incluiu-se os dois tipos principais de minérios que são a hematita xistosa, a hematita compacta e seus subtipos. A hematita mole é proveniente do abrandamento parcial da hematita xistosa e/ou hematita compacta, especialmente a primeira que é mais susceptível de abrandamento como já foi discutido anteriormente. O estudo da hematita mole e pulverulenta foi feito em seções polidas e amostras naturais.

Em uma fase inicial o processo de abrandamento parece desenvolver-se com a lixiviação da borda dos cristais de hematita. A foto da Figura 29 representa o início do abrandamento com a hematita mole ou semipulverulenta. Com o desenvolvimento do processo podem formar-se localmente cavidades na superfície dos cristais. Em uma fase final, os cristais menores são completamente li-

Figura 30 - Hematita pulverulenta tipo pouco xistoso. Seção perpendicular à xistosidade. Branco: hematita; Cinza claro: resina - Mina Conceição - Furo Co 58 - Profundidade: 25,9 m - Fotomicrografia de seção polida, nícol descruzado (x 110).

Figura 31 - Hematita pulverulenta tipo xistoso. Notar os bordos irregulares dos cristais de hematita indicando lixiviação. Seção perpendicular à xistosidade. Branco: hematita - Cinza claro: resina - Mina Conceição - Furo: Co 7 - Profundidade: 52,7 m. - Fotomicrografia de seção polida, nícol descruzado (x 110).

xiviados dando aspecto poroso à amostra, segundo se pode notar nas Figuras 30 e 31. As bordas dos cristais variam de irregulares a dentilhadas, evidenciando o processo de dissolução química.

Foi elaborado um histograma (Figura 32) contendo medidas do diâmetro maior e menor de 200 cristais, em 4 seções polidas de hematita pulverulenta. A maior porcentagem do diâmetro

Figura 32 - Histograma da distribuição da frequência granulométrica do diâmetro maior e menor da hematita pulverulenta.

maior acha-se entre 0,01 e 0,05 mm. O menor está disperso entre 0,01 e 0,02 mm. Um quadro com a distribuição da frequência dos três tipos de minério, com dados obtidos nas Figuras 8, 12 e 32 acha-se representado na Figura 33. Por meio d'êlê pode-se comparar a granulção da hematita nestes três tipos de minérios.

Tanto o diâmetro maior quanto o menor da hematita pulverulenta são menores do que os valores correspondentes para a

DISTRIBUIÇÃO DA GRANULAÇÃO DA HEMATITA XISTOSA, COMPACTA RECRISTALIZADA E PULVERULENTA

TIPO	DIÂMETRO	DISTRIBUIÇÃO (mm)
Hematita xistosa	maior	0,03 - 0,06
	menor	0,01 - 0,04
Hematita compacta recristalizada	maior	0,02 - 0,09
	menor	0,03 - 0,06
Hematita pulverulenta	maior	0,01 - 0,05
	menor	0,01 - 0,02

Figura 33

hematita xistosa. A hematita compacta recristalizada apresenta diâmetros maiores que a hematita pulverulenta e a hematita xistosa. Além disto, a diferença entre o diâmetro maior e menor da hematita compacta recristalizada é muito menor do que a diferença entre estes diâmetros para a hematita xistosa e hematita pulverulenta.

b - Itabirito pulverulento

Assim como a hematita, o itabirito após o processo de abrandamento pode originar o tipo pulverulento. Nas amostras estudadas macroscopicamente, nota-se lixiviação preferencial do quartzo e em menor porcentagem da hematita. A solubilidade do quartzo é relativamente alta em relação à solubilidade da hematita. Esta diferença de solubilidade por força dos fatores químicos ambientes persiste até grandes profundidades, como é o exemplo da amostra da foto da Figura 34, coletada a 157,3 metros de profundidade.

Segundo cálculos recentes feitos por Eichler (1967), as águas pluviais atualmente dissolvem aproximadamente 33 vezes mais sílica do que ferro. Conclui ele também que esta dissolução não é influenciada por reações bioquímicas.

Ainda segundo o mesmo autor a solubilidade destes minerais está sujeita a controles sazonais, com maior dissolução nos meses secos. A água subterrânea, sob as atuais condições de intemperismo, dissolve em média 7,55 ppm de SiO_2 , e somente 0,23 ppm de Fe.

Figura 34 - Itabirito com lixiviação preferencial do quar
tzo e em menor porcentagem da hematita.
Testemunho de sondagem do Furo Co 12A,
Mina Conceição - Profundidade de 157,3 m.
Escala = 2,0 cm.

Eichler (1967) observa que além dos fatores acima citados, a granulação do itabirito é um fator essencialmente importante no processo de dissolução.

Reproduziu-se adiante um quadro com os dados simplificados obtidos pelo citado autor. Fêz ele a experiência número 1 com itabirito fresco mais fino (com grãos de quartzo até 0,1 mm e de hematita até 0,5 mm) expostos em um balde de plástico à água da chuva. A experiência número 2 foi verificada em ocorrências naturais de itabirito mais grosso com quartzo variando de 0,5 a 1,0 mm e hematita até 2,0 mm.

As duas experiências estenderam-se por 153 dias. Resultados obtidos:

DISSOLUÇÃO DE HEMATITA E QUARTZO

Nº 1	Quartzo (até 0,7 mm)	Hematita (até 0,5 mm)	-
	SiO ₂	Fe	Al
	6,20 (ppm)	0,34 (ppm?)	1,95 (ppm)
Nº 2	(0,5 - 1,0 mm)	(até 2,0 mm)	-
	1,60 (ppm)	0,14 (ppm)	0,84 (ppm)

PROVAS DE TOQUE

Tipos de minérios	Hematita compacta recristalizada	Hematita xistosa	Hematita pulverulenta	Hematita na martita	Magnetita (Relictos)	Canga Cimento	Canga Hematita	Goetita
Reagentes								
HCl concentrado	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
HNO ₃ concentrado	(2)	(2)	(2)	---	---	(2)	(2)	---
Água régia	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)***	(2)	(2)	(2)
HCl + SnCl ₂	(2)	(2)	(2)	(3)**	(4)*	(2)	(2)	(2)*****
HF	(2)	(2)	(2)	(2)	---	(2)***	(2)	(2)

— Reação negativa. + Reação positiva.

(2) Número de testes com cada tipo de minério.

* Deu ênfase aos planos (111) segundo os quais ocorre a martitização; perfurações na superfície dos cristais e corrosão das bordas. Dá coloração avermelhada com nicols cruzados.

** Alguns cristais de hematita contidos no interior da magnetita martitizada são levemente corroídos e escurecem tomando coloração cinza marrom. Provavelmente são cristais com remanescentes de magnetita, ainda não totalmente martitizados.

*** O cimento da canga é dissolvido. A ação inicia-se nas bordas e na superfície dos cristais.

**** Escurece rapidamente.

***** Mancha de cor castanho escuro.

--- Reações dispensáveis.

Tabela 1

Conclue o autor que nos itabiritos grosseiros, de grau de metamorfismo mais elevado (James, 1955), a dissolução é menor impedindo parcial ou totalmente a formação de jazidas.

4 - PROVAS DE TOQUE

Para complementar o estudo da textura do minério, foram realizadas várias reações "etch" em seções polidas de alguns tipos de minérios. O objetivo principal não foi a identificação de minerais, mas o desenvolvimento de possíveis estruturas e texturas reliquias; clivagens, geminações, bordas de grãos etc. A Tabela 1, resume os testes feitos assim como os resultados obtidos.

5 - PÊSO ESPECÍFICO

Como um dado auxiliar na caracterização dos vários tipos de minérios foram feitas 15 determinações de pesos específicos reais e aparentes. Para a hematita pulverulenta foram feitos dois tipos de determinações. Um primeiro grupo de determinações para o peso específico real. Fêz-se desmembramento da amostra em uma granulação tão fina que não contivesse poros vazios. A friabilidade excessiva deste tipo de minério facilitou sobremaneira esta operação.

PÊSO ESPECÍFICO DO MINÉRIO

TIPO	PÊSOS ESPECÍFICOS	NÚMERO DE DETERMINAÇÕES
Hematita xistosa(*)	5, 0-4, 8-5, 1	3
Hematita xistosa	5, 1-4, 9	2
Hematita xistosa com talco	5, 0	1
Hematita compacta	5, 1-5, 2-5, 1	3
Hematita pulverulenta	Real 5, 2-5, 2	2
	Aparente 3, 7-3, 7-3, 5-3, 8	4

(*) Hematita xistosa com certa porcentagem de quartzo, coletada em sequências de itabirito. É o termo ferruginoso do Itabirito.

Tabela 2

Para a determinação do peso específico aparente, a amostra de hematita pulverulenta foi envolvida em parafina de modo

a obter o volume aparente. Neste caso foram incluídas no cálculo do volume, os poros da amostra.

A hematita xistosa coletada em sequências de itabirito apresenta uma porcentagem de sílica mais alta, motivo pelo qual seu peso específico é pouco menor. Assim também a hematita com talco, que contém um mineral de peso específico menor.

O peso específico real da hematita pulverulenta é maior que aquele da hematita compacta. Este fato é explicado pela porcentagem de quartzo destes dois tipos de minérios. A média de porcentagem de sílica da hematita compacta está ao redor de 0,8 e da hematita pulverulenta ao redor de 0,2. Além disto a porosidade original da hematita compacta, embora pequena, não foi destruída. Para a determinação do peso específico da hematita pulverulenta a porosidade foi destruída, compactando a amostra e diminuindo a porosidade.

Para o cálculo a ser feito suponha-se que a hematita pulverulenta tenha se originado de hematita xistosa ou compacta, excluindo-se então o itabirito como rocha mãe. Baseando-se apenas na diferença de peso específico e supondo que o material lixiviado tenha sido apenas hematita, por regra de três simples, a diferença de peso específico corresponde a uma variação da massa de 23 por cento. Portanto, durante o abrandamento da hematita para formação da hematita pulverulenta, houve lixiviação de 23 por cento da massa de hematita. Naturalmente o número de determinações não é representativo e este cálculo seria válido se admitíssemos que a rocha mãe foi a hematita.

6 - DISTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS TIPOS DE MINÉRIOS

A distribuição do minério segundo os vários tipos e estádios de alteração é difícil de ser delimitada. Os dois principais fatores que são a recristalização e o abrandamento agiram segundo direções preferenciais.

A sobreposição do abrandamento aos tipos fundamentais de minérios dificulta bastante sua localização no espaço, mormente, em se tratando de um distrito que tem uma geologia tectônica tão complexa.

A Figura 4, que ilustra um perfil da Mina Cauê, ao longo do sinclinal contém os contactos dos vários tipos de minérios,

Figura 35 - Pequenas lentes de hematita compacta recristalizada (martelo) em itabirito pulverulento. A porcentagem de quartzo nas lentes é muito baixa ou então está ausente. Banco 1180 - Mina Cauê.

traçados nas zonas perfuradas por sondagem rotativa a diamante.

A hematita xistosa não está representada. Isto porque foi parcialmente recristalizada sendo hoje representada pela hematita xistosa recristalizada. Algumas zonas de hematita xistosa que talvez tivessem sido preservadas foram abrandadas.

No processo de abrandamento da hematita xistosa entra um fator extrínseco bastante ativo - talco, que ocorre ao longo dos planos de xistosidade da hematita. É justamente ao longo destes planos e facilitado pela mais fácil alteração do talco que penetram os agentes de abrandamento. Outro fator relacionado a este tipo de minério e que facilita o processo de abrandamento é o alto grau de fraturamento do minério. Um conjunto principal de fraturas ocorre paralelamente à xistosidade do minério. Um segundo grupo menos representativo fragmenta o minério perpendicularmente ou em diagonal com a

Figura 36 - Lente de hematita compacta recrystalizada, em itabirito pouco mole. Na lente prática - mente não existe quartzo. Espessura apro - ximada 5 m. Banco 1193 - Mina Cauê.

Figura 37 - Zona discordante de hematita compacta re- cristalizada perpendicular ao cabo do marte_ lo. Desenvolveu-se em itabirito, que agora se apresenta mole. Banco 1154 - Mina Cauê.

orientação dos planos de xistosidade. Zonas de brechação são raras, mas quando ocorrem chegam a alguns metros de espessura e facilitam a penetração de águas vadasas a grandes profundidades do sinclinal.

A hematita compacta, originada da recristalização parcial ou total da hematita xistosa, ocorre sob a forma de lentes cuja espessura varia de alguns centímetros até aproximadamente cinco metros. Pode formar mais raramente camadas de espessura de alguns decímetros e continuidade de alguns metros. Perde então o caráter lenticular. Estas lentes ou camadas podem intercalar-se em hematita xistosa ou itabirito. As fotos das Figuras 35 e 36 ilustram lentes de hematita compacta em itabirito mole. Este tipo de ocorrência lenticular dificulta sua localização em perfis de sondagem. Dado seu pequeno comprimento é raramente atravessada por furos de sondagem. Este o motivo pelo qual no perfil da Figura 4 da Mina Cauê apenas o furo Ca-21 atravessou uma camada que provávelmente tem forma de lente. Em dois afloramentos da Mina Cauê foram descritas zonas ou blocos discordantes de hematita compacta em hematita xistosa ou itabirito (Figura 37). Seu maior alongamento é discordante com relação à xistosidade. Não há no local vestígios de tectonismo. As relações de campo citadas assim como as observações feitas nas seções polidas indicaram recristalização nestas faixas discordantes do minério. A existência de "boudinnage", crenulação e dobras em grande escala compõem condições extremamente propícias para a gênese de minério do tipo xistoso.

Difícilmente poder-se-ia supor que em um sinclinal dobrado, metamorfozizado em pelo menos duas fases de tectonismos distintos, constituído essencialmente de rochas xistosas, pudessem ocorrer lentes, camadas ou blocos discordantes, constituídos de hematita com cristais equidimensionais de textura em mosaico. Nestas condições tectônicas caracteriza-se a recristalização, que deve ter ocorrido após as duas fases de tectonismo regional que atingiram o Distrito.

Não há disponibilidade de dados e mesmo, não nos cumpre discutir no momento se o fator de recristalização está ligado apenas ao tectonismo.

A hematita mole, já definida anteriormente, é proveniente do abrandamento parcial da hematita xistosa e hematita compacta. Este tipo de minério acha-se bem representado no perfil da Figura 4 da Mina Cauê e no bloco diagrama da Figura 6, da Mina Conceição. Nesta última figura a hematita xistosa e compacta estão representadas pelo ti-

Figura 38 - Hematita e itabirito pulverulento. Faixas claras são quartzo friável. A alta friabilidade provoca deslises superficiais. Corpo C - Mina Conceição.

Figura 39 - Hematita xistosa compacta, fraturada - Altura banco é de 10 m. - O intenso fraturamento do minério é um fator necessário mas não suficiente para o abrandamento - Banco 1193 - Mina Cauê.

po duro. Isto pelo fato de ser difícil sua distinção. Denominou-se então hematita dura, que diz respeito não ao "Tipo" de minério mas ao "Estádio de alteração".

Neste bloco diagrama nota-se a perfeita gradação entre a hematita dura e a hematita pulverulenta. É o abrandamento do minério.

Os fatos relevantes que merecem atenção com respeito à distribuição e abrandamento do minério são:

- Abrandamento da hematita junto ao contacto inferior do sinclinal com o filito da Formação Batatal nas seções de número 0, 1 e 2.
- Ausência do abrandamento de contacto com o filito da Formação Batatal ao longo das seções 3, 4 e 5. Nestas seções o contacto com a encaixante é mais inclinado, aproximando-se da vertical.

Quanto ao perfil da Mina Cauê, Figura 4, há alguns fatos que devem ser enfatizados:

- O tipo de minério mais representativo no perfil é a hematita xistosa compacta, que corresponde a uma hematita xistosa com recristalização parcial, branda.
- A hematita mole formou-se quase que exclusivamente às expensas da hematita xistosa compacta.
- O abrandamento da hematita xistosa compacta ocorre em zonas bem delimitadas e contínuas e também em manchas locais que provavelmente correspondem a zonas de fraturamento do minério.
- Há toda gradação entre hematita xistosa compacta e hematita mole, intercalando-se frequentemente estes dois tipos de minérios.
- Não ocorre hematita xistosa típica representável em escala no citado perfil.
- Hematita pulverulenta ocorre apenas na forma de faixas pequenas dentro das camadas ou zonas de hematita mole. Não é representável em escala.
- As ocorrências de hematita compacta recristalizada são descontínuas e esparsas, ocorrendo tanto na hematita quanto no itabirito, indicando seu caráter lenticular.

Figura 40 - Tectonismo em hematita compacta xistosa .
Duas faixas (de coloração escura) de hematita pulverulenta formadas por tectonismo e abrandamento - Corpo A - Mina Conceição.

- Na zona superficial, sujeita à lixiviação há características que comprovam a formação da hematita mole a partir do itabirito intensamente lixiviado.
- As zonas de itabirito duro não intemperizado são raras e de pequena dimensão.
- A intrusiva conforma-se com a estrutura em sinclinal e apresenta-se também em uma falha com rejeito comprovado cuja extensão se desconhece. Esta falha foi confirmada por furos de sondagem executados em outros perfis.

No sinclinal do Cauê parece que o processo de abrandamento não chegou a atuar o suficiente para abrandar completamente o minério. A par disto, zonas recristalizadas são mais comuns na Mina Cauê. A recristalização resulta, via de regra, em granulação mais grossa, que dificulta sobremaneira o processo de abrandamento.

A distribuição aparente da hematita pulverulenta sugere um sinclinal, mas está localizada no limbo sudeste de um grande sinclinal. A estrutura em sinclinal da mina é produto do controle

do abrandamento e não reflete a estrutura geral.

Nas seções 4 e 5 da Figura 6 nota-se que há toda graduação desde hematita dura até hematita pulverulenta. Localmente o fator tectônico pode ser responsável pela formação de hematita pulverulenta. Durante o tectonismo o minério menos competente fragmenta-se facilitando a penetração de águas vadasas. A hematita inicialmente lixiviada torna-se mole e dependendo do tempo e atividade dos agentes de alteração, atinge o estágio de hematita pulverulenta. O simples fraturamento da hematita nem sempre é suficiente para permitir o abrandamento. Da foto da Figura 39 depreende-se que o fraturamento é uma condição necessária para o abrandamento mas não é suficiente. A ausência de outros fatores impede ou retarda o processo.

A brechação com fragmentação intensiva do minério é um fator importante para o início do abrandamento. A foto da Figura 40 mostra faixas de hematita pulverulenta e mole desenvolvidas por tectonismo.

O mineral talco não ocorre nas zonas de brechação, tendo se desenvolvido antes do tectonismo.

Quanto ao itabirito, as seções 0, 1, 2 e 3 do bloco diagrama da Figura 6 mostram sua distribuição.

Na Mina Cauê, perfil da Figura 4, só foi encontrado itabirito mole e itabirito duro em início de alteração. Não foi localizado itabirito pulverulento, neste particular repetindo o caso da hematita pulverulenta que também não está presente. O processo de abrandamento foi mais intenso na Mina Conceição do que na Mina Cauê.

Blocos de itabirito mole e pulverulento constituindo um talus agora consolidado, foram descritos por Dorr e Barbosa (1963). Certamente o itabirito foi depositado neste talus, ainda coeso. Foi abrandado "in situ" (Foto da Figura 41).

O abrandamento na zona superficial por processo secundário é realmente efetivo. A exposição superficial de itabirito mole aos agentes de intemperismo físico leva à desagregação mecânica da banda quartzosa e desprendimento de placas de hematita constituindo o tipo de minério denominado "chapinha" (Figura 42).

Figura 41 - Bloco de itabirito mole a pulverulento em talus consolidado. O abrandamento do itabirito ocorreu "in situ" - Mina Conceição.

Figura 42 - Itabirito mole com desagregação mecânica da banda quartzosa e acúmulo de bandas de hematita que podem vir a constituir o tipo de minério denominado "chapinha" - Pico da Mina Conceição.

7 - ABRANDAMENTO VERSUS AUMENTO DE COESÃO (ENDURECIMENTO)

A origem da hematita pulverulenta tem sido discutida por vários autores, dentre os quais, alguns que visitaram ou trabalharam no Quadrilátero Ferrífero. Entre as hipóteses aventadas cumpre lembrar Percival (1954), Dorr, Guild e Barbosa (1952) e Dorr e Barbosa (1963).

Os dados obtidos pelo estudo pormenorizado da textura e distribuição do minério indicam um abrandamento da hematita xistosa e em casos mais raros da hematita compacta recristalizada.

Estudos de campo confirmam os fatores citados por Dorr e Barbosa (1963) indicando a formação do minério brando a partir do minério duro.

Entre os fatores de campo citados a seguir e que comprovam o abrandamento do minério incluíram-se os vários citados por Dorr e Barbosa (1963). Fatores acrescentados nesta pesquisa dizem respeito à textura, porosidade e distribuição do minério.

Fatores que comprovam a origem do minério brando por abrandamento do minério duro:

- 1 - Juntas atravessam o contacto entre o minério brando e o minério duro. Não se originariam com forma retilínea nestes dois tipos de minérios de características físicas tão diferentes.
- 2 - Veios de quartzo com especularita atravessam indistintivamente hematita dura, mole e pulverulenta. As características do contacto dos veios com os três tipos de minérios são idênticas, indicando que de início todo o minério era duro. O minério brando não daria contactos tão regulares e nítidos.
- 3 - Dentro da massa de hematita pulverulenta há "núcleos" de hematita dura que pela forma e distribuição indicam serem "remanescentes" da hematita dura.
- 4 - O minério brando preserva juntas retilíneas que não se teriam formado em um minério friável.
- 5 - As deformações apresentadas pelo minério brando são do mesmo estilo daquelas exibidas pelo minério duro e itabirito. Qualquer esfôrço deste tipo, superimpôsto ao minério brando levaria à ruptu

ra ou a uma deformação plástica diferente daquela apresentada pelo minério duro e o itabirito. Haveria certamente diferença de competência nêstes tipos de minérios.

- 6 - Blocos de itabirito mole a pulverulento e hematita pulverulenta constituindo um "talus" consolidado. O abrandamento do itabirito ocorreu "in situ". Ver foto da Figura 41.
- 7 - Faixas de hematita mole e/ou pulverulenta formadas por tectonismo e abrandamento da hematita dura. Ver foto da Figura 40.
- 8 - Blocos pequenos de hematita dura, com forma mais comum de quadrados ou losangos, encontrados envolvidos em hematita mole ou pulverulenta. Formaram-se pelo abrandamento de hematita dura, fraturada. Os blocos são remanescentes da hematita dura, fragmentada.
- 9 - O fato da oxidação do minério aumentar em direção à superfície (Figura 44), fala mais de um processo de abrandamento, que é compatível com a oxidação de cima para baixo.
- 10- O minério duro, constituído de hematita xistosa e/ou hematita compacta recristalizada não apresentou textura mista formada por cimentação de hematita pulverulenta, nem vestígios outros quaisquer, que comprovassem endurecimento do minério brando. Como pode ser visto nas fotos das Figuras 30 e 31, o endurecimento do minério não se daria apenas por uma cimentação ou "rejunta^mento" das bordas dos cristais. Seria necessário um verdadeiro preenchimento dos espaços vazios, que em algumas amostras equivaleria a um terço da área total da seção polida estudada.
- 11- Ocorrência de uma faixa de hematita mole junto ao contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes nas seções 0, 1 e 2 da Figura 6. As seções 3, 4 e 5 cujo contacto é inclinado não possibilitaram a formação desta faixa de minério brando.
- 12- A perfeita gradação que existe entre a hematita dura, mole e pulverulenta nas seções 4 e 5 da mesma Figura.
- 13- A gradação de hematita dura a hematita mole nas seções 0 e 1.
- 14- A hematita pulverulenta é o tipo de minério que apresenta menor teor de sílica, em relação aos outros tipos. A formação da hematita pulverulenta deve ter partido de um tipo de minério com baixo teor de quartzo.
- 15- É notável que o abrandamento ocorreu preferencialmente de cima para baixo e no contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes.

Resumindo, a viabilidade do abrandamento da hematita xistosa e hematita compacta recristalizada fica na dependência do fator fisiográfico, estrutural (porosidade, xistosidade, fraturas) e do fator mineralógico (talco e quartzo). O talco é mais importante que o quartzo.

Vários autores têm sugerido a formação do minério duro a partir do minério pulverulento. Em zonas de profundidade média a profundas, os fatos contradizem a idéia.

Por outro lado, na zona superficial até um limite de algumas dezenas de metros, ocorre efetivamente endurecimento (aumento de coesão) do minério mole e brando. O estudo de amostras em seções polidas indicou ser produto de cimentação por processos secundários associados à laterização e formação de canga. Este processo, no entanto, é efetivo apenas na zona superficial, onde a textura do minério é macroscópica e microscópicamente de cimentação. Nenhuma amostra de minério duro de profundidade média ou grande apresentou esta textura.

Acresce ainda observar que a hematita pulverulenta localizada abaixo da canga dificulta ou impede o endurecimento superficial do minério. Sua alta permeabilidade e porosidade facilitam por demais o fluxo de águas vadasas dificultando a precipitação dos óxidos e hidróxidos de ferro carregados pelas soluções.

8 - OXIDAÇÃO DO MINÉRIO

A relação existente entre Fe^{3+} e Fe^{2+} tem sido estudada em rochas e minérios de ferro com objetivos os mais diversos. Esta relação diz respeito ao grau de oxidação do minério ou rocha.

No caso específico do minério de ferro a oxidação resulta da difusão de átomos de oxigênio nos espaços do retículo cristalino da magnetita. O contacto dos átomos ferrosos com o oxigênio promove a oxidação a átomos férricos.

O estudo da relação $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ é importante pelo fato de relacionar-se indiretamente ao abrandamento do minério de ferro.

Em se propondo a estudar as relações entre a oxidação do minério e o abrandamento, foram elaboradas análises de Fe_2O_3 e FeO nos vários tipos de minérios da Formação Ferrífera, ve

rificando-se a dependência destes óxidos com a profundidade de ocorrência.

Gruner (1926), estudando as relações entre magnetita e hematita observou: "O grau de oxidação varia de grão para grão. O tamanho do grão influi no grau e velocidade de oxidação. Menor o grão, maior a oxidação." "Parece que a magnetita de origem sedimentar é mais susceptível à oxidação do que aquelas de segregação magmática e metamorfismo de contacto". "...para explicar a oxidação em função da dimensão dos grãos, observaram que tem influência a difusão de sólidos em sólidos em conexão com o crescimento de grãos relativamente grandes às expensas de menores. Metalografistas concluíram que difusão de um grão para outro é mais rápida quanto menor fôr a dimensão dos grãos". "É estabelecido como fato que praticamente todas as magnetitas, sem distinção de origem, têm microscópica-mente hematita visível."

No minério de ferro de Itabira, a magnetita ocorre dispersa na forma de cristais euhédricos em quase todos os tipos de minérios. Em ocorrências locais e raras forma veios de espessura variável, cortando o minério concordante ou discordantemente.

Sua distribuição na forma de cristais euhédricos dispersos acha-se na Figura 4, que representa um perfil da Mina Cauê.

Esta distribuição foi verificada pela descrição de testemunhos de furos de sondagem. Pelo perfil, a magnetita parece ocorrer de preferência na zona de hematita, a uma certa distância do contacto inferior da Formação Ferrífera com as rochas encaixantes. No entanto, a superfície de exposição dos testemunhos é pequena. A magnetita deve ocorrer em zonas mais contínuas e homogêneas, até mesmo nos outros tipos de minérios em que à primeira vista não foram verificadas. As análises de FeO corroboram esta observação. São relativamente raras as análises de minério que não contenham FeO.

Segundo foi verificado no estudo da textura do minério, (Figura 25) a transformação de magnetita em hematita se dá ao longo dos planos de octaedro (111). Este processo de martitização é generalizado e ocorre comumente. Gruner (1926) e Kalliokoski (1965) citam casos de martitização em direções diferentes dos planos (111) de octaedros. Quando os cristais de magnetita são de dimensões acima de alguns milímetros, restam núcleos remanescentes de magnetita não martitizados (Figura 25). Neste pormenor foi confirmada a

assertiva de Gruner (1926), de que o grau de oxidação depende em parte do tamanho do grão.

Lepp (1957), estudando magnetita de Mineville, N. Y., concluiu que a razão de oxidação é função da "superfície específica" da magnetita e o grau de perfeição do retículo cristalino. Levando em conta na medida do possível estes diversos fatores que influem na razão de oxidação, o tipo de minério e a profundidade em que ocorrem foram os tópicos enfatizados neste capítulo.

Segundo Twenhofel (1927), a martita pode formar-se por oxidação lenta em temperatura ambiente e também sob condições termiais. Este mesmo comportamento da magnetita foi confirmado por Geijer (1931), que verificou a formação de martita à temperatura ambiente.

Como já foi discutido, o talco também substitui a magnetita e preenche cavidades octaédricas deixadas pela lixiviação da mesma. Esta ação do talco influi no fator de oxidação do minério. Como será visto adiante, estes são os fatores responsáveis pela oxidação do minério, i.e., variação da relação $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, denominada "razão de oxidação".

As Tabelas 3, 9, 10, 11, 12, 13, 15 e 16 contêm os valores de Fe_2O_3 e FeO para as análises de cada tipo de minério.

Como se pode notar na Tabela 11, contendo análises de hematita pulverulenta, não foi dosado o teor de FeO, impossibilitando o cálculo da razão de oxidação. Por este motivo, foi necessário anexar mais cinco análises especiais que constituíram a Tabela 3. Nestas análises foi dosado o teor de FeO, estando as amostras coletadas, localizadas a pequena profundidade, motivo pelo qual, o teor de fósforo é bastante alto. Este alto teor é devido à proximidade da canga que capeia esta zona da hematita pulverulenta. Dadas estas características e especialmente o alto teor de fósforo, estas análises não foram incluídas na Tabela 11, que contém análises de hematita pulverulenta.

Com base nos valores da razão de oxidação ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$) foi elaborada a Tabela 4, que contém a média aritmética das razões de oxidação dos vários tipos de minérios.

Muito embora a razão de oxidação do itabirito pulverulento tenha sido maior do que aquela calculada para a canga porosa e maciça, na verdade esta última tem uma razão maior por força das cinco amostras que deram teor nulo de FeO. Desde que o teor de FeO

HEMATITA PULVERULENTA

Local e/ou Furo	Co	Co	Co	Co	Co
Nº da amostra	D - 61	D - 62	D - 63	D - 64	D - 65
Fe	62,6	64,1	64,6	64,6	63,9
P	0,05	0,04	0,05	0,05	0,07
SiO ₂	6,4	5,1	4,0	3,3	3,5
Al ₂ O ₃	0,8	0,7	0,8	0,9	1,2
Perda ao fogo	1,9	1,4	1,6	2,0	2,9
Fe ₂ O ₃	89,5	91,6	92,4	92,4	91,3
FeO	1,1	1,0	0,9	1,1	0,8
Fe ₂ O ₃ /FeO	81,3	91,6	102,6	84,0	114,1
Profundidade(m)	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6-1,8	1,8-2,0

Tabela 3

RAZÃO DE OXIDAÇÃO PARA OS VÁRIOS TIPOS DE MINÉRIOS

Tipos de minérios	Média das razões de oxidação: Fe ₂ O ₃ /FeO	Número de aná- lises com FeO = 0,0	Número de análises
Canga porosa e maciça	104,6	5	34
Itabirito pulverulento	118,1	1	10
Hematita pulverulenta	94,7	-	5
Hematita xistosa	87,8	-	3
Hematita compacta recristalizada	64,8	-	8
Itabirito duro	62,4	4	25

Tabela 4

foi nulo não foi possível calcular a razão de oxidação (Fe₂O₃/FeO), mas sabe-se que ela é alta e que, caso fôsse calculada, aumentaria desmesuradamente a média da canga porosa e maciça.

O itabirito duro apresenta quatro análises em um total de vinte e cinco com teor nulo de FeO. Nas descrições de testemunhos não foram encontrados cristais macroscópicos de magnetita. Este o motivo pelo qual, embora sendo um minério com razão de oxi-

dação tão baixa, apresenta 4 análises com teor nulo de FeO. Concluiu-se que a magnetita deve ocorrer com frequência menor no itabirito, mas quando ocorre apresenta-se praticamente intacta, sem oxidação, dando uma razão de oxidação baixa.

É curioso notar que a hematita compacta, descrita e considerada como recristalizada, apresentou uma razão de oxidação baixa e sem nenhum teor nulo para o FeO.

Com base na Tabela 4, tomou-se subjetivamente a razão de oxidação entre a hematita xistosa e a hematita pulverulenta como o limite ou passagem do minério não oxidado ao oxidado. Atribuiu-se desta forma a este limite, a razão de oxidação 90. Amostras com razão de oxidação acima de 90 foram consideradas como minério oxidado e abaixo deste valor como minério não oxidado.

Calculando-se a porcentagem de amostras oxidadas e não oxidadas, segundo o critério adotado, obteve-se para os vários tipos de minério os seguintes valores:

PORCENTAGEM DE AMOSTRAS DE MINÉRIO OXIDADO E NÃO OXIDADO

TIPOS DE MINÉRIOS	1	2	3	4
Canga porosa e maciça	22	65	12	35
Itabirito pulverulento	4	40	6	60
Hematita pulverulenta	2	40	3	60
Hematita xistosa	1	33	2	77
Hematita compacta	6	78	2	22
Itabirito duro	18	72	7	28

- 1 - Número de amostras não oxidadas (Razão de oxidação menor de 90)
- 2 - Número de amostras não oxidadas (Porcentagem)
- 3 - Número de amostras oxidadas (Razão de oxidação maior de 90)
- 4 - Número de amostras oxidadas (Porcentagem).

Tabela 5

Este quadro foi elaborado pelo fato da razão oxidação para cada tipo de minério da Tabela 4 achar-se distorcida por valores altos e baixos que alteram a média.

Não serão feitas observações sobre a hematita pulverulenta e a hematita xistosa pelo fato de apresentarem um número muito

pequeno de análises para fundamentar conclusões:

Os fatos relevantes dêste quadro são:

- Cêrca de 25 por cento das amostras de hematita compacta e de itabirito duro apresentam, primariamente, baixo teor de FeO, relacionado à ausência de magnetita ou mudanças de oxidação-redução durante o metamorfismo, provavelmente devido a variações na pressão de oxigênio ou à presença de matéria orgânica.
- A canga apresenta uma porcentagem alta de amostras não oxidadas (65%). Deve-se explicar êste alto valor pelo fato da canga englobar blocos de hematita xistosa e hematita compacta, que embora ocorram próximo à superfície, devem ter uma razão de oxidação baixa, dada a pequena oxidação. O gráfico da Figura 43 confirma esta observação.
- O itabirito pulverulento apresenta 40 por cento de amostras não oxidadas. Nota-se que mesmo o minério brando apresenta amostras não oxidadas, em uma porcentagem inexplicavelmente alta.

Figura 43 - Porcentagem de FeO em amostras de canga

O fato de encontrar-se hematita em zonas de oxidação intensa, com certa porcentagem de FeO, não deve constituir surpresa desde que a amostra não apresente características de decomposição. É normal um pequeno teor de FeO em amostras de hematita fresca.

Acham-se reproduzidas na Tabela 6, análises de hematita citadas por Derr et al., (1962), onde algumas amostras apresentam FeO em certa porcentagem.

ANÁLISES DE HEMATITA

Fe ₂ O ₃	99,52	98,14	98,00	96,86
FeO	-	1,29	1,39	-
Mn ₂ O ₃	-	0,54	-	-
MnO	-	0,38	-	-
MgO	-	-	0,02	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	1,26
TiO ₂	0,10	-	0,34	-
SiO ₂	-	-	0,24	0,41
H ₂ O ⁺	-	-	-	1,73
Total	99,62	100,35	99,99	100,45
D	5,31	-	5,31	4,48

- 1 - Cristais de hematita, em hiperstênio-augita andesito decomposto, Bernece, Börzsony Mts, Tchecoslováquia (Papp, 1927). Anal. J. Sűrű.
- 2 - Hematita, Franklin, New Jersey (Palache, 1935). Anal. L. H. Bauer.
- 3 - Cristais tabulares de hematita, Rietana, Etna, Sicília (Montalto, 1940).
- 4 - Hematita(hidrohematita), dentro de nódulos limoníticos, Inglehope, S. W. Division, Western Austrália (Simpson, 1937).

Tabela 6

Resumindo, pode-se dizer que o processo de oxidação é muito lento, iniciando-se antes e prosseguindo depois do abrandamento do minério. Ao fim do abrandamento há ainda minério não oxidado e em porcentagem relativamente alta.

A canga apresenta oxidação no cimento e blocos de minério mole e baixa oxidação nos blocos de hematita xistosa e compacta dura.

A oxidação do minério de ferro de Itabira é um proces

so ativo, especialmente sobre a pequena porcentagem de minério constituída de magnetita. Associada ao abrandamento é de grande impor-
tância econômica na formação das zonas de minério e de canga, pró-
ximo à superfície.

Figura 44 - Relação da razão de oxidação com a profundidade

A razão de oxidação varia com a profundidade do mi-
nério. Na Figura 44 fixou-se apenas dois tipos de minérios não oxida-
dos que devem preservar ainda a porcentagem original de FeO e
 Fe_2O_3 . Tomou-se o itabirito duro e hematita compacta.

Embora o número de pontos lançados seja pequeno pa-
ra traçar a curva com mais precisão, nota-se que, a pouco mais de
50 m de profundidade, a flexão é mais acentuada. Nas jazidas em ge-

ral até esta profundidade a oxidação faz-se sentir pela penetração do ar e águas superficiais. Naturalmente esta profundidade é bastante variável em função de fatores outros tais como estrutura, topografia, tipos de minérios etc.

A dispersão dos pontos no gráfico indica que a oxidação do minério cresce com a aproximação da superfície. Desde a profundidade de 100 m para cima a razão de oxidação cresce rapidamente.

Embora macroscopicamente não se note variação nas características físicas do minério, a oxidação já se iniciou, agindo de cima para baixo. Este processo de oxidação favorece, em termos gerais, a hipótese do abrandamento do minério por processos secundários.

Acham-se resumidas em oito itens todas as observações feitas concernentes à oxidação do minério. Desde que a interpretação baseia-se em limites numéricos fixados subjetivamente, tornou-se mister resumí-las para facilitar o entendimento pelo menos das várias fases desenvolvidas na pesquisa. Este resumo acha-se sob o título: OXIDAÇÃO - SEQUÊNCIA DA PESQUISA.

9 - RELAÇÕES ENTRE OS VÁRIOS TIPOS DE MINÉRIOS

O acervo de dados coletados no Distrito de Itabira permite poucas observações sobre as relações dos vários tipos de minérios no que concerne à sua gênese.

Sendo a hematita e o itabirito as rochas mais representativas da Formação Ferrífera, importa analisar suas variações locais e contactos.

No perfil da Figura 4 da Mina Cauê, há, no plano geral, uma faixa ou camada de hematita de espessura média de 200 m e outra de itabirito com espessura média de 150 m. A Este, a camada de hematita torna-se mais delgada e o itabirito torna-se mais espesso. Dentro da camada de hematita ocorrem pequenas lentes de itabirito. O mesmo ocorre com o itabirito que contém lentes pouco maiores de hematita.

No grande sinclinal do Distrito há uma camada espessa de itabirito contendo, especialmente no nariz das dobras, lentes ou camadas de hematita. Estas lentes ou camadas devem comportar-se à semelhança daquela descrita no perfil do Cauê (Figura 4).

OXIDAÇÃO - SEQUÊNCIA DA PESQUISA

O contacto entre a hematita e o itabirito é, em geral, gradacional. Por vezes é abrupto e, especialmente, quando se trata de contacto de hematita compacta recristalizada com itabirito. A Fi gura 45 ilustra uma camada de itabirito mole em contacto abrupto com hematita compacta recristalizada como capa e lapa. Nota-se que a face fotografada da hematita é uma fratura.

Figura 45 - Faixa de itabirito mole em hematita compacta como capa e lapa. Banco 1154 - Mina Cauê.

Figura 46 - Contacto de hematita compacta recristalizada, fraturada, acima e itabirito mole abaixo. Banco 1154 - Mina Cauê.

A Figura 46 ilustra um contacto menos abrupto de hematita compacta recristalizada acima e itabirito mole abaixo.

Até agora foram feitas considerações sobre o contacto lateral. O prolongamento longitudinal de uma camada de itabirito pode ser interceptado bruscamente, passando a hematita compacta, pouco xistosa. Este exemplo é retratado na Figura 47.

A distribuição da hematita compacta recristalizada sem fraturas e fraturada, itabirito mole e intrusiva alterada achase-se representada na foto da Figura 48. O pequeno número de ocorrências de hematita compacta recristalizada não permitiu verificar sua relação com a proximidade da intrusiva. É um fato observar que a zona de hematita recristalizada junto da intrusiva distingue-se da outra faixa mais afastada pela ausência de fraturas. Como se nota na fotografia, a zona de contacto entre estas duas faixas é nítida.

10 - DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO EM PROFUNDIDADE

O comportamento do elemento fósforo na superfície depende das condições geoquímicas e dos teores primários apresentados pelas rochas alteradas no tempo geológico.

Iniciou-se o estudo de amostras profundas com o objetivo de determinar, primeiramente, o teor médio, "back-ground" da rocha encaixante.

O xisto encaixante, pertencente à Série Rio das Velhas (ver perfil da Figura 4), colocado tentativamente na Formação Nova Lima, achase-se em geral como lapa da Formação Ferrífera. Isto ocorre na Mina Cauê. Há aí, como já foi observado anteriormente, um hiato estratigráfico que omite o filito Caraça, colocado duvidosamente na Formação Batatal (Ver Coluna Estratigráfica).

Separando as amostras frescas, semi-alteradas e alteradas, foram feitas determinações para o xisto Nova Lima e o filito Batatal. A falta de furos com amostras frescas destas duas formações não permitiu maior número de análises. Assim também com as amostras semi-alteradas e alteradas que dificilmente são identificadas como pertencendo a uma ou outra formação. Só foi possível identificar em áreas de sequência estratigráfica bem determinada.

É interessante notar que não foi encontrado contacto direto de filito ou xisto fresco com a Formação Ferrífera. Há sem-

Figura 47 - Contacto longitudinal brusco de itabirito mole e hematita compacta xistosa - Fratura no contacto - Mina Conceição.

Figura 48 - Distribuição de alguns tipos de minérios próximo à intrusiva It.m: itabirito mole;
Hc, r: Hematita compacta recristalizada;
Hc, r, f: Hematita compacta recristalizada, fraturada;
U: Intrusiva metamorfisada.
Banco 1154 - Mina Cauê.

pre no contacto uma zona alterada de espessura variável.

Nas tabelas foram incluídas análises de Fe , SiO_2 , Al_2O_3 , P . Fogo, e Fe_2O_3 , pois, em outros capítulos serão feitas considerações sobre estes óxidos e elementos. Em um total de 19 análises foram obtidos os resultados da Tabela 7. Segue-se a Tabela 8 com 19 análises do filito Batatal.

O teor médio do xisto Nova Lima fresco apresenta-se constante. Esta constância não foi verificada em análises encontradas em autores russos e americanos. A média "background" do teor de fósforo no xisto Nova Lima foi fixada em 0,04 por cento.

Dorr e Barbosa (1963) fazem descrição da composição mineralógica do xisto Nova Lima em amostras coletadas em testemunhos de sondagem. Os tipos descritos são: muscovita quartzo xisto; biotita xisto com quartzo abundante, com carbonato e quartzo, com quartzo e epídoto ou muscovita e epídoto; clorita xisto com muita muscovita com quartzo e epídoto, e com quartzo e feldspato; hornblenda xistos, alguns com muito quartzo. No estudo de várias lâminas de xisto, apenas em duas foram identificados cristais muito raros de apatita. Vários desses minerais componentes do xisto, em condições de intemperismo químico intenso, são perfeitamente passíveis de formação de minerais argilosos, especialmente o caulim.

Segundo a bibliografia disponível, minerais das argilas comuns em solos, como caolinita, haloisita, montmorillonita e illita, exibem fixação de fósforo. Assim é que pode-se supor que manchas ou zonas de rocha completamente alterada são mais ou menos argilosas, propiciando a fixação do fósforo na zona de alteração. Este o motivo pelo qual o xisto alterado apresenta de 1 a 4 vezes a média do xisto fresco. Entre estes dois valores acha-se o xisto semi-alterado.

O filito Batatal fresco, ao contrário do xisto Nova Lima, apresenta teores de fósforo mais altos e bastante variáveis. Sua média foi fixada em 0,17 por cento.

Ainda segundo a descrição de Dorr e Barbosa (1963), o filito, que é uma das unidades litológicas do Grupo Caraça, é constituído predominantemente de sericita, gradando de filito quartzoso a sericítico.

O estudo de duas lâminas delgadas de filito indicou uma porcentagem alta de cristais de apatita com relação ao xisto Nova Lima. Este mineral não foi descrito por Dorr e Barbosa (1963).

XISTO NOVA LIMA FRESCO

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Ca-45	P-105	5,5	0,04	69,1	18,4	4,4	7,9	*	-	190,00
Ca-37	P-108	7,3	0,04	66,5	8,7	14,1	10,5	*	-	170,00-172,00
Ca-47	P-110	6,0	0,04	68,7	12,2	10,2	8,6	*	-	240,80
Ca-46	P-112	8,7	0,04	60,6	9,6	17,1	12,4	*	-	212,00
Ca-23	P-102	7,8	0,03	63,0	8,2	17,4	11,1	*	-	230,00
Ca-71	P-111	6,7	0,04	66,5	8,9	14,8	9,5	*	-	280,50
Ca-23	P-19	15,8	0,06	68,6	3,6	4,9	22,7	*	-	220,00-230,40

XISTO NOVA LIMA SEMI-ALTERADO

Ca-45	P-104	7,3	0,04	70,6	12,2	5,8	11,1	*	-	189,00
Ca-37	P-107	7,8	0,04	53,9	24,4	10,3	11,1	*	-	162,30
Ca-23	P-101	5,5	0,04	72,8	14,4	4,7	7,9	*	-	222,50
Ca-42	P-109	12,0	0,06	57,7	17,1	7,7	17,2	*	-	238,00
Ca-26	F-5728a	14,5	0,04	71,0	3,5	4,6	20,7	*	-	205,00-206,00
Ca-26	F-5729	65,0	0,06	4,9	1,3	0,3	93,0	*	-	213,00-214,00
Ca-84	D-36	15,5	0,04	45,1	16,9	11,5	22,2	4,3	5,1	213,90

XISTO NOVA LIMA ALTERADO

Ca-45	P-103	15,6	0,10	54,7	?	8,4	22,3	*	-	178,00
Ca-37	P-106	12,5	0,04	66,5	7,7	7,7	17,9	*	-	161,60
Ca-23	P-100	8,9	0,06	69,7	12,3	5,0	12,7	*	-	220,00
Ca-23	P-18	13,2	0,15	71,3	3,0	6,6	18,8	*	-	217,00-220,00
Ca-26	F-5728	18,1	0,16	53,8	6,6	10,1	25,9	*	-	189,00-190,00

* Análises com Fe²⁺ oxidado a Fe³⁺.

Tabela 7

FILITO BATATAL FRESCO

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Co-91	D-33	11,8	0,38	43,7	5,8	20,0	16,8	13,3	1,2	94,2
Co-91	D-34	20,4	0,22	43,4	15,3	12,9	13,9	14,3	0,9	91,7
Ca-84	D-37	12,2	0,29	49,2	9,9	15,1	17,5	8,0	2,2	214,7
Ca-87	D-42	6,5	0,11	58,8	9,8	15,5	9,3	6,6	1,4	268,5
Co-90	D-43	12,7	0,14	60,3	12,5	10,4	2,2	14,3	0,1	132,0
Ca-71	D-152	7,6	0,04	66,1	18,80	2,8	10,1	0,0	-	276,2
Ca-71	D-155	5,1	0,03	71,1	17,4	2,8	6,8	0,4	17,0	276,4

FILITO BATATAL SEMI-ALTERADO

Co-90	D-35	12,2	0,13	48,2	12,4	12,7	17,4	9,0	1,9	122,0
Co-91	D-41	25,4	0,20	37,7	10,4	16,6	23,4	11,5	2,0	96,3
Ca-71	D-162	3,3	0,01	85,5	5,1	3,9	4,7	0,0	-	273,5
Ca-71	D-163	3,1	0,01	85,9	5,0	4,3	4,4	0,0	-	273,0
Ca-73	D-157	4,7	0,02	77,3	12,5	3,3	6,7	0,0	-	157,1

FILITO BATATAL ALTERADO

Co-90	D-38	23,5	0,46	36,7	5,2	24,7	26,6	6,3	4,2	123,0
DC	D-90	18,7	0,03	50,8	15,7	0,5	6,6	26,0	0,2	2,5
DC	D-91	2,7	0,03	75,8	13,6	0,6	5,7	3,3	1,7	2,0
Co-65	D-96	12,0	0,11	56,4	14,5	0,8	10,0	17,2	0,5	178,0 - 209,5
Ca-73	D-161	4,9	0,01	74,6	15,1	3,0	7,0	0,0	-	256,0
Ca-73	D-164	10,2	0,08	70,7	9,0	4,8	14,6	0,0	-	240,0
Ca-71	D-156	8,0	0,06	77,6	7,3	3,3	11,4	0,0	-	271,5

Tabela 8

O estudo de lâminas delgadas de xisto e filito foi restrito à periferia da Formação Ferrífera.

Com base na média da rocha fresca, o teor de fósforo do filito alterado varia desde 0,1 até 3,0 vezes a média considerada. Justamente o filito que tem uma porcentagem de apatita maior apresenta um comportamento diferente com relação ao elemento fósforo. Verifica-se que há dissoluções e precipitações locais, irregulares, concluindo com um pequeno decréscimo do teor de fósforo na rocha alterada. Mesmo com um decréscimo no teor durante a alteração, a média mantém-se pouco acima daquela do xisto Nova Lima alterado. Este comportamento é então inverso com relação ao xisto Nova Lima.

Para a alteração do xisto, e filito e fixação do fósforo deve-se levar em conta, também, a superfície específica, que influi muito nos fenômenos de adsorção e troca iônica. Segundo estudos de Dean e Rubis (1947), a capacidade de troca de ânions de solos é grosseiramente proporcional à superfície específica. Estas duas rochas quando alteradas, são muito porosas (lixiviação de alguns minerais) e friáveis, devendo apresentar uma superfície específica maior neste estado.

Resumindo, os fatores que influem na fixação do fósforo pelos minerais das argilas, Black (1942), Murphy (1939), Scarseth (1935) e Stout (1939) indicaram o pH, dimensão das partículas, concentração das soluções de fosfatos e tempo de contacto.

A hematita xistosa representa, em quantidade, o tipo mais comum de minério extraído com fins comerciais. Um total de 17 análises de seus óxidos e elementos constitui a Tabela 9.

O fósforo varia neste tipo de minério com extremos entre 0,01 e 0,08 por cento. Esta variação é, em termos gerais, a mesma encontrada nos outros tipos de minérios.

A seguir foram representadas Tabelas com análises dos vários tipos de minérios. As observações serão feitas em capítulos posteriores.

No tipo "Hematita compacta recristalizada" foram descritas zonas de hematita que foram recristalizadas. Dentre as amostras compactas foram selecionadas aquelas que tiveram recristalização completa. As oito análises da Tabela 10 referem-se a elas. As raras ocorrências dificultaram maior número de análises. Nota-se o teor alto de ferro e baixo de fósforo.

HEMATITA XISTOSA

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Ca-23	P-14	67,8	0,03	1,4	1,1	0,1	97,0	*	-	113,00-140,50
Ca-23	P-15	67,8	0,03	1,5	1,0	0,4	96,9	*	-	140,50-176,30
Ca-23	P-16	68,0	0,02	1,7	0,7	0,2	97,2	*	-	176,30-196,30
Ca-23	P-17	68,5	0,03	0,9	0,6	0,2	97,9	*	-	196,30-217,00
Ca-10	1	68,9	0,04	0,5	0,4	0,1	98,5	*	-	51,00- 51,40
Ca-16	4	69,4	0,01	0,2	0,1	0,1	99,3	*	-	28,90- 29,30
Ca-16	5	69,3	0,01	0,3	0,2	0,1	99,1	*	-	30,50- 31,30
Ca-16	6	68,9	0,01	0,5	0,5	0,1	98,5	*	-	38,00- 38,10
Ca-21	18	69,4	0,02	0,2	0,1	0,1	99,3	*	-	124,80-125,50
Ca-21	19	68,8	0,03	0,6	0,5	0,1	98,4	*	-	144,50-145,50
Ca-21	20	69,2	0,02	0,3	0,2	0,1	99,0	*	-	178,80-179,20
Ca-57	P-1	68,9	0,02	0,7	0,5	0,1	98,5	*	-	173,80
Ca-57	P-2	67,1	0,08	1,9	1,1	0,8	95,9	*	-	174,40
CO-65	D-29	66,4	0,03	2,3	1,9	0,7	93,1	1,7	54,8	161,90-162,90
CO-65	D-30	67,5	0,02	1,3	1,6	0,5	95,4	0,9	106,0	153,50-154,50
CO-65	D-31	58,1	0,04	8,3	5,7	2,7	82,2	0,8	102,8	167,80-168,80
Ca-21	17	58,1	0,06	6,5	8,4	1,6	83,1	*	-	117,50-117,90

* Análises com Fe²⁺ oxidado a Fe³⁺.

Tabela 9

HEMATITA COMPACTA RECRISTALIZADA

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Ca-85	D-1	68,8	0,01	0,9	0,4	0,3	96,4	1,7	56,7	153,00
Ca-51	D-2	68,5	0,01	0,2	0,2	0,1	95,2	4,0	23,8	141,30
Ca-82	D-3	68,3	0,05	0,5	1,3	0,3	95,8	1,7	56,4	141,50
Ca-68	D-4	69,0	0,03	0,3	0,4	0,3	98,4	0,6	164,0	36,00
Co-9	D-5	69,2	0,01	0,4	0,1	0,1	97,0	2,2	44,1	183,00
Ca-46	D-6	68,5	0,01	1,0	0,4	0,4	97,1	1,0	97,1	150,80
Ca-49	D-7	69,3	0,02	1,1	0,4	0,2	95,4	2,5	38,2	125,00
Co-65	D-32	69,2	0,02	0,3	0,2	0,2	96,6	2,5	38,6	69,40

Tabela 10

A Tabela 11 representa as análises de 54 amostras de hematita pulverulenta coletadas nas Minas Conceição (pelo geólogo Ricardo A. Figueiredo), Cauê e Dois Córregos.

As Tabelas 12 e 13 representam respectivamente análises de itabirito duro e itabirito pulverulento. Posteriormente serão feitas observações sobre elas.

Com o objetivo de verificar a possibilidade de adsorção do fósforo pelo talco, foram feitas análises de talco fresco e talco semi-alterado a alterado. Em um total de cinco análises de talco semi-alterado a alterado foi obtida uma média de 0,15 por cento de fósforo. Duas amostras de talco fresco acusaram um teor médio de 0,02 por cento de fósforo. A elevação do teor de fósforo no talco alterado indicou a associação do mineral portador do fósforo com o talco, conforme seu estado de alteração.

Esta verificação anterior sugeriu análises de hematita talcosa, considerada como um subtipo da hematita xistosa. Neste tipo de hematita o talco apresenta-se ao longo da xistosidade e mais raramente em fraturas ou zonas de tectonismo. Duas análises indicaram um teor médio de 0,07 por cento de fósforo, portanto muito mais alto do que o teor médio da hematita xistosa.

Duas análises de raios X foram feitas na Cadeira de Mineralogia da Fac. Fil. Ci. e Letras para determinação das variedades mineralógicas associadas ao talco. Foi identificado talco predominante, sericita e alguma serpentina, confirmando análises anteriores feitas por Dorr e Barbosa (1963).

A rocha intrusiva metamorfisada será referida apenas como "intrusiva". A zona próxima à intrusiva apresenta-se normalmente talcosa. Parece que o talco relaciona-se à intrusiva e originou-se diretamente dela ou então pela transformação de um mineral préexistente. Ela corta concordante ou discordantemente a Formação Ferrífera. Segundo Dorr e Barbosa (1963) esta rocha corresponde a uma ultrabásica submetida a metamorfismo. É dificilmente encontrada fresca; alterada ou semi-alterada apresenta-se bastante friável. Quando fresca, tem coloração verde escura, com granulação fina ao redor de meio milímetro, localmente com placas de talco branco. As placas de talco imprimem uma leve orientação à amostra. O mineral fino, de coloração verde foi identificado em lâminas delgadas e raios X como sendo uma variedade de clorita, Thu

HEMATITA PULVERULENTA

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Proc. (4)
Co	C-1	68,7	0,02	0,2	1,1	0,2	98,2	*	-	-
Co	C-2	69,0	0,01	0,1	0,6	0,2	98,7	*	-	-
Co	C-3	68,9	0,03	0,2	0,8	0,1	98,6	*	-	-
Co	C-4	69,0	0,02	0,2	0,7	0,1	98,6	*	-	-
Co	C-5	68,6	0,03	0,2	0,7	0,5	98,2	*	-	-
Co	C-6	68,6	0,04	0,2	1,0	0,3	98,2	*	-	-
Co	C-7	68,7	0,03	0,2	0,9	0,3	98,3	*	-	-
Co	C-8	69,2	0,01	0,1	0,5	0,1	98,9	*	-	-
Co	C-9	68,9	0,03	0,2	0,7	0,3	98,5	*	-	-
Co	C-10	68,5	0,03	0,1	0,9	0,6	97,9	*	-	-
Co	C-11	68,6	0,03	0,2	1,1	0,2	98,1	*	-	-
Co	C-12	68,8	0,03	0,3	1,7	0,1	98,4	*	-	-
Co	C-13	69,0	0,03	0,1	0,6	0,1	98,7	*	-	-
Co	C-14	68,8	0,07	0,3	0,7	0,1	98,4	*	-	-
Co	C-15	68,7	0,06	0,2	0,9	0,3	98,2	*	-	-
Co	C-16	68,1	0,03	0,2	1,6	0,5	97,4	*	-	-
Co	C-17	68,9	0,02	0,3	0,8	0,1	98,5	*	-	-
Co	C-18	69,0	0,05	0,2	0,7	0,1	98,6	*	-	-
Co	C-19	69,3	0,03	0,2	0,3	0,1	99,1	*	-	-
Co	C-20	68,8	0,02	0,1	0,9	0,2	98,4	*	-	-
Co	C-21	68,8	0,03	0,2	0,8	0,2	98,4	*	-	-
Co	C-22	69,0	0,02	0,2	0,7	0,1	98,7	*	-	-
Co	C-23	68,8	0,02	0,2	0,8	0,2	98,4	*	-	-
Co	C-24	68,8	0,04	0,3	0,7	0,2	98,3	*	-	-
Co	C-25	68,4	0,03	0,2	1,1	0,4	97,9	*	-	-
Co	C-26	69,0	0,02	0,2	0,6	0,2	98,7	*	-	-
Co	C-27	68,8	0,03	0,2	0,9	0,2	98,4	*	-	-
Co	C-28	68,6	0,02	0,2	0,9	0,3	98,2	*	-	-
Co	C-29	68,8	0,02	0,2	0,8	0,2	98,4	*	-	-

HEMATITA PULVERULENTA

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Co	C-30	68,8	0,03	0,2	0,9	0,2	98,4	*	-	-
Co	C-31	68,9	0,03	0,2	0,8	0,1	98,5	*	-	-
Co	C-32	69,0	0,02	0,1	0,6	0,2	98,7	*	-	-
Co	C-33	68,6	0,04	0,2	0,7	0,5	98,2	*	-	-
Co	C-34	69,0	0,02	0,2	0,7	0,1	98,7	*	-	-
Co	C-35	68,8	0,03	0,2	0,7	0,3	98,4	*	-	-
Co	C-36	68,9	0,08	0,1	0,7	0,2	98,6	*	-	-
Co	C-37	69,1	0,03	0,1	0,6	0,1	98,8	*	-	-
Co	C-38	68,9	0,03	0,2	0,7	0,2	98,6	*	-	-
Co	C-39	68,9	0,03	0,2	0,7	0,3	98,5	*	-	-
Co	C-40	68,8	0,03	0,2	0,8	0,3	98,3	*	-	-
Co	C-41	69,0	0,03	0,1	0,7	0,2	98,6	*	-	-
Co	C-42	68,9	0,04	0,2	0,7	0,1	98,6	*	-	-
Co	C-43	69,0	0,03	0,2	0,7	0,1	98,6	*	-	-
Co	C-44	68,8	0,03	0,2	0,9	0,1	98,3	*	-	-
Co	C-45	68,7	0,04	0,2	1,0	0,1	98,3	*	-	-
Co	C-46	68,9	0,03	0,2	0,8	0,2	98,5	*	-	-
Co	C-47	68,9	0,02	0,2	0,7	0,1	98,6	*	-	-
Co	C-48	68,5	0,04	0,3	1,1	0,3	98,0	*	-	-
Ca-17	C-49	68,4	0,03	0,5	0,9	0,5	97,8	*	-	45,1 - 48,7
Ca-17	C-50	69,0	0,02	0,2	0,7	0,1	98,7	*	-	48,7 - 50,9
Co-Ba	C-51	68,7	0,01	0,4	0,5	0,2	98,2	*	-	-
D.C.	C-52	69,1	0,01	0,5	0,2	0,3	98,8	*	-	-
D.C.	C-53	68,4	0,02	0,5	0,8	0,5	97,8	*	-	-
Co-Ba	C-54	68,8	0,03	0,4	0,5	0,7	98,3	*	-	-

* Análises com Fe²⁺ oxidado a Fe³⁺.

Tabela 11

ITABIRITO DURO

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Co-91	D-12	50,1	0,01	26,6	1,4	0,2	70,4	0,0	-	41,5
Co-83	D-13	33,3	0,13	51,8	0,5	0,1	44,4	2,8	15,8	196,5
Co-87	D-14	33,3	0,06	50,2	1,8	0,1	45,9	1,7	27,0	174,0
Co-84	D-15	40,7	0,06	40,1	1,0	0,5	56,4	1,6	35,2	93,6
Co-83	D-17	49,0	0,01	28,6	0,9	0,2	67,2	2,5	26,8	193,0
Co-82	D-18	47,2	0,02	31,9	0,3	0,1	65,3	2,2	29,6	188,0
Co-86	D-19	41,7	0,02	39,0	0,4	0,1	58,1	2,2	26,4	112,4
Co-12A	P-118	42,9	0,07	38,2	0,5	0,1	59,5	1,4	42,5	167,0
Co-12A	P-117	37,8	0,01	44,7	1,1	0,1	52,4	1,4	37,4	117,3
Co-87	Fe-8	36,0	0,05	46,4	1,7	0,3	51,5	0,0	-	94,0
Co-87	Fe-9	55,7	0,04	18,0	1,7	0,5	79,6	0,0	-	120,4
Co-90	D-147	44,1	0,08	35,5	0,3	0,1	63,1	0,3	210,3	68,0
Co-90	D-144	44,3	0,18	32,8	2,1	1,4	63,3	0,0	-	64,0
Co-90	D-145	41,8	0,10	37,3	1,1	1,2	59,7	0,4	149,2	60,1
Pi-3	D-110	45,7	0,04	29,8	0,5	2,0	65,4	2,1	31,1	137,0
Pi-3	D-111	41,9	0,02	37,4	0,3	2,0	58,6	1,2	48,8	138,2
Pi-3	D-112	52,4	0,03	21,0	0,4	1,8	74,9	1,2	62,4	136,0
Pi-5	D-113	52,2	0,01	25,0	0,4	0,1	73,6	0,9	81,8	70,3
Pi-7	D-114	42,1	0,02	39,1	0,4	0,1	58,9	1,2	49,0	72,0
Co-95	D-115	40,8	0,01	40,9	0,3	0,1	57,6	0,9	64,0	99,3
Co-85	D-97	35,0	0,01	54,9	0,4	3,0	40,5	0,5	81,0	37,8
Co-2	D-98	47,3	0,04	30,6	0,2	0,0	67,6	0,6	112,6	197,0
Co-88	D-99	32,1	0,06	52,0	1,1	0,3	45,2	0,6	75,3	73,0
Co-14	D-100	38,9	0,01	43,2	0,5	0,0	54,6	0,9	60,6	41,0
Co-17	D-101	40,9	0,01	41,0	0,2	0,0	57,5	0,9	63,9	230,5

Tabela 12

ITABIRITO PULVERULENTO

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
DC-6	D-16	34,8	0,01	48,2	1,6	0,5	47,4	2,4	19,7	36,5
Ca-47	D-20	47,5	0,01	31,6	0,3	0,1	65,5	2,2	29,8	19,3
DC-3	D-21	54,3	0,07	19,2	1,2	1,7	76,5	1,1	69,5	44,0
DC-2	D-22	39,0	0,02	43,2	0,9	0,1	54,5	1,1	49,5	60,4
Ca-18	1	55,4	0,02	19,6	0,6	0,2	79,3	*	-	3,0 - 9,0
Ca-18	2	53,3	0,01	23,0	0,3	0,1	76,2	*	-	9,0 - 13,7
Ca-18	3	55,9	0,02	18,8	0,6	0,2	80,0	*	-	13,7 - 18,3
Ca-18	4	52,5	0,01	24,3	0,1	0,2	75,1	*	-	18,3 - 22,9
Ca-18	5	58,1	0,03	15,2	0,9	0,4	83,1	*	-	22,9 - 27,4
Ca-18	6	49,9	0,01	28,6	0,0	0,1	71,0	*	-	27,4 - 31,1
Ca-18	7	60,9	0,02	12,3	0,1	0,10	87,1	*	-	31,1 - 34,1
Ca-71	D-153	40,0	0,07	41,2	1,0	0,4	56,7	0,4	141,8	112,5
Ca-73	D-154	48,8	0,01	29,0	0,7	0,2	69,4	0,4	173,5	95,7
Ca-52	D-148	50,6	0,03	26,8	0,3	0,1	72,3	0,0	-	99,2
Ca-49	D-149	41,9	0,02	38,6	0,4	0,1	59,9	0,4	149,8	27,0
Ca-43	D-150	43,0	0,02	36,0	1,3	0,5	61,5	0,3	204,5	72,6
Ca-73	D-151	47,3	0,01	26,7	2,9	1,8	67,6	0,3	225,0	150,0

* Análises com Fe²⁺ oxidado a Fe³⁺.

Tabela 13

ringita (vide foto da Figura 49). Cristais idiomórficos a anhedrais de magnetita de alguns mm a 1 cm ocorrem dispersos na intrusiva. Em um dos raros afloramentos expostos na Mina Cauê, nota-se, na intrusiva fresca, zonas ricas de quartzo compartimentado (Figura 50). Esta zona quartzosa está próxima ao contacto do itabirito encaixante com a intrusiva. O número de análises é pequeno dada a dificuldade de encontrar afloramentos e testemunhos de rocha fresca, e acham-se representadas na Tabela 14.

Sengundo R. Ellert (comunicação oral), deve haver duas rochas que são denominadas de intrusivas. A análise química de duas amostras da Mina Conceição, que parecem ter características diferentes da intrusiva anteriormente descrita, deram teor de fósforo de 0,80 e 0,90 por cento. O estudo de uma lâmina delgada de uma das amostras indicou alta porcentagem de cristais de apatita com relação às rochas já descritas. Estas características parecem de fato indicar que há duas rochas diferentes descritas indistintamente como intrusiva.

11 - DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NA ZONA SUPERFICIAL

O comportamento do elemento fósforo na zona superficial já foi estudado por vários autores. Entre eles cumpre citar Goldich (1947), Goldich (1948), e Hose (1963). O teor de fósforo da zona superficial depende do teor médio das rochas alteradas e erodidas. A distribuição e concentração dependerá de fatores outros que controlam as sucessivas solubilizações e redeposições especialmente aquelas dos últimos estádios de alteração das rochas do Distrito. Segundo os autores citados, e na dependência de vários fatores químicos e físicos, a concentração deste elemento ocorre a poucos metros abaixo da superfície.

Para esta pesquisa foram feitas, inicialmente, análises de dois tipos de canga: porosa, formada desde a superfície até uma profundidade média de meio metro. A espessura desta faixa é irregular, atingindo, em zonas cavernosas ou fraturadas, alguns metros de profundidade. A canga porosa é constituída de cimento limonítico duro, coeso, cimentando blocos de hematita em dimensão e porcentagens variáveis. Na zona de cimento desenvolvem-se canais sinuosos, às vezes ramificados. Sua espessura varia em torno de al -

Figura 49 - "Intrusiva" fresca, metamorfoisada, constituída de clorita (thuringita) - Nícois cruzados (x 37,5).

Figura 50 - "Intrusiva" metamorfoisada semi-alterada com faixa de quartzo compartimentado. Proximidades do itabirito encaixante. Banco 1193 - Mina Cauê.

"INTRUSIVA" FRESCA

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Ca-28	D-107	11,1	0,05	52,0	19,1	10,0	15,2	2,2	6,8	67,30
Ca-28	D-10	6,2	0,01	54,3	22,4	14,3	8,8	*	-	67,10
Ba-1190	D-108	21,4	0,02	39,8	17,0	8,5	30,6	3,1	9,8	-
Ba-1219	D-11	7,9	0,03	53,8	20,7	14,6	10,7	*	-	-
Ba-1219	D-109	9,3	0,03	54,8	18,5	10,1	13,3	2,0	6,6	-

"INTRUSIVA" SEMI-ALTERADA

Ca-71	D-159	18,7	0,19	51,0	11,2	9,0	26,7	0,0	-	257,00
Ba-1190	D-24	17,2	0,05	46,6	17,8	10,7	24,6	*	-	-
Ca-28	D-25	7,9	0,06	43,1	26,4	18,8	11,4	*	-	67,40
Ca-28	D-92	9,1	0,06	54,2	16,7	1,6	13,5	13,0	1,0	67,70
Ca-28	D-94	6,0	0,02	50,5	20,8	1,2	14,0	6,9	2,0	68,20

"INTRUSIVA" ALTERADA

Ca-30	F-6530	19,4	0,12	65,8	6,8	9,0	27,8	*	-	21,50 - 31,00
Ca-32	F-6434	44,0	0,08	25,9	4,3	6,6	63,0	*	-	33,40 - 34,00
Ca-32	F-6436	18,1	0,13	56,7	5,2	10,0	25,0	*	-	54,00 - 55,00
Ca-16	10	36,7	0,29	20,1	18,7	8,1	52,5	*	-	92,80
Ca-28	D-93	8,4	0,18	53,8	16,8	1,4	16,9	10,4	1,6	66,50

* Análises com Fe²⁺ oxidado a Fe³⁺.

Tabela 14

guns mm. Estes canais devem relacionar-se à dissolução química atida pelas águas superficiais. Suas paredes são lisas, evidenciando processo químico de dissolução (Figura 51). Este processo, que parece ser relativamente recente, deveria influir no comportamento do elemento fósforo.

No outro grupo foi colocada a canga de aspecto físico maciço, com cimento limonítico menos coeso, pouco friável, denominada canga maciça. Esta espécie ocorre em zonas mais profundas, abaixo do tipo poroso. Em geral é constituída de material argiloso e blocos de hematita cimentados por material limonítico. Não apresenta canais de dissolução, dando à amostra aspecto maciço.

Figura 51 - Canga porosa, com canais desenvolvidos em cimento limonítico coeso. Mina Conceição.

Um total de 34 análises deu os resultados representados nas Tabelas 15 e 16.

O teor de fósforo da canga é bastante elevado em relação aos outros tipos de minérios. Os óxidos e hidróxidos que constituem o cimento da canga têm condições para fixar o fósforo solubilizado na zona superficial. Segundo estudos de Ford (1933), Weiser (1933) e Dean (1934), os óxidos hidratados, que ocorrem naturalmente como goetita, limonita, diásporo, indicam ter poder de fixação de fosfatos comparável ao dos solos. Segundo os mesmos autores, a he-

Local e/ou Furo	Nº Amostra	CANGA POROSA					Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
		Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo				
Co-42	D-146	64,0	0,10	4,0	1,1	2,4	91,5	0,4	228,7	1,20
Co	D-44	57,7	0,16	6,3	0,9	8,2	82,5	1,7	48,5	0,00 - 0,16
Co	D-48	56,7	0,16	7,9	0,7	8,8	80,1	2,1	38,1	0,88 - 1,00
Co	D-50	57,5	0,16	4,8	1,0	9,6	82,2	2,0	41,1	1,10 - 1,30
Co	D-54	62,0	0,12	3,5	0,5	5,8	88,7	1,2	73,9	1,85 - 2,00
Co	D-55	56,9	0,16	3,0	0,7	13,1	81,4	1,4	58,1	0,00
Co	D-56	63,2	0,11	0,7	1,1	5,3	90,4	2,2	41,1	0,00 - 0,20
Co	D-66	64,0	0,09	1,2	0,9	4,4	91,5	1,7	53,8	0,30
Co	D-67	62,9	0,10	1,5	0,5	4,7	89,9	3,1	29,0	0,00 - 0,20
Ca	D-68	59,5	0,14	1,1	0,6	10,0	85,0	3,0	28,3	0,20 - 0,40
Co	D-87	54,5	0,12	7,8	1,9	12,0	76,9	0,9	85,5	0,10
Ca	D-69	59,6	0,10	2,1	0,8	8,9	85,2	2,7	31,6	0,40 - 0,60
DC	D-88	56,8	0,10	6,7	0,6	11,4	79,6	1,4	56,8	0,50
Ca	D-73	61,3	0,11	1,0	0,6	8,1	87,7	2,3	38,1	1,20 - 1,40
Ca	D-89	56,4	0,07	6,6	1,9	10,4	79,6	0,9	88,4	0,70
Ca	D-79	65,1	0,09	0,6	0,4	2,7	93,1	2,9	32,1	2,40 - 2,60
Co	D-86	54,6	0,11	7,9	0,5	12,6	77,1	0,9	85,7	0,10
Co-95	D-130	67,4	0,05	0,8	0,7	1,8	96,3	0,3	321,0	2,10
DC-4	D-132	62,7	0,09	1,3	1,5	7,1	89,6	0,0	-	0,40
Co-44	D-133	64,0	0,07	0,9	2,0	5,0	91,5	0,3	305,0	5,70
DC-6	D-134	64,5	0,06	1,8	1,2	4,7	92,2	0,0	-	4,40
DC-6	D-135	64,9	0,11	1,9	2,1	2,9	92,8	0,0	-	6,20

Tabela 15

CANGA MACIÇA

Local e/ou Furo	Nº Amostra	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P. Fogo	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /FeO	Prof. (m)
Co	D-57	61,7	0,11	1,4	1,7	7,2	88,2	1,2	73,5	0,20 - 0,40
Co	D-58	62,0	0,10	1,5	1,7	6,4	88,6	1,5	59,0	0,40 - 0,60
Ca	D-77	65,2	0,17	0,6	0,6	2,6	93,2	2,6	35,9	2,00 - 2,20
Ca	D-78	65,5	0,10	0,6	0,4	2,0	93,7	3,0	31,2	2,20 - 2,40
Ca	D-84	65,8	0,13	0,8	0,4	1,1	94,1	3,3	28,5	3,40 - 3,60
Ca	D-85	66,5	0,18	0,4	0,5	1,7	95,1	1,9	50,0	3,60 - 3,80
Ca-48	D-122	60,2	0,07	7,0	2,7	4,0	85,6	0,4	214,0	7,50
DC-3	D-142	66,0	0,11	1,5	1,2	2,6	94,0	0,3	313,0	1,00
Co-44	D-139	66,0	0,05	0,6	1,8	3,4	94,0	0,3	313,0	8,40
Co-44	D-138	66,1	0,02	0,9	1,6	3,0	94,1	0,4	235,0	7,60
Co-94	D-127	66,5	0,13	1,2	1,7	1,8	95,1	0,0	-	9,00
Co-42	D-128	67,6	0,12	0,4	1,1	1,6	96,6	0,0	-	5,60

Tabela 16

matita não apresenta capacidade visível de fixar fosfatos.

Scarseth (1935), Toth (1937), Stout (1939), Kelly e Midgley (1943) e Coleman (1944), sugeriram a fixação do fósforo por óxidos hidratados de ferro e alumínio com uma simples substituição ou troca de fosfato por íons hidroxila.

As análises demonstraram que os teores de fósforo dos dois tipos de canga são semelhantes embora as características físicas sejam diferentes. Parece que os processos químicos mais recentes responsáveis pela formação dos canais ou não têm condições muito propícias à solubilização e remanejamento do fósforo ou então o processo exige tempo longo de ação para alterar significativamente o teor deste elemento.

Para o estudo do comportamento do elemento fósforo em seu conjunto, foi elaborado um perfil de amostragem ao longo de um furo de sondagem da Mina Cauê, de número Ca-23 F.51. Cada análise representa várias amostras coletadas em segmentos limitados pela mudança das características físicas do minério. Foram coletadas amostras ao longo de todo o furo (Figura 52).

O fósforo apresenta teor variável na superfície com um enriquecimento de 11 a 15 metros de profundidade. O teor de fósforo aumenta próximo à intrusiva, a 45 metros de profundidade e permanece alto na própria intrusiva. Em seguida baixa em itabirito e hematita, quando não há intrusiva próxima. Novamente aumenta o teor em 217 metros no xisto Nova Lima alterado. As zonas de intrusivas são alteradas, não havendo intrusiva fresca neste perfil.

Os vários tipos de rochas e minérios, em seus respectivos estádios de alteração, foram reunidos em um único quadro, perfazendo um total de 245 análises químicas alistadas na Tabela 17.

Com referência à porcentagem de fósforo, na coluna "Variação", foi incluída a análise de teor mais alto e mais baixo de cada tipo de rocha e minério, separando os vários estádios de alteração. Na coluna "Média", foi computada a média aritmética do teor das amostras separadas nos vários tipos e estádios de alteração.

A última coluna, denominada "Fator", seria mais propriamente denominada "Fator de Acréscimo", e indica quantas vezes o teor daquele tipo de minério está acima ou abaixo da média de cada tipo de minério.

As observações anteriores e aquelas feitas a seguir

estão contidas na Tabela 17. Ela refere-se apenas ao elemento fósforo.

Os "Fatores" para este elemento foram calculados, levando-se em conta várias médias. Uma média para cada uma das encaixantes, que inclui o xisto Nova Lima fresco e o filito Batatal fresco. Outra média refere-se à Formação Ferrífera que apresenta teores de fósforo mais baixos que aqueles referentes à encaixante. Por fim, a última média, é referente à intrusiva fresca. Para as encaixantes, que apresentam teores pouco mais altos e excepcionalmente constantes fixou-se a média em 0,04 (xisto) e 0,23 para o filito. A Formação Ferrífera inclui vários tipos de minérios. Dentre eles separou-se os tipos de minérios que não sofreram alteração. Assim, fixou-se os valores do itabirito duro, hematita compacta e hematita xistosa. No cálculo da média aritmética de toda a Formação Ferrífera foi dado peso decrescente desde o itabirito, passando pela hematita xistosa até a hematita compacta. Foi atribuído peso 100 ao itabirito duro, peso 40 à hematita xistosa e peso 10 à hematita compacta. Foram atribuídos pesos diferentes dado o fato do itabirito duro e a hematita xistosa serem quantitativamente mais representativos do que a hematita compacta.

Estes cálculos forneceram uma média para o elemento fósforo na Formação Ferrífera da ordem de 0,03 por cento. Com base nesta média e naquela das rochas encaixantes e intrusiva foram calculados os "Fatores" para cada tipo de rocha e seu estágio de alteração. Nota-se, mais uma vez, que estes valores médios foram fixados arbitrariamente, baseados nas análises dos vários tipos de rochas e minérios.

A dispersão dos teores de fósforo em torno da média, varia com o tipo de minério. De maneira geral, e sob caráter geológico, os teores dos vários tipos de minérios são razoavelmente compactos em redor da média que os representa. O itabirito duro apresenta valores divergentes com relação à média.

Para facilitar a comparação visual dos teores de fósforo nos vários tipos de minérios e seus respectivos estágios de alteração, cada grupo de análises foi representado por um histograma com ordenada em escala logarítmica (Figuras 53 e 54).

VARIAÇÃO DOS TEORES DE FÓSFORO NOS TIPOS DE MINÉRIOS E ROCHAS

MINÉRIOS E ROCHAS		Nº DE AMOSTRAS	PORCENTAGEM DE FÓSFORO		
			Variação	Média	Fator
ENCAIXANTES	Xisto Nova Lima				
	Fresco	7	0,03-0,06	0,04	1,0(*)
	Semi alterado	7	0,04-0,06	0,04	1,0(*)
	Alterado	5	0,04-0,16	0,10	2,5(*)
	Filito Batatal				
	Fresco	7	0,03-0,38	0,17	1,0(**)
	Semi-alterado	5	0,01-0,20	0,07	0,4(**)
	Alterado	7	0,01-0,46	0,11	0,6(**)
INTRUSIVA	Intrusiva				
	Fresca	5	0,01-0,05	0,02	1,0(***)
	Semi-alterada	5	0,02-0,19	0,07	3,5(***)
	Alterada	5	0,08-0,29	0,16	8,0(***)
FORMAÇÃO FERRÍFERA	Itabirito				
	Duro	25	0,01-0,18	0,04	1,3(****)
	Pulverulento	17	0,01-0,07	0,02	0,6(****)
	Hematita				
	Xistosa	17	0,01-0,08	0,02	0,6(****)
	Compacta	43	0,01-0,09	0,02	0,6(****)
	Pulverulenta	54	0,01-0,08	0,03	1,0(****)
	Talcosa	2	0,05-0,09	0,07	2,3(****)
	Canga				
	Porosa	22	0,05-0,16	0,10	3,3(****)
	Maciça	12	0,02-0,18	0,10	3,3(****)
TOTAL		245			

(*) Fator calculado em relação à média do Xisto Nova Lima: 0,04% de P.

(**) Fator calculado em relação à média do Filito Batatal: 0,17% de P.

(***) Fator calculado em relação à média da Intrusiva: 0,02 % de P.

(****) Fator calculado em relação à média da Formação Ferrífera: 0,03 % de P.

Figura 53 - Histogramas da distribuição do elemento fósforo nas rochas encaixantes, intrusiva e minério.

Figura 54 - Histogramas da distribuição do elemento fósforo nas rochas encaixantes, intrusiva e minério.

CAPÍTULO III

RELAÇÕES DOS TIPOS DE MINÉRIOS E ROCHAS E O COMPORTAMENTO DO ELEMENTO FÓSFORO

Nos capítulos anteriores foram estudados, separadamente, os tipos de minérios e o teor de fósforo de cada um. Da interação dos tipos de minérios e o estágio de alteração nota-se o comportamento diferente do elemento fósforo em cada grupo.

O fósforo encontrado nas duas encaixantes da Formação Ferrífera, deve relacionar-se à apatita que ocorre dispersa na rocha, identificada em lâminas delgadas. No que concerne ao ambiente de sedimentação em que se formaram as encaixantes e a Formação Ferrífera há certamente diferenças ecológicas, que implicam em variações nos teores do elemento fósforo.

O xisto Nova Lima e o Filito Batatal pertencem às rochas pré-Minas da Série Rio das Velhas. Estas rochas tiveram ambiente de deposição diferente daquele que predominou na "Fácies Óxido" da Formação Ferrífera do Grupo Itabira. A classificação da Formação Ferrífera do Distrito de Itabira na "Fácies Óxido" foi feita com base no trabalho elaborado por James (1954). Dorr e Barbosa (1963) já haviam feito referências à "Fácies Óxido" deste Distrito.

James (1954), estudando a Formação Ferrífera Pré-cambriana da região do Lago Superior, com base nos minerais de ferro originais (primários) e dominantes no sedimento, classificou esta formação em quatro principais fácies:

Fácies sulfeto - representada por ardósias escuras na qual a pirita pode compor 40% da rocha. Sílex (chert) é raro.

Fácies carbonato - consiste, quando pura, de carbonato rico de ferro e sílex (chert) alternados.

Fácies óxido - caracteriza-se por dois tipos principais; um rico de magnetita e outro de hematita. Ambos parecem ser de origem primária. A litologia constituída de magnetita, tem intercalações de sí

lex (chert), carbonato ou silicato de ferro, ou uma combinação dos três. A hematita que se apresenta na forma finamente cristalina, intercala-se com "chert" ou "jasper". A estrutura oolítica é comum.

Fácies silicato - que contém um ou mais silicatos hidratados ferrosos (greenalita, minnesotaíta, stilpnomelana, clorita) como constituintes principais.

Os sedimentos pré-Minas contêm notáveis quantidades de clorita-xisto, que, segundo Dorr e Barbosa (1963), provavelmente originaram-se em parte de rochas vulcânicas. A Formação Itabirito Cauê, pertencente à "Fácies Óxido", é considerada como tendo sedimentos químicamente predominantes.

Dentre os tipos de minérios da Formação Ferrífera destaca-se o itabirito duro pelo fato de apresentar um teor médio mais alto (0,04 % P) do que aquele da Formação Ferrífera (0,03). Este fato sugeriu um estudo mais pormenorizado das bandas mineralógicas que compõem esta rocha. Separou-se no itabirito as zonas de hematita xistosa, as de quartzo e as de hematita xistosa com quartzo disperso em porcentagem aproximadamente equivalente. Os resultados obtidos em 6 análises indicaram que em geral, quanto maior o teor de fósforo, cresce também o teor de alumina. O teor de fósforo não tem relação com a porcentagem de quartzo.

Quanto ao minério superficial do tipo canga, o teor do elemento fósforo para a variedade porosa e maciça não apresentou variações significativas. A média para o primeiro grupo está ao redor de 0,12 e para o segundo grupo atinge 0,13 por cento, portanto sem diferença considerável. O processo de dissolução que age na zona imediatamente superior e que origina os canais na canga porosa não deve efetuar dissoluções ou precipitações de fósforo em quantidade suficiente para variar o teor. Os agentes responsáveis pela dissolução e precipitação do fósforo têm ação mais ampla e não se restringem à zona imediatamente superior da canga.

Foram feitas considerações a respeito dos "Tipos de minérios e rochas". Resta agora discutir o comportamento do elemento fósforo com relação ao "Estádio de alteração" (Figura 3).

Figura 55 - Histograma da distribuição do elemento fósforo em minério duro (hematita compacta, xistosa e itabirito duro) e minério brando (hematita pulverulenta e itabirito pulverulento).

Durante o processo de abrandamento, que, em última análise, corresponde a uma lixiviação parcial ou total de alguns cristais de hematita e quartzo, ocorrem pequenas variações no teor de fósforo. Sucessivas solubilizações e precipitações seriam os fatores responsáveis por estas variações. Para efeito de comparação desta variação foram elaborados dois histogramas. O primeiro, contendo os tipos de minérios classificados como "duros" ou seja, sem qualquer vestígio de abrandamento. Inclue um total de 73 análises de hematita compacta, xistosa e itabirito duro. Outro histograma, sobrepôsto ao primeiro contém um total de 67 amostras de minério brando do tipo hematita pulverulenta e itabirito pulverulento (Figura 55).

No minério do tipo duro, o maior valor na distribuição da frequência do fósforo está em 0,02 por cento. Paralelamente ao processo de abrandamento do minério, houve um pequeno acréscimo no teor médio do fósforo, cuja maior distribuição passou para

0,03 por cento. Naturalmente as amostras coletadas para compor os dois histogramas incluem tipos de minérios de textura e composição química diversas, quais sejam, itabirito e hematita. Assim, tornou-se mister refinar mais o estudo em cada tipo específico de minério. O histograma da Figura 56 é o resultado das análises de hematita xistosa e compacta e 54 de hematita pulverulenta, totalizando 79 análises.

No comportamento geral quanto ao teor de fósforo há uma grande semelhança. A média do teor de fósforo da hematita xistosa compacta é de 0,02 ao passo que o teor médio da hematita pulverulenta é de 0,03 por cento. Estes valores podem ser confirmados na Tabela 17. Desde que a hematita pulverulenta origina-se da hematita xistosa e compacta, nota-se que o processo de abrandamento reduz de pouco as variações dos teores de fósforo. Ele aproxima os valores da média e também aumenta um pouco o teor médio de fósforo do minério brando.

Os histogramas F1 e F2 da Figura 54 permitem uma comparação da distribuição do elemento fósforo no itabirito duro e pulverulento. Desta feita a variação de teor do elemento fósforo é diferente daquela registrada para a hematita xistosa e compacta. O processo de abrandamento levou ao abaixamento do teor de fósforo. No que diz respeito à variação dos teores em cada amostra, com o abrandamento houve homogeneização do teor de fósforo. Os teores extremos foram aproximados da média. A homogeneização do teor é simultânea com o abrandamento.

O teor de fósforo do minério localizado próximo ao contacto com a encaixante foi também objeto de estudos. Foi elaborado um perfil com amostras coletadas na Formação Ferrífera e na encaixante imediata. Escolheu-se um furo de sondagem que apresentasse uma sequência homogênea de tipo de minério junto ao contacto com as encaixantes. Naturalmente, caso houvesse nesta sequência mudança do tipo de minério, haveria conseqüentemente, mudança do teor de fósforo. Tomou-se, assim, uma sequência homogênea de hematita xistosa, representada na Figura 57.

O teor de fósforo aumenta com a proximidade da rocha encaixante. O perfil da Figura 52 indica também esta variação. As soluções que permearam a Formação Ferrífera migraram junto ao contacto desta Formação com a encaixante, que é relativamente impermeável. Ao mesmo tempo que a Formação Ferrífera era abrandada e a

Figura 56 - Histograma da distribuição do elemento fósforo em hematita xistosa e compacta e hematita pulverulenta.

Figura 57 - Variação do teor de fósforo no contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes.

encaixante alterada, o teor de fósforo ia paulatinamente crescendo, em virtude das sucessivas solubilizações acima e precipitações junto à zona de contacto com as encaixantes, O processo de alteração do xisto encaixante é acompanhado de um aumento do teor de fósforo, e no filito parece evidenciar apenas solubilizações locais e no conjunto pequena diminuição no teor de fósforo (Ver Tabelas 7 e 8).

Figura 58 - Distribuição do elemento fósforo na canga

O fósforo não teve acréscimo porcentual relativo, por lixiviação de outros minerais ou elementos, mas foi trazido por soluções que percolaram a Formação Ferrífera e migraram ao longo do contacto com as encaixantes.

Foram elaborados perfis de canga capeando rochas diferentes para verificar possíveis anomalias no comportamento do fósforo quanto à Formação Ferrífera e às encaixantes.

Para verificar o comportamento deste elemento no sentido lateral, foram coletadas amostras constituindo um perfil horizontal. Contém blocos de hematita dura e cimento maciço e poroso.

O cimento em geral possui blocos pequenos de hematita com dimensão representada no segmento do perfil, em centímetros (Figura 58), contendo 11 análises.

Figura 59 - Distribuição do elemento fósforo em canga capeando hematita pulverulenta.

Os fatos relevantes são o teor alto de fósforo do cimento da canga e o baixo teor dos blocos de hematita. Os blocos de hematita xistosa e dura mantêm o teor original. Não apresentam alteração no teor enquanto não se processa a lixiviação e eventualmente abrandamento do bloco. Amostras de hematita xistosa, dura, com alguns poros que denunciavam início de lixiviação já apresentaram um teor de fósforo pouco mais alto que aquele dos blocos intactos. O teor de fósforo do cimento limonítico decresce com o aumento do número e dimensão dos blocos de hematita agregados.

Em seguida, para verificação do comportamento do fósforo no sentido vertical, foram elaborados dois perfis. O primeiro em canga pobre, praticamente sem blocos de hematita dura. Formou-se pela cimentação de hematita pulverulenta. Compreende um total de

Figura 60 - Distribuição do elemento fósforo em canga capeana do o xisto Nova Lima.

10 análises. Pelo fato da canga apresentar-se razoavelmente homogênea, a amostragem foi feita a intervalos fixos de 20 cm, representados na Figura 59.

A pequena profundidade do afloramento impediu amostragem mais profunda. Observa-se o teor mais alto da canga que diminui ao redor de 1 metro de profundidade, onde ela termina e inicia a hematita pulverulenta. O teor médio da hematita pulverulenta ao redor de 0,05 por cento indica que já houve enriquecimento de fósforo nesta faixa pois segundo a Tabela 17, o teor médio da hematita pulverulenta é de 0,03 por cento.

O perfil seguinte foi amostrado em canga superposta ao xisto Nova Lima. Portanto é material que não se acha "in situ". Foram analisadas 19 amostras a intervalos constantes de 20 cm. A extrema variabilidade das características físicas do minério a pequenos intervalos permitiu, ainda uma vez, a fixação dos intervalos constantes de 20 cm para a amostragem (Figura 60).

Esta canga contém blocos de hematita dura em tamanho e porcentagem variáveis, daí as variações de teor de um segmento para outro. Até a profundidade de 3,8 metros, o teor de fósforo não apresentou valores extremos com relação à média. Variações maiores e concentração devem ocorrer a maiores profundidades. A impossibilidade de amostrar impediu prosseguimento do perfil em profundidade maior.

Como um resumo das análises químicas de canga, foi elaborado um quadro contendo os teores médios de fósforo de acôrdo com a profundidade, agrupados em profundidade crescente de um em um metro.

VARIAÇÃO DOS TEORES DE FÓSFORO COM A PROFUNDIDADE

Profundidade (metros)	Variação	Porcentagem média de P	Número de análises
0,0 - 1,0	0,06 - 0,22	0,12	24
1,0 - 2,0	0,11 - 0,16	0,13	6
2,0 - 3,0	0,02 - 0,19	0,09	9
3,0 - 4,0	0,03 - 0,20	0,14	6
4,0 - 5,0	0,02 - 0,06	0,05	3
5,0 - 6,0	0,06 - 0,12	0,08	4
6,0 - 7,0	0,02 - 0,11	0,05	3
7,0 - 8,0	0,04 - 0,07	0,05	3
Total:			58

Tabela 18

Figura 61 - Análises granulométricas de itabirito - respectivamente Mina Cauê e Dois Córregos.

Embora o número de análises em profundidade não se ja ainda significativo nota-se um pequeno aumento do teor de fósforo ao redor da profundidade de 3,0 a 4,0 metros. Em seguida o teor de- cresce progressivamente.

Com o objetivo de verificar o teor de fósforo em cada granulação do minério reduzido, foram lançadas em gráfico, análises granulométricas realizadas pela Companhia Vale do Rio Doce. As amos- tras contêm 2 kg de minério, tendo sido coletadas em 1964 e 1965 por técnicos daquela Companhia. As duas primeiras análises referem-se a itabirito praticamente duro e a terceira a itabirito friável, estando re- presentadas respectivamente nas Figuras 61 e 62.

Figura 62 - Análises granulométricas de itabirito friável - Mina Cauê.

No itabirito não há uma associação preferencial do fósforo com nenhum intervalo granulométrico específico. Assim tam- bém

Figura 63 - Análise granulométrica de hematita pulverulenta - Mina Conceição.

ocorre com o ferro, cuja variação de teor depende quase exclusivamente da variação da porcentagem de sílica. Há um grosseiro, embora irregular, paralelismo entre a porcentagem de sílica e alumina.

Os limites granulométricos dos grãos de quartzo estão entre +45 e + 200 mesh. Dentro destes limites médios o teor de sílica é alto.

Análises granulométricas de hematita pulverulenta es tão representadas na Figura 63. Também neste tipo de minério o fósforo não se associa preferencialmente com nenhuma granulação específica. Sua distribuição é irregular. O mineral portador tem granulação muito fina e acha-se difuso no minério. Deve associar-se às impurezas do minério, especialmente aos minerais argilosos e óxidos e hidróxidos de ferro de origem secundária.

À semelhança do itabirito, a porcentagem de alumina mantém um certo paralelismo com aquela da sílica. O ferro caracteriza-se pela homogeneidade no teor.

Dorr e Barbosa (1963) representam análises granulométricas de hematita pulverulenta e itabirito rico, nos quais o comportamento do fósforo é também irregular.

CAPÍTULO I V

O COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS MAIORES E O FÓSFORO

Nos capítulos anteriores foram feitas observações sobre óxidos de ferro e fósforo. Restam as observações sobre as relações de todos os óxidos e elementos analisados.

Para facilitar o estudo dos elementos maiores foi elaborada uma tabela contendo os tipos de rochas e minérios e a variação dos teores em cada um deles. Comparou-se o comportamento diferencial dos óxidos maiores nas encaixantes e na Formação Ferrífera.

MÉDIA DA PORCENTAGEM DE ÓXIDOS E ELEMENTOS

ROCHA	Comparação	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Perda ao Fogo	P
ENCAIXANTE	Xisto Nova Lima	8,2	*	66,1	9,9	11,8	0,04
	— Filito Batatal	— 10,9	— 9,4	— 56,0 _A	— 12,7	— 11,3	— 0,17 _B
FORMAÇÃO FERRÍFERA	Hematita Compacta Recristalizada	68,8	2,0	0,5	0,4	0,2	0,02
	— Hematita Xistosa	— 67,1 _C	— 1,1	— 1,7 _D	— 1,4	— 0,4	— 0,02
	Canga Porosa	60,7	1,6	3,3	1,0	7,2	0,10
	— Canga Maciça	— 64,9 _E	— 1,4	— 1,4	— 1,2	— 3,1 _F	— 0,10

* Não foram feitas análises para FeO.

Tabela 19

Os valores das médias para os óxidos e elementos foram calculados a partir das Tabelas 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,

15 e 16. Colocou-se letras (A, B, C, etc.) dentro das colunas das análises que apresentaram variação passível de observações, as quais foram feitas apenas em análises que contêm um número razoável de amostras e que podem portanto ser consideradas representativas.

A Tabela 19 contém os teores médios dos elementos e óxidos maiores entre os quais foi incluído o fósforo.

A letra que encabeça cada observação a seguir é a mesma colocada dentro de cada quadrado da Tabela 19.

- A - O xisto Nova Lima apresenta teores de sílica mais ou menos homogêneos. Já o filito Batatal tem variações de teor mais amplas. Várias análises destes dois tipos de rochas dão médias diferentes. A determinação do teor de sílica pode eventualmente auxiliar na identificação do xisto ou filito quando com aspecto duvidoso, especialmente próximo ao contacto destas duas rochas.
- B - A média do teor de fósforo do xisto e filito é um fator de identificação seguro das duas rochas em caso de dúvida. O teor de fósforo do filito é bastante alto em relação ao xisto. Cumpre acrescentar ainda que o teor de fósforo do xisto Nova Lima é homogêneo, ao redor de 0,04 por cento, ao passo que o teor do filito é alto e irregular.
- C - O teor de ferro da hematita compacta recristalizada é muito mais homogêneo em torno da média do que aquele da hematita xistosa, muito embora a diferença de teor em ambos os tipos seja pequena.
- D - O teor de sílica da hematita compacta recristalizada é menor do que aquele da hematita xistosa. Esta característica foi verificada também em seções polidas.
- E - O teor de ferro mais baixo da canga em relação aos outros tipos de minérios, relaciona-se às impurezas da zona superficial, tais como argilas, matéria orgânica e principalmente devido à hidratação.
- F - A perda ao fogo da canga porosa, como era de se esperar, é maior do que a perda da canga maciça, que ocorre a maiores profundidades. Esta última deve apresentar um grau de hidratação menor.

Para verificar o comportamento dos elementos maiores com a alteração e abrandamento foi elaborada a Tabela 20, que compara a rocha ou minério antes e depois da alteração ou abrandamento.

- A' - O teor de ferro do xisto Nova Lima alterado é mais alto que do xisto fresco - Deve corresponder a óxidos e/ou hidróxidos carreados da Formação Fer-rífera e depositados no xisto, quando de sua alteração.
- B' - O teor de sílica do xisto fresco é mais homogêneo. Parece que com a alteração do xisto ocorre remobilização da sílica, com solubilizações e precipitações locais.
- C' - O elemento fósforo, como já foi observado antes, aumenta consideravelmente o teor com a alteração do xisto.
- D', E', F', G' - Quanto à intrusiva, com a alteração o teor de ferro e fósforo aumentou, alumina diminuiu e sílica parece ter sido remobilizada, com solubilizações e precipitações locais.
- H' - O teor de sílica da hematita pulverulenta é mais homogêneo e pouco mais baixo que aquele da hematita compacta recristalizada.
- I' - O teor de fósforo da hematita pulverulenta é pouco mais alto do que o teor da hematita recristalizada. No histograma da Figura 56, já foram feitas considerações a este respeito.
- J', K' - Os teores de ferro e sílica do itabirito são extremamente variáveis de uma amostra para outra. Não possibilitam observações.
- L' - O abrandamento do itabirito deve implicar em um abaixamento no teor de fósforo, segundo se pode notar na relação obtida.

Rocha	Comparação	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Perda ao Fogo	P
Encaixante	Xisto Nova Lima						
	Fresco	<u>8,2</u>	*	<u>66,1</u>	<u>9,9</u>	<u>11,8</u>	<u>0,04</u>
	Alterado	<u>13,6</u> _A	*	<u>63,2</u> _B	<u>7,4</u>	<u>7,5</u>	<u>0,10</u> _C
	Filito Batatal						
	Fresco	<u>10,9</u>	<u>9,4</u>	<u>56,0</u>	<u>12,7</u>	<u>11,3</u>	<u>0,17</u>
	Alterado	<u>11,4</u>	<u>13,2</u>	<u>63,2</u>	<u>11,4</u>	<u>5,3</u>	<u>0,11</u>
Intrusiva	Intrusiva						
	Fresca	<u>11,1</u>	<u>2,4</u>	<u>50,9</u>	<u>19,5</u>	<u>11,5</u>	<u>0,02</u>
	Alterada	<u>25,3</u> _D	<u>10,4</u>	<u>44,4</u> _E	<u>10,3</u> _F	<u>7,0</u>	<u>0,16</u> _G
Formação Ferrífera	H.c.r.	<u>68,8</u>	<u>2,0</u>	<u>0,5</u>	<u>0,4</u>	<u>0,2</u>	<u>0,02</u>
	H.p.	<u>68,7</u>	*	<u>0,3</u> _H	<u>0,8</u>	<u>0,2</u>	<u>0,03</u> _I
	Itabirito						
	Duro	<u>42,6</u>	<u>1,1</u>	<u>37,4</u>	<u>0,7</u>	<u>0,2</u>	<u>0,04</u>
	Pulverulento	<u>49,0</u> _J	<u>0,8</u>	<u>28,3</u> _K	<u>0,7</u>	<u>0,4</u>	<u>0,02</u> _L

* Não foram feitas análises para FeO.

H.c.r. - Hematita compacta recristalizada.

H.p. - Hematita pulverulenta. Tabela 20

Tabela 20

TERCEIRA PARTE

CONCLUSÃO

Os estudos de campo feitos por diversos geólogos nas várias quadrículas do Quadrilátero Ferrífero, convergem para uma sequência de eventos geológicos extensivos ao Quadrilátero e também a outros locais específicos de cada área.

Incluindo-se os fenômenos gerais não identificados no Distrito de Itabira e os fenômenos locais do Distrito, obtem-se uma sequência, descrita preliminarmente, com os novos dados obtidos do estudo da textura do minério. Muitos dos fenômenos foram descritos apenas no Distrito de Itabira. Não se pretende generalizá-los para o Quadrilátero, e nem tampouco excluir a possibilidade de virem a ser descritos em outras áreas.

Os eventos extensivos ao Quadrilátero, descritos pelos autores precedentes em ordem cronológica são os seguintes:

- A - Deposição, soterramento e diagênese de sedimentos ricos de Fe e SiO_2 . Formação de um pacote de sedimentos na "Bacia do Quadrilátero Ferrífero". A deposição dos sedimentos do Grupo Piracicaba seguiu-se a litificação dos sedimentos da bacia.
- B - Primeira fase de orogenia com deformação do pacote de sedimentos. Dobramento dos sedimentos da Série Minas. A estrutura e características litológicas das rochas nesta fase foram obliteradas parcial ou totalmente na fase seguinte de progenia.
- C - Deposição dos sedimentos da Série Itacolomi.
- D - Segunda Fase de orogenia com deformações intensas. Formação da hematita xistosa, itabirito e magnetita dispersa. Esta fase ocorreu com dobramentos intensos, deformações plásticas. Parte dos eventos seguintes podem ter ocorrido no fim desta fase.

Após estes fenômenos de traços regionais extensivos a todo o Quadrilátero, outros de caráter local ocorreram no Distrito de Itabira. Alguns dos eventos colocados em sequência cronológica foram penecontemporâneos. Estes eventos podem ser resumidos na

EVENTOS GEOLÓGICOS	PRODUTO	OBSERVAÇÕES
Intrusivas(2 ?) - Talco com algum quartzo.	Recristalização em "núcleos"	"Núcleos" de hematita com textura em mosaico. Formação de microfraturas.
	Recristalizações locais	Lentes, zonas, faixas de hema- tita compacta com textura em mosaico. Veios de magnetita pela ação de fluidos a alta tem- peratura.
Tectonismo de pequena ampli- tude.	Hematita fragmentada. Zonas de brechação.	Nas zonas de tectonismo não há talco.
Levantamento epirogenético.	Exposição e início de erosão da Formação Ferrífera.	Provável isolamento do Distrito de Itabira do Quadrilátero Ferrífero.
Abrandamento e alteração.	Hematita pulverulenta e ro- chas alteradas.	Com controle topográfico e estrutural. Martiti- zação da magnetita.
Laterização com endureci- mento superficial.	Canga e crostas lateríticas com enriquecimento super- ficial de fósforo.	Martitização da magnetita.
Degradação das crostas late- ríticas e canga	Lixiviação da hematita espe- cialmente do cimento da can- ga.	Erosão, mudanças do relevo, variação do nível hidrostático.

Figura 64

Figura 64, que para seguir a cronologia do texto, representa acima os fenômenos mais antigos.

Os resultados obtidos com os métodos de análises, descrição de testemunhos e observações de campo indicam a interdependência que existe entre o tipo de minério, o estágio de alteração e o teor de fósforo.

De acordo com o comportamento do elemento fósforo na alteração dos vários tipos de rochas e minério, ele é relacionado a três prováveis origens:

1 - Fósforo relacionado primariamente à sedimentação e que ocorre com teor constante e baixo no xisto Nova Lima e teor alto e irregular no filito Batatal. Estas duas rochas representam fatores e ambiente de sedimentação e metamorfismo diferentes, daí o comportamento e teor diferentes do elemento fósforo em cada uma delas.

A Formação Ferrífera, que contém também fósforo singenético, apresenta um teor médio de 0,03 por cento. Os termos que constituem a Formação Ferrífera contêm teores de fósforo diferentes, de acordo com o tipo de minério, e devem refletir processos primários de sedimentação envolvendo comportamento singenético diferente do elemento fósforo de acordo com o tipo de minério. Assim é que o itabirito duro, constituído predominantemente de quartzo e hematita apresenta teor de fósforo mais alto do que aquele do minério constituído essencialmente de hematita. Isto levando-se em conta que o itabirito e a hematita constituem um só pacote de minério que integra a Formação Ferrífera.

2 - Neste item foi colocado o fósforo contido na intrusiva fresca que corta concordante ou discordantemente a Formação Ferrífera. O teor de fósforo da intrusiva apresenta-se com valor igual àquêle da Formação Ferrífera, ou seja 0,02 por cento.

3 - O fósforo colocado neste grupo relaciona-se àquêle solubilizado das encaixantes, intrusiva e da Formação Ferrífera e concentrado por sucessivas precipitações na zona superficial e nas zonas de alteração e abrandamento das rochas e minérios.

Neste caso o fósforo refere-se aos fenômenos que atuam com mais frequência nos últimos estádios de alteração das rochas do Distrito de Itabira.

A decomposição e erosão das rochas e minérios na zona superficial levaram à concentração do elemento fósforo até uma certa profundidade que indica ser bastante variável com o tipo e estrutura da rocha. Este enriquecimento em geral fica circunscrito à zona de limonitização da canga e também às zonas de falhas ou fraturas, atingindo então profundidades maiores.

Os blocos de hematita compacta e xistosa cimentados na canga mantêm o baixo teor original da Formação Ferrífera.

O fósforo secundário ocorre em teores mais altos na hematita pulverulenta, na intrusiva alterada e na faixa próxima ao contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes. Mais especificamente, o fósforo ocorre na faixa de hematita mole, xisto e filito alterados. Esta distribuição do minério e do fósforo secundário indicam que soluções permearam a Formação Ferrífera ao longo de fraturas carreando fósforo da zona superficial para as mais profundas. Juntamente com o fósforo, o ferro enriqueceu-se. A sílica sofreu apenas remanejamento.

A fixação secundária do fósforo por reações de superfície pode, em termos gerais, ser enquadrada nos seguintes fenômenos:

a - Adsorção, que é a tendência do fósforo de concentrar na interface entre as fase líquida e sólida da rocha alterada pela ação de águas superficiais.

b - Troca de ânions, que é a substituição reversível de um ânion por outro, no caso íons de fosfato.

Estes fenômenos citados e outros mais complexos devem ser os responsáveis pelo enriquecimento do elemento fósforo no minério, encaixante e intrusiva.

O abrandamento de blocos de itabirito e hematita em alguns talus consolidados sugere que fatores secundários, mais especificamente águas vadasas, têm condições necessárias e suficientes para abrandar o minério na zona superficial. Isto não implica em afirmar que apenas soluções secundárias são responsáveis pelo abrandamento do minério. Muitas características de campo indicam ação de metassomatismo.

Em termos genéricos pode-se caracterizar quatro gerações de hematita, sendo apenas as duas primeiras representativas:

a - hematita xistosa proveniente dos sedimentos ricos de ferro, submetida a pelo menos duas orogenias distintas.

- b - hematita compacta recristalizada, formada pela recristalização da hematita xistosa, constituindo lentes, camadas ou faixas irregulares.
- c - hematita neoformada (B), que ocorre em bordos de cristais de martita e planos (111) de octaedros.
- d - hematita formada pela martitização da magnetita, constituindo cristais irregulares, de aspecto maculoso.

A estrutura xistosa e o fraturamento facilitam sobretudo o processo de abrandamento e solubilização do fósforo nas zonas centrais do sinclinal.

A estrutura em sinclinal é a chave para o entendimento da distribuição do minério brando e do fósforo secundário. As soluções foram canalizadas pelo sinclinal principal e os subsidiários migrando ao longo do contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes. O sinclinal do Cauê foi seccionado pela erosão em sua zona mais profunda, facilitando o fluxo e a fuga das soluções secundárias.

Os agentes de alteração e abrandamento agiram de cima para baixo, especialmente no contacto da Formação Ferrífera com as encaixantes.

O grau de oxidação do minério diminui com a profundidade. A oxidação inicia-se antes do abrandamento e prossegue lentamente, mesmo após o abrandamento total do minério.

A recristalização das massas maiores de hematita foi provocada por algum fator de caráter regional. O mineral talco deve ter se associado a este fator, provocando recristalização do minério no seu contacto imediato, local, ou então apenas participou passivamente das mudanças provocadas em caráter regional.

O tectonismo embora também seja um agente, parece ter sido ativo na recristalização do minério apenas em zonas locais.

BIBLIOGRAFIA

- BARBOSA, O. - 1954 - Évolution du Geosynclinal Espinhaço: Internat. Geol. Cong. 19th, Algiers 1952, Sec. 13, pt 2, ppp. 2-36.
- BASTIN, E.S. - 1950 - Interpretation of ore textures - The Geol. Soc. of Amer. Memoir 45.
- BLACK, C.A. - 1942 - Soil Scie. - Soc. Amer., Proc. 7, 123-133.
- CAMERON, E.N. - 1961 - Ore Microscopy - John Wiley and Sons, Inc. - New York, London, 293 p.
- CLARKE, F.W. - Data of Geochemistry - Bull. 770, U.S.G.S., 1924, pp. 523-534.
- COLEMAN, R. - 1944 - Soil Scie. - Soc. Amer. Proc. 9, pp. 72-78.
- CONWAY, E.J. - 1945 - Amer. Journ. Scie., 243, 583.
- DAVIS, L.E. - 1935 - Soil Scie., v. 40, 129-158.
- DEAN, L.A. - 1934 - Soil Scie., v. 37, pp. 253-266.
- DEAN, L.A. e RUBINS, E.J. - 1947 - Soil Scie., v. 63, pp. 377-387.
- DERBY, O.A. - 1910 - The iron ores of Brazil - The iron ores resources of the world, 11, Int. Geol. Cong. Stockolm, pp. 813-822.
- DORR, J.V.N. II - 1963 - Origin of high grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil - Econ. Geol., v. 58, n. 7.
- DORR, J.V.N. II - 1964 - Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil - Econ. Geol., v. 59, n. 7, pp. 1203-1240.
- DORR, J.V.N. II, GAIR, J.E., POMERENE, J.B. e RYNEARSON, G.A. - 1957 - Revisão da estratigrafia Pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil - Dept. Nac. Prod. Min., Divisão do Fomento - Avulso 81, 31 p. - Rio de Janeiro.
- DORR, J.V.N. II e BARBOSA, A.L. de M. - 1963 - Geology and ore deposits of the Itabira District Minas Gerais, Brazil - Geol. Survey Professional Paper 341-C-Washington.
- DUNN, J.A. - 1937 - The mineral deposits of Eastern Singhbhum and Surrounding areas - Mem. Geol. Surv. India, 69, 1.
- EICHLER, J. - 1967 - O enriquecimento residual e supergênico de itabirito através de intemperismos - Inst. de Geociências - Geologia - Bol. 1, Rio de Janeiro.
- EDWARDS, A.B. - 1954 - Textures of the ore minerals - Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Inc.).

- EFFENBERGER, C.H. - 1954 - Iron mining by the Cia. Vale do Rio Doce in the Itabira District, Minas Gerais, Brazil: Eng.Min. e Met., v.20, n.17, pp.129-133 - Rio de Janeiro.
- ESCHWEGE, W.L. von - 1833 - Pluto Brasiliensis - Collectanea de Scientistas Exrangeiros, publicada em 1922 - v.I - Belo Horizonte.
- FORD, M.C. - 1933 - Journ.Amer.Soc.Agron., 25, pp.134-143.
- FREYBERG, B.V. - 1934 - Die Bodenschätze des staates Minas Gerais, Brasilien - E.Schweizerbart'sche Verlag buchhandlung (Erwin Nägele) G.M.B.H. Stuttgart.
- GEIJER, P. - 1931 - Supergene martite - Econ.Geol., v.26, n.4.
- GERSHOIG, Y.G. - 1958 - The geochemistry of phosphorus in the Kri voi Rog Iron ore Formation - Geochemistry n.6, pp.741-751.
- GOLDICH, S.S. and BERGQUIST, H.R. - 1947 - Aluminous Lateritic Soil of the Sierra de Batoruco area, Dominican Republic, W.I.: U.S.G.S. Bull., 953 - C - pp. 53-84.
- GOLDICH, S.S. and BERGQUIST, H.R. - 1948 - Aluminous Lateritic Soil of the Republic of Haiti, W.I., U.S.G.S. - Bull., 954-C, pp. 63-109.
- GOLDSCHMIDT, V.M. - 1958 - Geochemistry - Oxford University Press,
- GRÜNER, J.W. - 1937 - Hydrothermal leaching of iron ores of the Lake superior Type - Modified Theory - Econ. Geol., v. 32, pp. 121-130.
- HALLIMOND, A.F. - 1925 - Iron ores: Bedded ores of England and Wales: Great Britain Spec.Rept.Min.Resources, Petrography and Chemistry, v.29.
- HARDER, E.C. and CHAMBERLIN, R.T. - 1915 - The Geology of Central Minas Gerais, Brazil - Jour.Geol., v.23, n.4 and 5.
- HENWOOD, W.J. - 1871 - Observations on metaliferpus deposits - Royal Geol.Soc.Cornwall, Trans., v.8, pt.1, Penzance.
- HERZ, N. and DUTRA, C.V. - 1958 - Preliminary spectrochemical age determination results on some granitic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - Soc.Bras.Geol., Bol. v.7, n.2, pp. 81-95.
- HOSE, H.L. - 1963 - Jamaica Type Bauxites developed on limestones - Econ.Geol., v.58, pp.62-69.
- HURLEY, P.M. and OTHERS - 1958 - Variation in isotopic abundances of Strontium calcium argon and related Topics - Massachusetts Inst.Technology - Dept.Geol.and Geophysys - Cambridge - pp.77-81.

- JAMES, H. L. - 1954 - Sedimentary facies of iron formations - Econ. Geol., v.49, n.3, pp.235-293.
- JAMES, H. L. - 1955 - Zones of regional metamorphism in the Precambrian of northern Michigan - Bull. G.S.A., v.66, n.12, part I.
- KELLY, J. B. and MIDGLEY, A. R. - 1943 - Soil Scie., v.55, pp.167-176.
- KORNILOV, N. A. and MITKEYEV, M. V. and GORDEYEVA - 1967 - Patterns of phosphorus distribution in siliceous iron formation of the Belozherka iron-ore field. Doklady of the Academy of Sciences U.S.S.R. - Earth Science Sections, v.176, pp.206-208.
- KROTOV, B. P. - 1940 - On the occurrence in the Khalilovo iron ore deposits (Urals, Russia) of magnetite formed from solutions of superficial origin at a low temperature - Acad. Sci., U.S.S.R., C.R. (Dokl.) v.26, n.8, pp.801-803.
- LEEP, H. - 1957 - Stages in the oxidation of magnetite - Amer. Miner., v.42, p.679.
- LEITH, C. K. and HARDER, E. C. - 1911 - Hematite ores of Brazil and a comparison with hematite ores of Lake Superior - Econ. Geol., v.6, pp.670-686.
- MANN, V. I. - 1953 - The relation of oxidation to the origin of soft iron ores of Michigan - Econ. Geol., v.48, pp.251-281.
- MILES, K. R. - 1941 - Magnetite-hematite relations in the banded iron-formations of Western Australia - Australasian Inst. Min. Metallurgy Proc. n.124.
- MUAN, A. - 1955 - Phase equilibria in the system $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ - Am. Inst. Mining Metal. and Petroleum Engineers - Trans., v.203, pp.965-976.
- MURPHY, H. F. - 1939 - Hilgardia 12, pp.343-382.
- OLIVEIRA, E. P. de - 1932 - Genesis of the deposits of auriferous Jacutinga - Econ. Geol., v.12, n.8, pp.744-749.
- PERCIVAL, F. G. - 1954 - Nature and occurrence of iron ore deposits, in Survey of world iron ore resources - United Nations N. Y.
- SANDERS, B. H. - 1933 - Iron ores at Itabira, Brazil - Inst. Min. and Metal., Bull. 396, pp.1-23.
- SCARSETH, G. D. - 1935 - J. Am. Soc. Agron., v.27, pp.596-616.
- SCHOUTEN, C. - 1962 - Determination tables for ore microscopy - Elsevier Publishing Company - Amsterdam, New York - 242 p.
- SCOTT, H. K. - 1902 - The gold field of the State of Minas Gerais, Brazil - Am. Inst. Min. Metal., Engineers Trans., v.33.

- SHORT, M.N. - 1940 - Microscopic determinations of the ore minerals
- Geological Survey - Bull., 914 - Washington - 314 p.
- SPIROFF, K. - 1938 - Magnetite crystals from meteoric solutions -
Econ. Geol., v. 33, pp. 818-828.
- STOUT, P.R. - 1939 - Soil Scie., - Soc. Am. Proc., 4, pp. 177-182.
- TAYLOR, J.H. - 1949 - Petrology of the Northampton sand ironstone
formation - Great Britain Geol. Survey Mem.
- TOTH, S.J. - 1937 - Soil Scie., v. 44, pp. 299-314.
- TYLER, S.A. - 1948 - Itabirite of Minas Gerais, Brazil - Journ. of
Sed. Petrol., v. 18, n. 2, pp. 86-87.
- TYLER, S.A. - 1949 - Development of Lake Superior Soft iron ores
from metamorphosed iron formation - Geol. Soc. Amer., Bull.,
v. 60, pp. 1101-1124.
- TWENHOFEL, L.H. - 1927 - Changes in the oxidation of iron magne-
tite - Econ. Geol., v. 22, n. 2, pp. 180-188.
- UYTENBOGAARDT, W. - 1951 - Tables for microscopic identification
of ore minerals - Princeton University Press, 242 p.
- VOGT, L. - 1931 - Skr. Norske Vid - Akad. Oslo, i Math - Nat. Kl. n. 7.
- WEISER, V. L. - 1933 - Vt. Agr. Expt. Sta. Bull. 356.
- WHITEHEAD, G. and DORR, J.V.N. II - 1950 - Ores and mining in the
Itabira iron ore district, Brazil - Econ. Geol., v. 45, pp. 389-390.