

Geologia e Caracterização Tecnológica do Minério de Manganês da Mina Córrego do Cocho, Itapira (SP)

Geological and Technological Characterization of the Manganese ore Deposits of the Córrego do Cocho Mine, Itapira (SP)

Nelson Angeli¹(nangeli@rc.unesp.br), Henrique Khan²(lct@poli.usp.br),
Gabriel Mineo Ito¹(gabrielm_ito@hotmail.com), Sebastião Gomes de Carvalho¹,
Jairo Roberto Jimenez-Rueda¹, Ulisses Cyrino Penha³

¹Departamento de Petrologia e Metalogenia - IGCE - UNESP
Av. 24-A 1.515, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, BR

²Laboratório de Caracterização Tecnológica - Escola Politécnica - USP, São Paulo, SP, BR

³Anglo AshanthiGold S.A., Nova Lima, MG, BR

Recebido em 02 de junho de 2010; aceito em 04 de outubro de 2011

RESUMO

Três jazimentos de manganês e uma mina geneticamente resultantes da lateritização de gonditos (espessartita quartzitos) foram pesquisados. Estas concentrações encontram-se hospedadas em metassedimentos do Grupo Itapira (Paleoproterozoico) e apresentam recursos em torno de $2,0 \times 10^6$ Mt, com teor médio de 23% MnO_2 . Os principais minerais de minério são constituídos por criptomelana, pirolusita, litioforita, espessartita e psilomelana. O minério apresenta arranjos texturais dos mais variados, bem como se concentra em distintas frações granulométricas, quando beneficiado e concentrado. O estudo permitiu definir variadas formas no contorno dos grãos associados a distintos arranjos texturais e, a associação do grau de liberação do minério aos mesmos. Empregaram-se ensaios por separação em líquido denso a fim de caracterizar o minério e seu grau de liberação, posto que a fração granulométrica mais fina, (0,074 a 0,84 mm) era perdida no processo de beneficiamento. Assim, o teor médio muito baixo no concentrado (28% MnO_2) se devia à perda para esta fração granulométrica (-0,074 mm), que contém teor elevado, próximo de 40% MnO_2 . Isto indica que seu emprego é adequado apenas para produção de fertilizantes (sulfato de manganês). Estudo comparativo com outras jazidas, principalmente a Mina de Caneleiras, em Ouro Fino (MG), indicou que o maior grau de liberação ocorre associado à granulação mais grossa (0,84 a 0,074 mm com teor de 38% em MnO_2), que permite seu emprego na indústria de ligas Fe-Si-Mn.

Palavras-chave: Depósitos de manganês; Gonditos; Grupo Itapira; Grau de liberação; Tecnologia mineral; Sulfatos de manganês.

ABSTRACT

The objects of this study are three manganese ore deposits and one mine derived from lateritic weathering of gondites (spessartine quartzites). These deposits are associated with Mn-rich garnet metasediments of the Itapira Group (Paleoproterozoic) and the reserves were estimated at approximately 2.0×10^6 tons with an average grade of 23% MnO_2 . The ore minerals are cryptomelane, pyrolusite, lithiophorite, spessartine and psilomelane. Several crystal shapes and textural characteristics were identified in this study, which are related to the degree of liberation, as confirmed by heavy media separation method. In this study, we determined the main characteristics of the liberation of manganese, which is concentrated in the fine grain-size fraction and is lost during ore dressing. Therefore, the low average content of MnO_2 (28%) is due to this loss, whereas at grain size of minus 0.074 mm, contents near 40% MnO_2 were observed. This suggests that the ore can be used for manufacturing manganese sulphate fertilizers. A comparative study with the ore deposits located at Ouro Fino (MG), mainly with the Caneleiras mine, showed that higher degree of liberation occurs in the coarse grain-size fractions (0.84 to 0.074 mm with MnO_2 content of 38%). As a consequence, the ore can be used for manufacturing Fe-Si-Mn alloys.

Keywords: Manganese ore; Gondites; Itapira Group; Degree of liberation; Mineral technology; Manganese sulphates.

INTRODUÇÃO

A mina Córrego do Cocho, com Decreto de Lavra pertencente à Mineração Itapira Ltda (MIL) teve sua lavra iniciada no início dos anos 90, e localiza-se no sudeste do município de Itapira (SP), cerca de 150 km de São Paulo (Figura 1). A região estudada está inserida no Orógeno Ribeira, Segmento Central da Província Mantiqueira, que apresenta um *trend* NE-SW com empilhamento tectônico com sentido oeste rumo ao Cráton São Francisco. Os litotipos presentes exibem deformação principal caracterizada por colisão frontal e componente transpressiva dextral (Figura 2). As zonas de cisalhamento transpressivo e os empurrões limitam domínios tectônicos que compartimentam a Faixa de Dobramentos Ribeira.

São reconhecidas, regionalmente, duas unidades litoestratigráficas principais: Grupo Amparo, constituído essencialmente por gnaisses e gnaisses migmatíticos de idade paleoproterozoica a arqueana, e o Grupo Itapira, composto por rochas metassedimentares originadas por sedimentos plataformais rasos progradantes. Associado às litologias desse Grupo aflora, regionalmente, mais de uma dezena de corpos gondíticos, que apresentam em maior ou menor grau, clássicos perfis de alteração intempérica com enriquecimento em óxidos e hidróxidos de manganês (Figura 3).

Todos os corpos gondíticos da faixa Socorro (SP)-Careaçu (MG) são recobertos por maiores ou menores quantidades de óxidos de ferro (principalmente goethita), pi-sólitos e oólitos de manganês (com pequeno conteúdo em ferro, próximo à superfície) e de minério maciço, portando maior ou menor grau de enriquecimento em manganês. O manto de intemperismo é geralmente pouco profundo (em média 10 m), distinguindo-se zonas com predomínio de rolados mineralizados, em meio a porções bastante enriquecidas em MnO_2 , já próximas do contato com o protominério em profundidade. Nesse contexto, a mina do Córrego do Cocho (Figura 4), objeto da presente pesquisa representa, entre todas as ocorrências conhecidas, o principal corpo gondítico em tonelagem de minério atualmente explorado na referida faixa, à exceção dos corpos entre Jacutinga e Ouro Fino (MG), os quais também foram parcialmente pesquisados, com destaque para a Mina de Caneleiras. A Mineração Itapira Ltda (MIL) executa a lavra através de carregadeira e caminhões que levam o minério até a praça de beneficiamento. Daí ocorre homogeneização e lavagem por meio de “jigs” e finalmente cominuição do material para posterior concentração.

O manganês é um metal que possui ampla aplicação, sendo utilizado, principalmente na indústria do aço. Além disso, é componente essencial na fabricação de ligas de aços especiais, e participa na produção de reagentes químicos, manganês eletrolítico, cerâmica e de fertilizantes para

a correção de solos e aspersão de fungicidas na agricultura (Rezende e Da Silva Sá, 1984). Entretanto cuidados em sua aplicação devem ser tomados, principalmente relacionados à sua toxicidade, posto que ocorre em solos que originariamente não necessitam deste nutriente (e.g., latossolos basálticos). Borkert et al. (1984) constataram que solos deficientes em manganês apresentam concentrações menores que 50 mg/kg para o caso de plantações de soja. Azevedo (2007) também aponta o caso de citros no estado de São Paulo, que se relacionam a elevadas taxas de pH (6,7 - 6,8). Vale lembrar que o Mn^{2+} tem maior importância em soluções ácidas. A relação Fe/Mn nos solos é fator determinante para se definir a toxicidade do manganês, e quanto mais elevada for, menor será sua sensibilidade na lavoura.

O sulfato manganoso ($MnSO_4$) deve apresentar valores mínimos em torno de 28% de Mn solúvel em água, garantindo assim as normas exigidas pelo Ministério da Agricultura, como concentrações adequadas para seu emprego como micronutrientes em adubos (The Fertilizer Institute, 1976). Desta forma o produto deve apresentar 15% de S, e deverá ser solúvel em água sob a forma de $MnSO_4 \cdot H_2O$, onde sua produção se dá a partir da reação entre o MnO e o H_2SO_4 .

METODOLOGIA

Análises granulométricas e texturais do minério foram realizadas para definir o grau de liberação dos minerais de minério, e determinar a melhor fração granulométrica para o beneficiamento. Os procedimentos experimentais envolveram as seguintes atividades: **A**) análises mineralógicas por microscopia óptica (luz transmitida e refletida) e por difração de raios X nas amostras coletadas na frente de lavra (Cava A) da mina Córrego do Cocho; **B**) amostragem por pilha alongada; **C**) homogeneização das amostras, seguida de britagem; **D**) retirada de alíquota da ordem de 5 kg do produto britado; **E**) moagem com o emprego de moinho de rolos a menos 20 malhas Tyler (0,84 mm) em circuito fechado com peneiramento; **F**) análises granulométricas através de peneiramento a úmido; **G**) separações minerais por líquido denso (TBE-Tetra Bromo Etano, 2,95 g/cm³), seguidas de análises químicas dos produtos obtidos, e **H**) determinação da composição mineralógica, com identificação e estimativa das proporções minerais, e avaliação do grau de liberação dos minerais de manganês. Durante todo o processo foi adotada a malha de cominuição de 20 mesh.

ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

Os litotipos predominantes na área (Figura 3) pertencem ao Grupo Itapira, atualmente entendido como de idade neoproterozoica, e composto predominantemente por

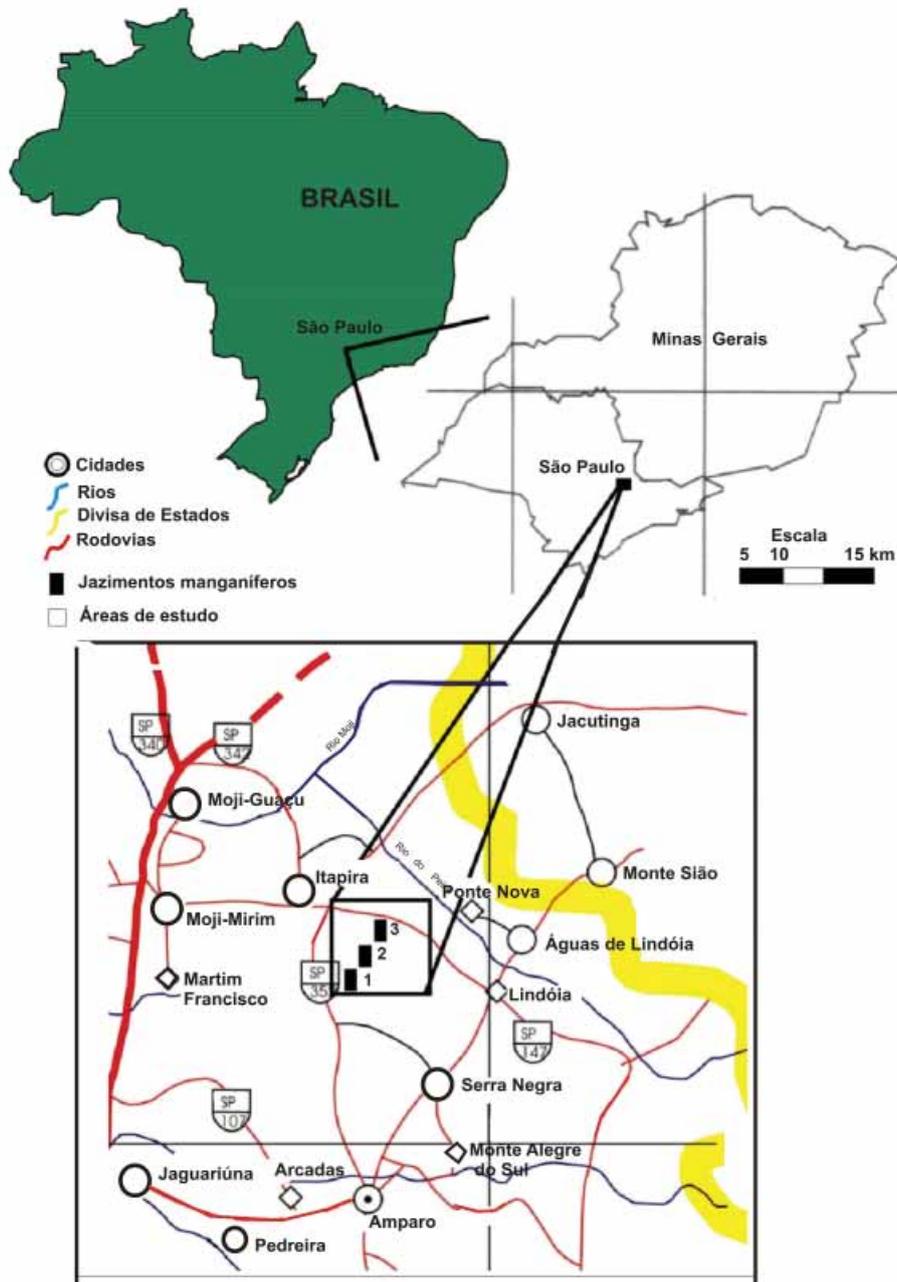


Figura 1. Localização da área pesquisada (modificado de DER, 2011), onde se destacam: a mina Córrego do Cocho (1), o depósito do Morro das Palmeiras (2), além da mina abandonada do Soares (3).

muscovita quartzitos e paragnaisses, e com menor frequência migmatitos, anfíbolitos, rochas cálcio-silicatadas, xistos, rochas metaultramáficas, mármore, metassedimentos da Formação Eleutério e lentes de gonditos (Zanardo, 2003, informação verbal). O embasamento

cristalino é representado pelo Grupo Amparo (Proterozoico Inferior-Arqueano), onde predominam ortognaisses e migmatitos, que correspondem a rochas da infracrosta, sendo que ambos os grupos acham-se intrudidos pelos maciços graníticos que compõem o Grupo Pinhal

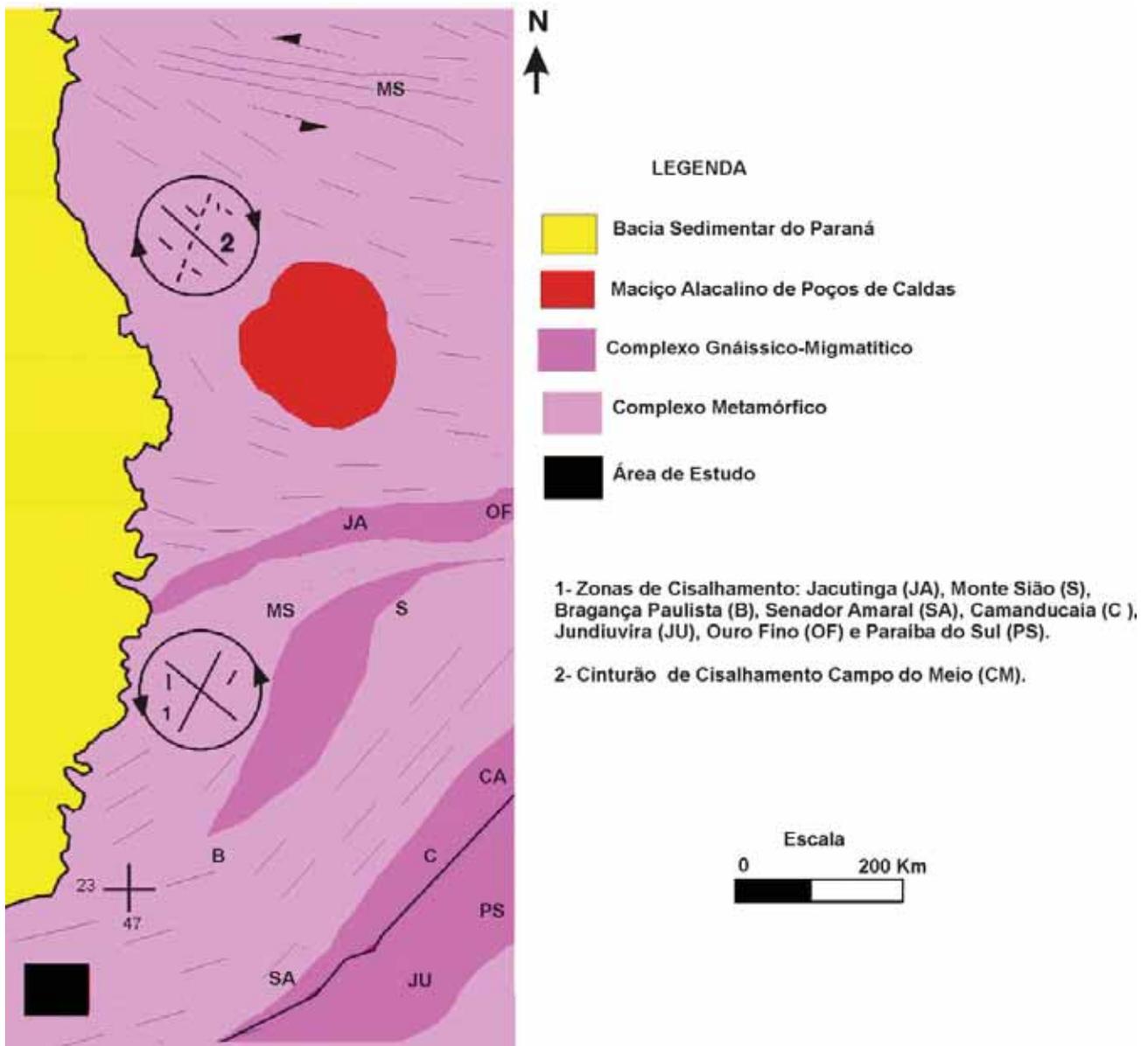


Figura 2. Padrão estrutural, determinado pelo comportamento e reologia das unidades litológicas e sentido de rotação das zonas de cisalhamento (Obtido de: Hasui et al., 1988). A área estudada encontra-se na Zona de Cisalhamento Bragança Paulista-Monte Sião.

(Brasiliano), em grande parte gnaissificado, na porção oeste da área pesquisada incluído atualmente como Unidade do Complexo Guaxupé.

A região mostra uma evolução polimetamórfica clássica, onde primeiramente ocorreu sedimentação de rochas predominantemente clásticas impuras, acompanhada da intrusão de rochas básicas, e extrusão de lavas e tufos básicos (Wernick, 1967). Esse pacote foi metamorfoisado, gerando associação gnáissico-migmatítica, de fácies anfíbolito e

granulito (Complexo Amparo, presentemente Grupo Amparo). Em seguida, ocorreu nova deformação tectônica no ciclo Brasileiro (Neoproterozoico), acompanhada da recristalização e intrusão de grandes massas graníticas, que provocaram nova migmatização do Grupo Amparo (Wernick, 1978). Esta última unidade corresponde, no mapa geológico (Figura 3), ao Grupo Pinhal (Complexo de Guaxupé). Além das deformações plásticas, grandes falhas transcorrentes, representadas pelas zonas de cisalhamento

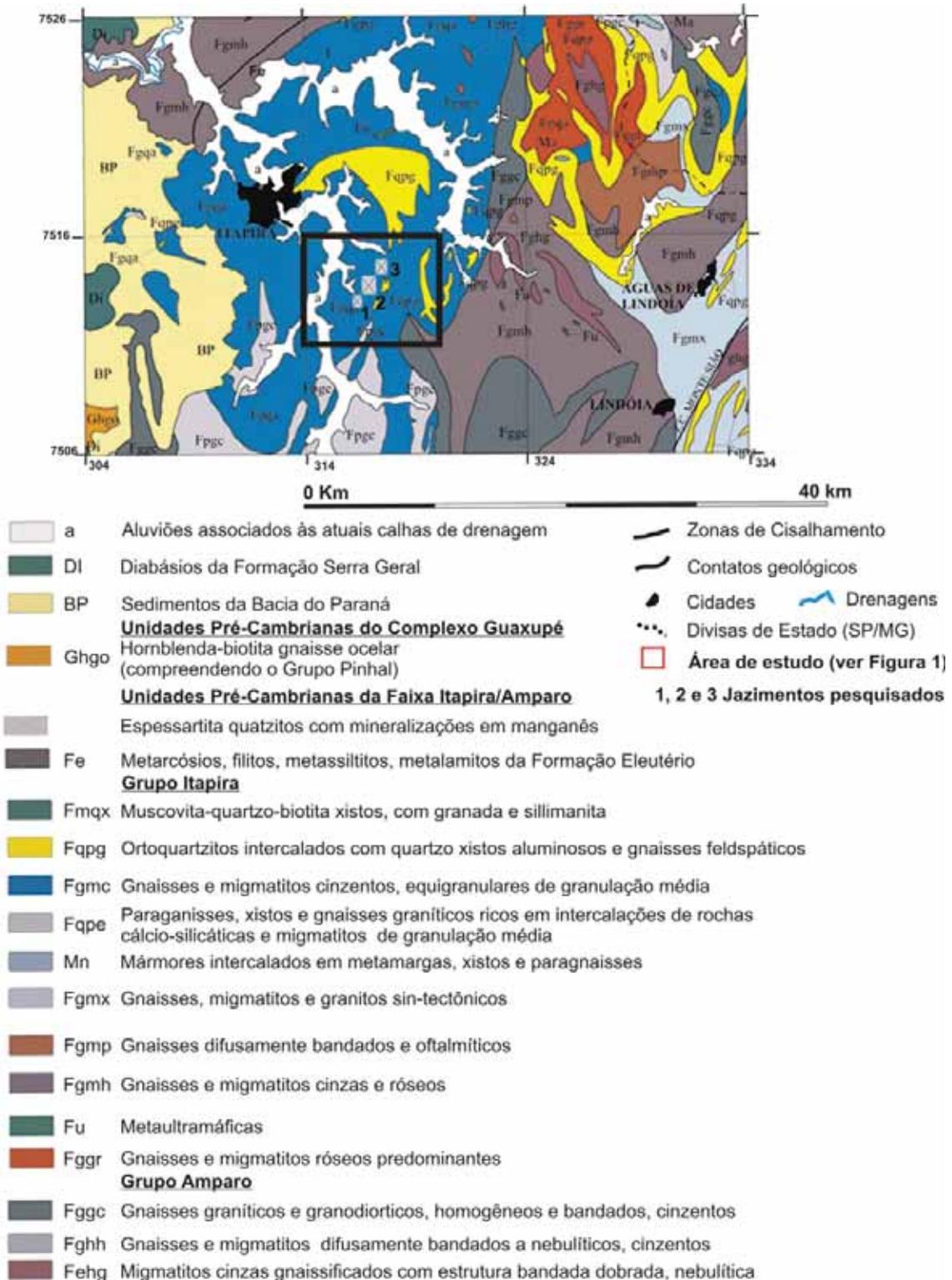


Figura 3. Mapa geológico regional com localização da área alvo da pesquisa, onde estão inseridos os três corpos estudados, quais sejam: mina Córrego do Cocho, depósito Morro das Palmeiras e mina abandonada do Soares (modificado de Zanardo, 2003). 1. Mina Córrego do Cocho. 2. Ocorrência Morro das Palmeiras. 3. Mina abandonada do Soares. Todas no interior do Grupo Itapira.

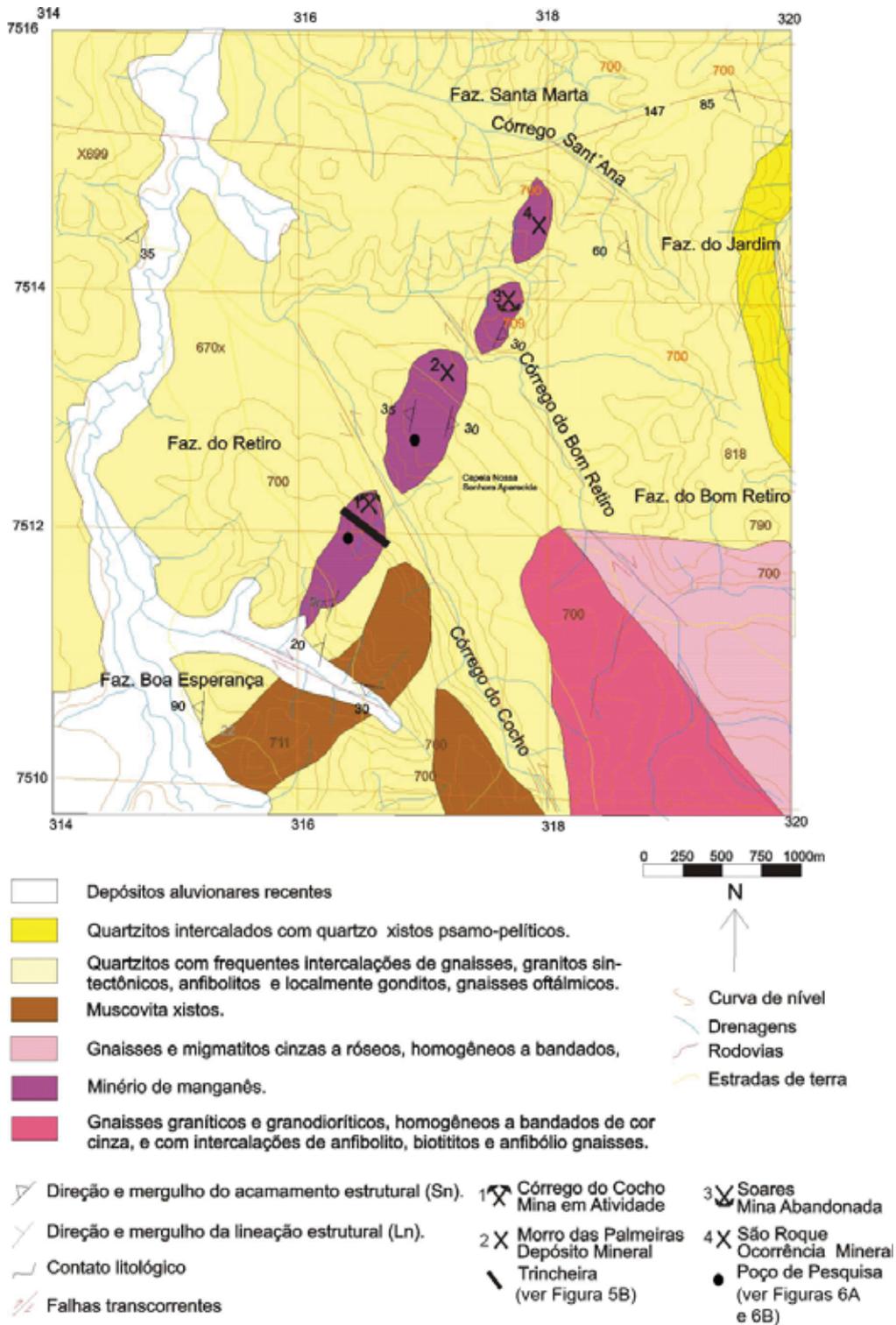


Figura 4. Mapa geológico da região de Itapira, com localização dos três corpos estudados, obtido nesta pesquisa. O corpo de minério com maiores reservas (Córrego do Cocho) e, é apresentado na Figura 6, trincheira e seção esquemática de um dos poços de pesquisa aberto. Nesta mesma Figura é apresentada seção esquemática de um dos poços de pesquisa do Morro das Palmeiras.

de Jacutinga e Inconfidentes, geraram nessa região domínios com zonas deformacionais mais tardias.

O Grupo Amparo foi considerado inicialmente como uma sequência predominantemente parametamórfica de médio a alto grau, caracterizada por duas unidades principais: a primeira, gnáissica, com intercalações frequentes de gnaisses quartzosos, quartzitos, rochas cálcio-silicáticas, mica xistos e anfibólitos, e a segunda, migmatítica, seguindo um *trend* estrutural NE-SW, entre as cidades de Itapira, Lindoia e Amparo, contendo intercalações de natureza máfica e ultramáfica. Segundo Wernick (1967), o grande anticlinal de Amparo seria constituído apenas por uma sequência metassedimentar representada por gnaisses, chamados de “Gnaisses Amparo”, quartzitos, mica xistos e rochas cálcio-silicáticas representando intercalações concordantes e mostrando contatos transicionais com os paragnaisses, sendo estes correspondentes ao Grupo Itapira. Desta maneira todo o pacote metamórfico corresponderia a um único ciclo orogênico. Ebert (1984) distinguiu na região de Itapira/Águas de Lindoia uma discordância separando uma sequência de quartzitos, metarcósios, micaxistos, meta-grauvacas e mármore dos “Gnaisses Amparo” mais antigos, denominando a unidade superior de Grupo Itapira.

No final do Ciclo Brasileiro, sedimentos molassóides foram depositados em bacias tectônicas, apresentando-se deformados e fracamente metamorfisados, caso das Formações Eleutério e Pouso Alegre (porção norte-noroeste da área pesquisada - Figura 3). Durante o Fanerozoico, a região foi continuamente afetada por movimentações do sistema de *rifts* da Serra do Mar, ocorrendo reativação de lineamentos estruturais pré-cambrianos. No Cenozoico, a epirogênese positiva da área continuou, controlando assim os processos geomorfológicos e a implantação dos depósitos cenozoicos da região.

O Grupo Itapira, encaixante dos corpos mineralizados, é interpretado como uma sequência metavulcano-sedimentar proterozoica com granitoides sin-tectônicos associados e subdivididos em duas unidades distintas: uma sequência inferior constituída por pelitos, grauvacas, arcósios, intercalados por sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos, pelito aluminosos, margas, formações ferríferas bandadas e sedimentos manganíferos (Oliveira et al., 1998; Lazarni, 2000; Zanardo, 2003). A sequência do topo é composta por pelitos, pelitos psamíticos, pelitos aluminosos, margas, calcários, mármore e sedimentos manganíferos, passando para um pacote psamítico e psamo-pelítico. Toda a sequência metassedimentar, correspondente ao Grupo Itapira, sofreu deformação e metamorfismo gerando corpos lenticulares, concordantes, preservados em grandes calhas sinformais ou embutidos em gnaisses. Segundo Heilbron et al. (2004) o Grupo Itapira é correlacionável com a Megassequência Andrelândia. As rochas metassedimentares

do Grupo Itapira, diretamente associadas aos gonditos, representam litologias metamórficas geradas a partir de uma sequência plataformal progradante, constituída por muscovita xisto, talco xisto, muscovita quartzito, quartzito, com intercalações de rochas máficas/ultramáficas, que tem como embasamento as rochas migmatíticas e gnáissicas do Grupo Amparo. Análises geoquímicas realizadas por Veríssimo (1991) sugerem, para a formação do protominério manganífero, um ambiente tectônico ativo com transporte rápido de sedimentos imaturos com contribuição vulcânica.

A estruturação principal da região de ocorrência do Grupo Itapira é caracterizada por bandamento sedimentar (preservado), xistividade, feições de transposição e lenticularização resultantes de processos de imbricamento tectônico regional (Hasui et al., 1988). A foliação apresenta orientação geral N15E 75SE e E-W 20S, com mergulhos médios a elevados predominantemente para NNW e SSE na porção mais oriental, e NW e SE na porção mais ocidental (Figura 2). As rochas possuem uma associação mineral compatível com a fácies xisto verde (médio-alto) atingindo até anfibólito médio, sendo representada pela seguinte assembleia mineralógica: hornblenda+enstatita+diopsídio+Ca plagioclásio+antofilita, corroborando com observações de outros autores, onde os processos deformacionais foram acompanhados de metamorfismo regional de médio a alto grau e migmatização por injeção de material granítico, chegando a processos de anatexia.

DEPÓSITOS SUPÉRGENOS DE MANGANÊS

A associação mineral encontrada no protominério manganífero em Itapira e Ouro Fino, segundo Angeli et al. (1984), não permite a classificação do protominério como gondito clássico, conforme definido por Fermor (1909), Roy e Mitra (1964) e Roy (1968), onde gonditos são sedimentos manganíferos, em ambiente marinho com manganês livre, regionalmente metamorfizados, não carbonáticos, pelíticos a psamo-pelíticos, que possuem quartzo e espessartita como minerais essenciais. Entretanto, devem estar presentes na rocha: Ca rodonita; Mn diopsídio; blanfordita (série do diopsídio-acmita, portando Mn); tefroíta; richterita; tremolita e glaucofana e, com menor conteúdo, apatita, plagioclásio, dolomita e microclínio. A estrutura da litioforita foi estudada em detalhe neste minério, constatando-se sua nítida relação com a gibbsita.

Segundo Chukhrov et al. (1985), na ausência de Mn⁴⁺, forma-se Al-OH que, com alteração intempélica, permite a formação de gibbsita. Quanto maior a quantidade de óxidos de manganês, maior será a de litioforita formada, tal qual se observa em Itapira, e com menor frequência em Jacutinga e Ouro Fino. Na Serra do Navio (AP), Valarelli (1975) também encontrou litioforita associada ao minério,

possivelmente a melhor descrição feita no Brasil, e com modelo genético similar.

Para deposição de manganês em bacias associadas a atividades marinhas (minério diagenético), Borchert (1970) descarta a possibilidade de concentração de MnO_2 por hidrotermalismo, próximo das cadeias meso-oceânicas. Observa que concentrações minerais associadas à alteração exógena de gonditos, se relacionam a antigas porções plataformas, associadas a metamorfismo meso/catazonal, expostas no Cenozoico. Segundo este autor, mesmo no Pré-cambriano, soluções ricas em ácidos húmicos são importantes para que ocorra ambiente propício para separação entre o Mn e o Fe. Para tanto, a atuação de ácidos carbônicos reduzem $Fe^{2+}(HCO_3)_2$ e $Mn^{2+}(HCO_3)_2$ (mais solúvel) e permite a concentração de ambos a diferentes distâncias do continente (Mn tem maior mobilidade). Daí, o Mn se oxida, com Mn^{3+} passando para Mn^{4+} , formando MnO_2 . A partir daí um complexo de minerais de manganês associados ao quartzo se forma, dando origem ao protominério gondítico.

Os processos genéticos de enriquecimento supérgeno do protominério de manganês são considerados como de idade Terciário Inferior (Eoceno-Mioceno), relacionados com a formação da Superfície Sul-Americana. Sua origem é atribuída às variações climáticas e reativações tectônicas (morfotectônicas) conforme proposto por King (1956). Através de datações K/Ar e $^{40}Ar/^{39}Ar$ a lateritização do protominério ocorreu no Terciário, com idade situada entre 52 e 7 Ma, o que é confirmado pelo estudo de depósitos similares na Austrália, realizados por Dammer, McDougall e Chivas (1999), mas já anteriormente sugerida por King (1956) na porção oriental do Brasil.

OS CORPOS DE MINÉRIO

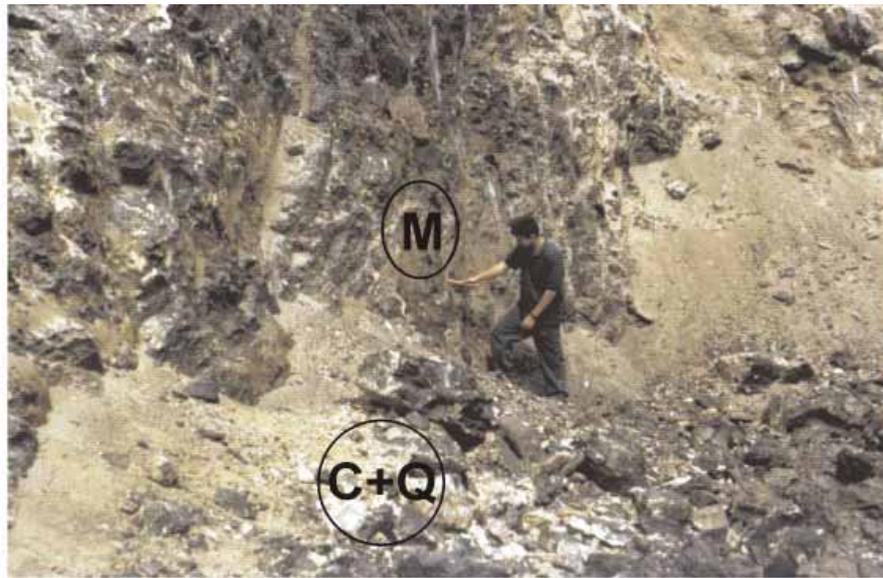
Os protominérios de manganês são de dois tipos genéticos: protominério silicático, composto essencialmente por quartzo e espessartita em proporções aproximadamente similares, e protominério cálcio-silicático, onde além de quartzo e espessartita, se tem piroxênios, anfibólios, plagioclásio, carbonatos e epidoto. Na área da jazida domina o protominério silicático que foi deformado, estirado e rompido por *boudinage*, como descrito por Choudhuri, Angeli e Jimenez-Rueda (1984), e dispõe-se segundo dois *trends* estruturais distintos NW-SE e NE-SW. Esse aspecto, marcante dos corpos de protominério com estruturação em *boudins* alongados acompanhando zonas de cisalhamento já foi observado anteriormente por Pires, Leonardos Jr. e Parenti Couto (1970), Wernick, Fernandes e Almeida Jr. (1976), Angeli et al. (1984), Choudhuri, Angeli e Jimenez-Rueda (1984) e Zanardo (1987).

Na região de Itapira foram estudados quatro corpos gondíticos: Córrego do Cocho (mina), Morro das Palmeiras

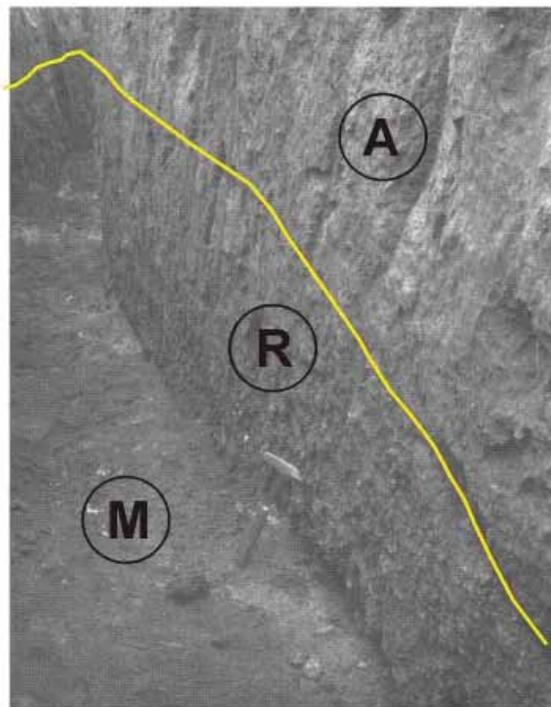
(depósito), Soares (mina paralisada) e São Roque (ocorrência) - (Figura 4). Em Ouro Fino, apenas a mina Caneleiras foi pesquisada. Todos eles encontram-se embutidos em paragnaisses e espessartita quartzitos, sob forma de lentes alinhadas e segmentadas na direção NE, correspondendo a uma única camada estirada e rompida por processo de *boudinage*. Localmente, os gnaisses possuem bandas leucocráticas, granulação grossa, quartzo feldspáticas e bandas melanocráticas, menos espessas, ricas em biotita, além de níveis anfibolíticos, apresentando fraturas preenchidas por óxidos e hidróxidos de manganês. Nas frentes de lavra, o minério explotado ocorre sob duas formas principais: oxidada (na forma de oólitos, pisólitos e concreções), os quais ocorrem próximos da superfície (espessura média de 1,80 m) e como minério coluvionar.

De modo geral, os principais minerais de minério nessas concentrações manganíferas são dominados por óxidos e hidróxidos de manganês, espessartita e quartzo, embora carbonatos, silicatos, sulfetos, fosfatos de manganês também estejam presentes como traços. Localmente, ocorre feldspato potássico, grafita, clinofanfólios manganíferos da série cummingtonita/grunerita, clinopiroxênios (salita/johannsenita), plagioclásio, e mais raramente escapolita e piroxangita. Angeli et al. (1984) haviam ainda identificado outras fases minerais no minério, tais como: litioforita, criptomelana, pirolusita, hausmannita, manganita e hollandita, além de nsutita, gahnita, jacobsita, yofortierita, psilomelana (venular), woodruffita e todorokita. No minério, são comuns estruturas: maciça, bandada e manchada (Figura 5). Duas seções dos poços de pesquisas executados são apresentadas na Figura 6.

Completando a associação mineralógica do minério observa-se a presença de nontronita, caulinita, gibbsita, hematita, goethita e hidrogoethita, como minerais de ganga (Angeli et al., 1984; Choudhuri, Angeli e Jimenez-Rueda, 1984). À exceção desta última assembleia, os demais minerais são similares aos que ocorrem, por exemplo, em depósitos supérgenos chineses que Fan e Yang (1999) classificaram em diferentes tipos genéticos através de sua composição mineralógica. A espessartita é o mineral mais abundante, alcançando percentuais de até 20%. Os cristais apresentam-se deformados, alterados nas bordas (Figuras 8E e 8I), suportados por uma matriz rica em criptomelana, que ainda conserva a foliação do protominério. Criptomelana ocorre como cristais amorfos, mas conservando em algumas porções sua origem claramente relacionada à alteração supergênica da espessartita. Em escala macroscópica, o minério apresenta estruturas botrioidais, bandadas, manchadas e intergrãos junto à espessartita e quartzo. Em geral, apresenta certo bandamento composicional com leitões milimétricos a centimétricos de quartzo e criptomelana (30% a 50%) exibindo vários tons de cinza, desde cinzento escuro



A



B



C

Figura 5. Detalhes da mina Córrego do Cocho. **A.** Vista geral da frente de lavra Nº 1. Pode-se observar que o minério é mais impuro, onde se tem nas porções cinzas (óxidos e hidróxidos de manganês predominantes) e castanhas (com predominância de espessartita e litioforita) com concentrações em torno de 30% de MnO_2 . As porções mais claras correspondem à sílica amorfa e secundariamente caolinita. **B.** Detalhe da trincheira aberta para pesquisa no corpo de minério, onde se pode observar a linha amarela separando o solo laterítico com baixa concentração de oólitos de manganês (presença de goethita) do minério pisolítico (teores que atingem até 19% em MnO_2). No piso o minério maciço. **C.** Detalhe do minério maciço com porções apresentando textura manchada (corpo Morro das Palmeiras), onde as porções cinzas correspondem à criptomelana e as cinza-azuladas a concentrações de pirolusita. As manchas esbranquiçadas relacionam-se à concentração de sílica residual, e em menor proporção caulinita e gibbsita (piso do poço aberto na ocorrência Morro das Palmeiras).

Poços de Pesquisa

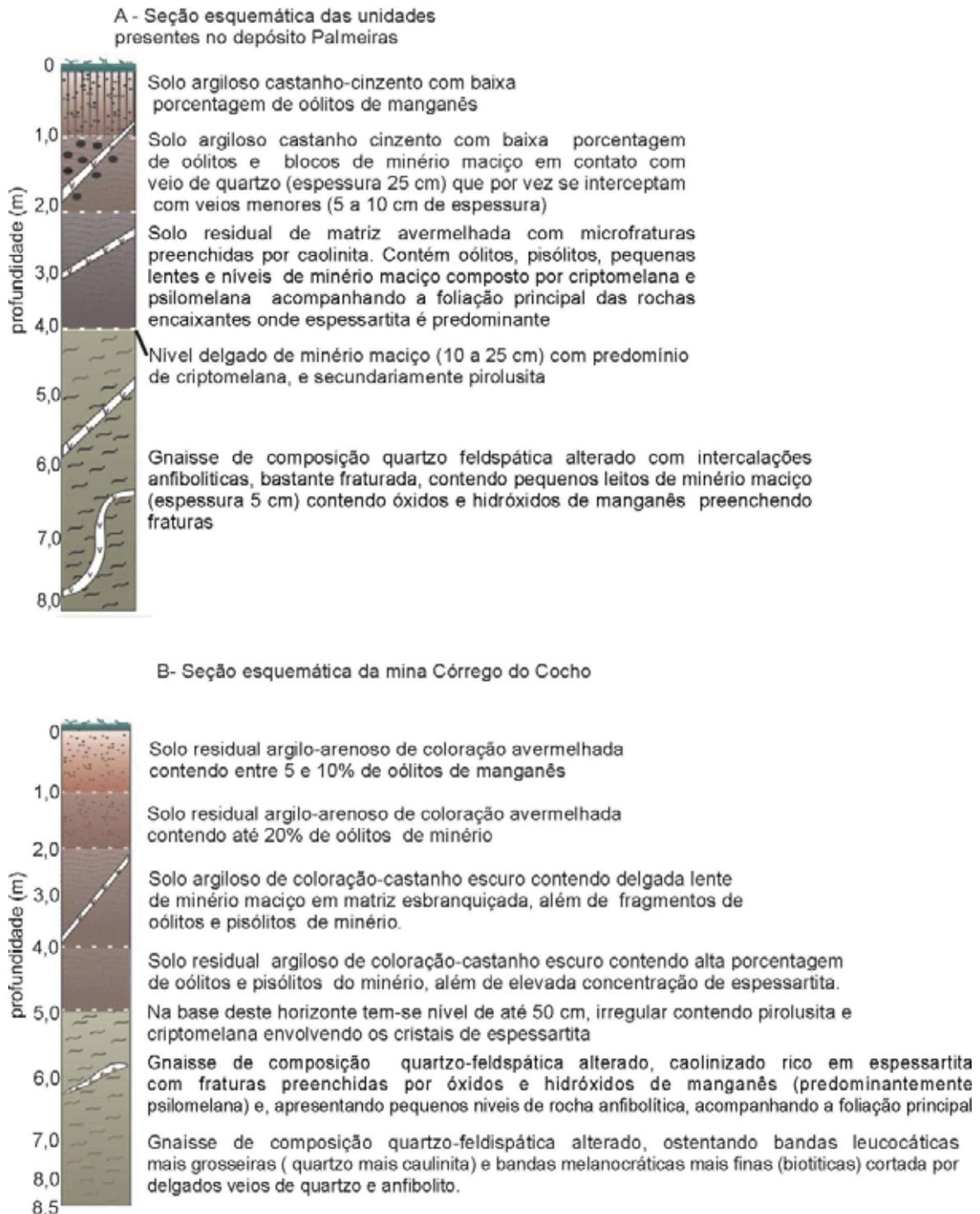


Figura 6. Seções da zona mineralizada descritas em dois poços de pesquisa com as respectivas variações estruturais e mineralógicas presentes no minério da mina Córrego do Cocho e do depósito Morro das Palmeiras (Choudhuri et al., 1984). 6A. M = minério maciço e QC = material quartzo-caolinítico. 6B. A = solo argiloso, R = minério rolado e M = minério maciço. 6C. Blocos de minério maciço associados a minério rolado. Para localização, observar Figura 4.

a claro, sendo os cristais de granulação grossa. Em lâminas e seções polidas o minério de manganês da mina Córrego do Cocho apresenta textura granoblástica, constituído por criptomelana, como cristais granulares, e litioforita, como cristais prismáticos (Figura 8B e 8H). Ribeiro Filho, Angeli e De Souza (1990) observaram que a litioforita ocorre sempre associada a cristais xenomórficos de espessartita e, quando alterada, formam óxidos do grupo $\alpha\text{-MnO}_2$, criptomelana ou hollandita (Figura 7).

Nas porções superiores dos perfis de alteração ocorrem, com certa frequência, cristais euhedrais de magnetita, titanomagnetita subhedrais (Figura 8A), além de hematita e ilmenita (Figuras 8A, F e J), que chegam a representar até 4% dos minerais presentes. Delgados veios de pirita, calcopirita e bornita (Figura 8G), indicam localmente ambiente redutor (hidrotermalismo/metamorfismo regional), além da presença de pequenos cristais reliquiais de sericita e

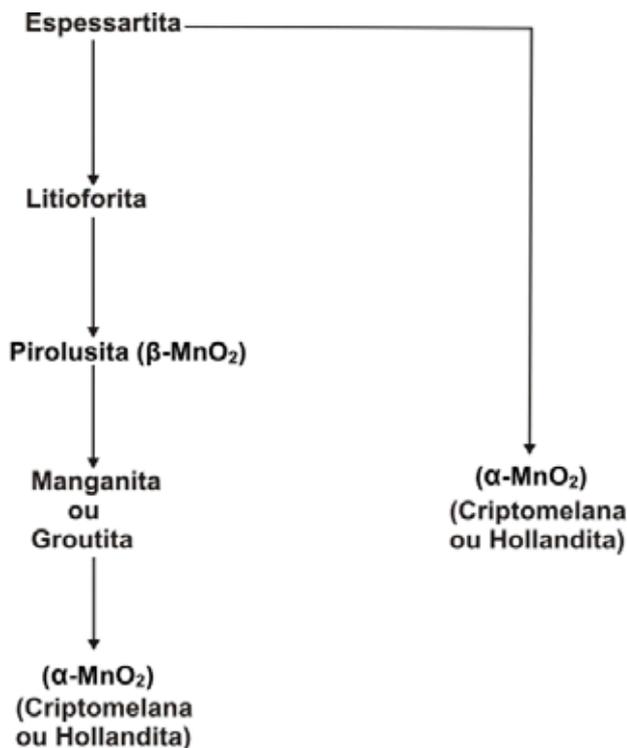


Figura 7. Sequência de formação dos minerais de manganês no ambiente supergênico (minas Córrego do Cocho e Caneleiras), mostrando que a espessartita é mineral o portador de MnO_2 para a geração da associação mineral secundária que compõem o minério. A sucessão completa da alteração intempérica atinge até as fases minerais do grupo $\alpha\text{-MnO}_2$, principalmente criptomelana, com pequena participação de hollandita.

epidoto. Estes se encontram presentemente preservados na matriz composta por criptomelana, pirolusita e psilomelana (Figura 8A e 8G). Cristais aciculares a tabulares e fortemente anisótipos de grafita, dispersos em todas as seções analisadas, ocorrem com frequência, perfazendo percentagens de no máximo 5%.

A psilomelana ocorre sob forma de cristais cinzentos, semiarredondados, com forte anisotropia e, com maior frequência, próxima da superfície junto à criptomelana, tanto na própria matriz, notadamente sob forma de vênulas milimétricas, as quais seccionam discordantemente, quanto junto aos cristais de espessartita, preenchendo microfaturas (Figuras 8C e 8D). Petrograficamente, ainda se observam estruturas bandadas, dadas pela ritmicidade da alternância entre camadas claras (mangano-cauliníticas) e escuras ricas em óxidos de manganês. As estruturas manchadas representam domínios mais fraturados, onde se registram pequenas quantidades de caolinita. As texturas são granoblásticas.

Poços (Figura 5B) e trincheiras (Figura 6), além de sondagens a trado, foram utilizados na pesquisa dos depósitos, o que permitiu caracterizar a mina do Córrego do Cocho. Observou-se um manto de alteração de espessura variável, que, em média, situa-se em torno de 1,5 m, e a zona mineralizada, que chega a atingir espessuras de 8,0 a 8,5 m. Além disso, nas vertentes dos corpos de minério tem-se a presença de níveis concrecionários (oólitos e pisólitos de manganês), em grande parte correspondendo ao minério rolado (Figura 6). As reservas medidas de minério só foram determinadas para a Mina Córrego do Cocho, que atingem 1,2 Mt, sendo as demais, indicadas e inferidas, totalizando um mínimo de 2,0 Mt e 344.664 t metal contido, com teor médio de 28% de MnO_2 .

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO

Foram analisadas 12 amostras do minério de manganês da mina Córrego do Cocho, coletadas em campo na frente da lavra N°1 (Figura 5A e 5B), representando o minério maciço (M) mais frequente, e o minério rolado (R)-Figura 5C. A composição química do minério maciço estudado, nos trabalhos de pesquisa, possui em geral alto teor de SiO_2 , em torno de 30% (Tabela 1). O minério maciço apresentou teores de MnO_2 ao redor de 24%, já o minério rolado apresenta teores maiores que 41% MnO_2 .

Os minerais de ganga são representados por argilo-minerais (caolinita e gibbsita), quartzo, além de óxidos e hidróxidos de ferro (goethita, hidrogoethita e hematita), que ocorrem em menores concentrações. Óxidos e hidróxidos de manganês somados à litioforita perfazem 70% da massa das amostras, como ilustrado na Tabela 2 e na Figura 9, e visível na frente de lavra (Figura 5A).

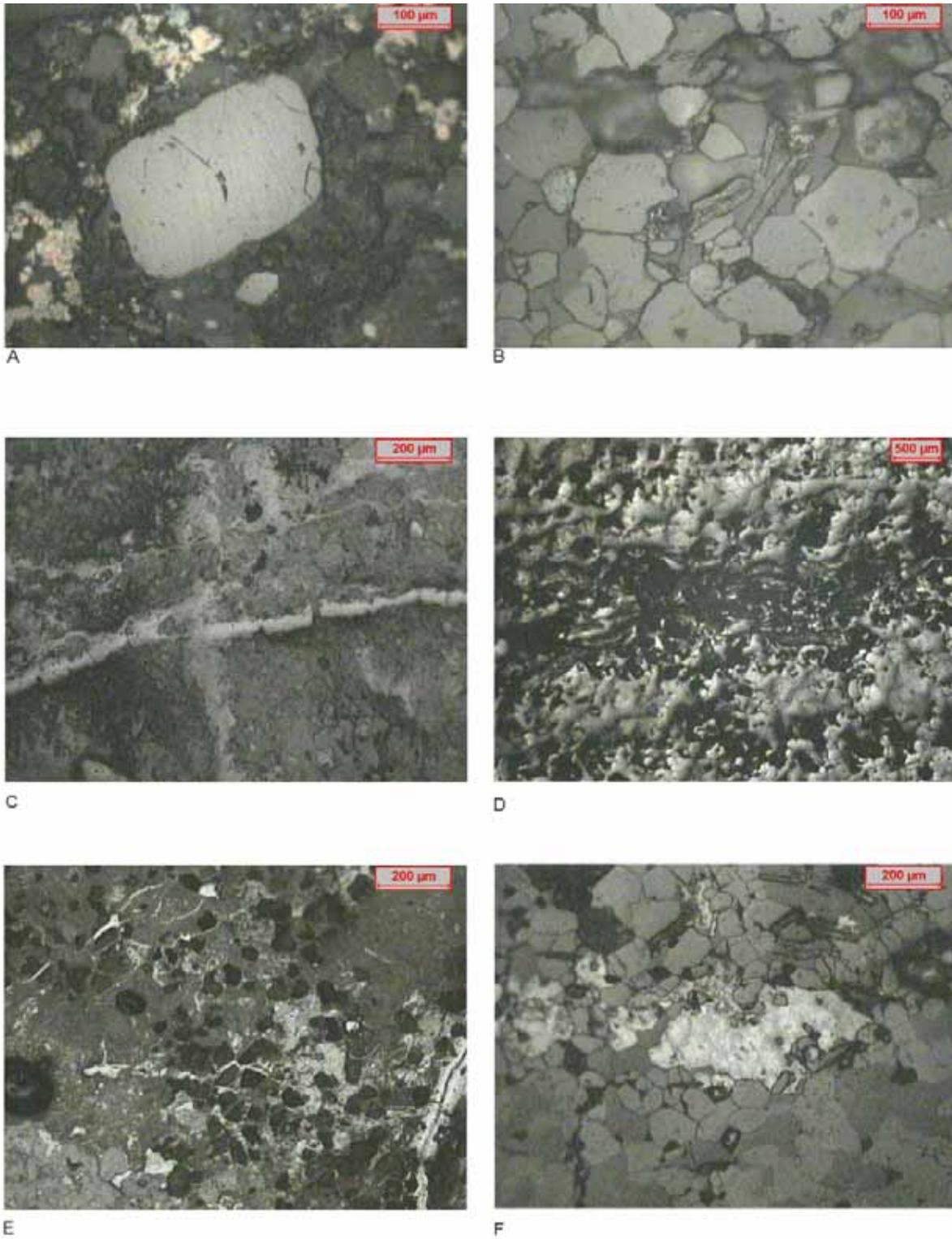


Figura 8a. Feições microscópicas do minério maciço e rolado da mina Córrego do Cocho. **A.** Cristal euhedral de titanomagnetita. **B.** Cristais prismáticos de litioforita em matriz rica em criptomelana. **C.** Veios tardios de psilomelana. **D.** Minério bandado com matriz composta por intercalações de criptomelana e psilomelana. **E.** Fase ferruginosa representada por cristais de magnetita. **F.** Cristal de psilomelana em matriz composta por criptomelana.

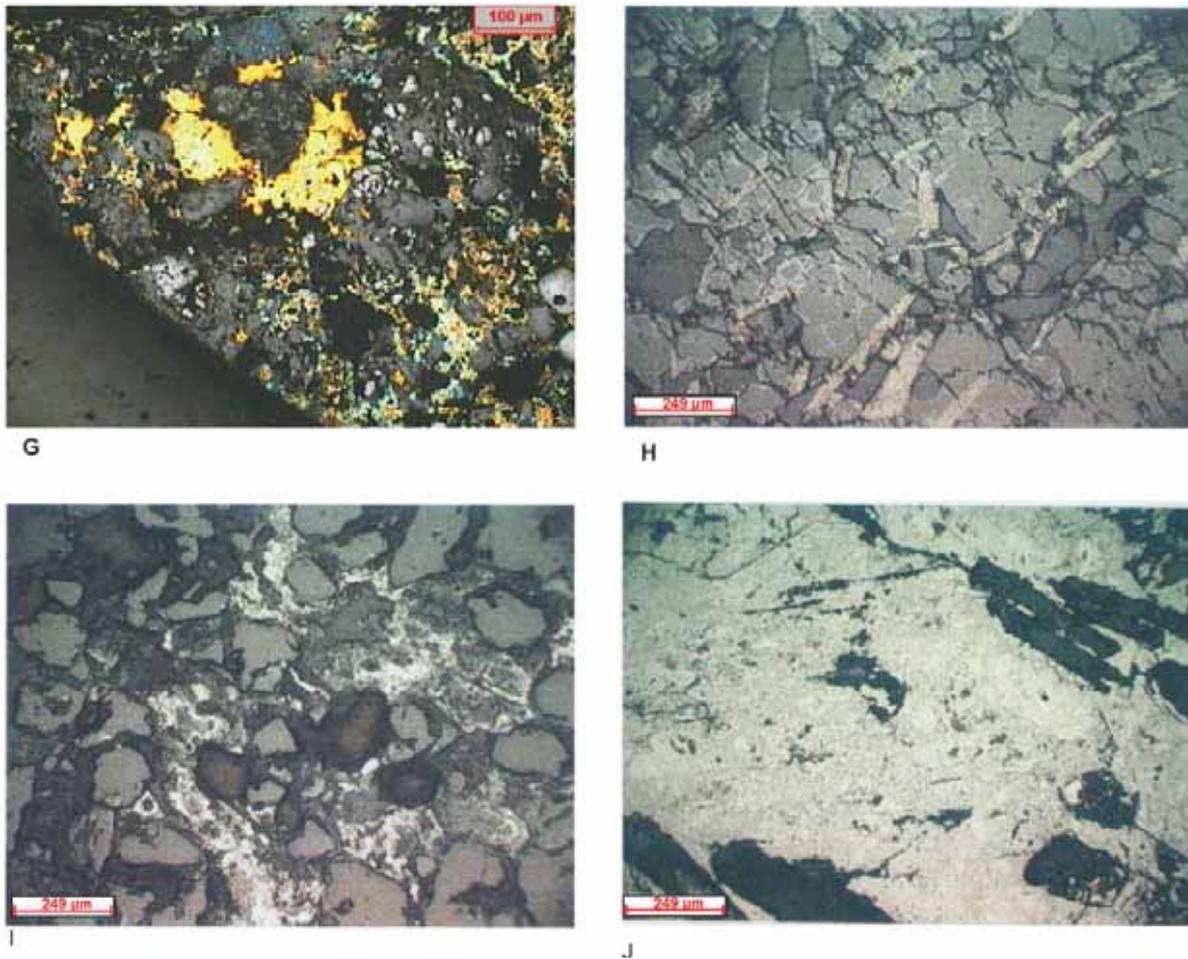


Figura 8b. Feições microscópicas do minério maciço e rolado da mina Córrego do Cocho. **G.** Zona mineralizada apresentando pequena concentração em sulfetos (pirita e calcopirita, e raramente bornita). **H.** Cristais de litioforita imerso em matriz de criptomelana. **I.** Cristais preservados de granada (espessartita). **J.** Cristais de magnetita no minério maciço de matriz composta por criptomelana.

A litioforita, como descrita por Ribeiro Filho, Angeli e de Souza (1990) aparece sob forma de prismas alongados, geralmente associados a veios e vênulas de psilomelana, bem como dispersa junto à criptomelana e pirolusita. A alteração deste mineral em óxidos do grupo MnO_2 compõe o minério maciço e muitas vezes foi separada e, as fases minerais determinadas separadamente por difração de raio X. Espessartita ocorre frequentemente associada a este minério.

A maior parte das amostras estudadas possui cerca de 70% - 85% de minerais de minério e 15% - 25% de ganga, apresentando texturas predominantemente granoblásticas com pequenas variações granulométricas e distribuição homogênea dos minerais presentes. Os óxidos e hidróxidos de manganês apresentam maior partição de MnO_2 em

Tabela 1. Composição química média de todas as amostras de minério maciço analisadas (12 amostras).

Óxidos e elementos	% (em massa)
MnO_2	31,44
SiO_2	29,75
Al	6,46
Fe	3,8
K	0,33
MgO	0,06
Mn Total	27,64

Tabela 2. Composição mineralógica estimada e porcentagem de partição do manganês (média para 12 amostras).

Mineral	Fórmula química	% Massa estimada	Partição do Mn (%)
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	< 5	-
Criptomelana	$\text{Kmn}_8\text{O}_{16}$	20	50
Espessartita	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	20	15
Gahnita	$(\text{Zn},\text{Mn},\text{Fe})\text{Al}_2\text{O}_4$	tr	-
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	< 5	-
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	< 5	-
Grafita	C	< 10	-
Groutita	$\text{Mn}^{3+}\text{O}(\text{OH})$	tr	-
Hausmannita	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}_2^{3+}\text{O}_4$	tr	-
Hematita	Fe_2O_3	< 5	-
Hidrogoethita	$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$	< 10	-
Hollandita	$\text{Ba}_2\text{Mn}_8\text{O}_{16}$	tr	-
Jacobsita	MnFe_2O_4	tr	-
Litioforita	$(\text{Al},\text{Li})\text{MnO}_2(\text{OH})_2$	20	15
Manganita	MnOOH	tr	-
Nsutita	$\text{Mn}^{4+}_{0,85}\text{O}_{1,7}\text{Mn}^{2+}_{0,15}(\text{OH})_{0,3}$	tr	-
Pirolusita	MnO_2	10	10
Psilomelana	$\text{Ba}(\text{Mn}^{2+})(\text{Mn}^{4+})_8\text{O}_{16}(\text{OH})_4$	tr	-
Quartzo	SiO_2	15	-
Tefroita	$\text{Mn}_2(\text{SiO}_4)$	tr	-
Todorokita	$(\text{Na},\text{Ca},\text{K})_2(\text{Mn},\text{Mn})_6\text{O}_{12}3-4,5(\text{H}_2\text{O})$	tr	-
Woodruffita	$(\text{Zn},\text{Mn})_2\text{Mn}_5\text{O}_{12} \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	tr	-
Yofortierita	$(\text{Mn}^{4+}\text{Mn}^{2+})(\text{OOH})_2$	tr	-

relação a outros minerais de minério, seguido da litioforita e da espessartita.

Análise Granulométrica

Os resultados de análise granulométrica dos produtos de cominuição para minério maciço, com os respectivos teores dos elementos de interesse e distribuição, são apresentados na Tabela 3. Para a condição de cominuição adotada, os finos, ou o passante na fração granulométrica de 200 malhas (-0,074 mm), representam 10,8% em massa, correspondendo a 11,5% dos minerais de manganês presentes na amostra (Donatti Filho, 2004).

Os teores em manganês são relativamente homogêneos, variando entre 29,1% a 33,7% de MnO_2 , com ligeiro empobrecimento na fração entre 100 e 200 malhas (-0,15

+ 0,074 mm). A sílica mostra enriquecimento dos teores para os finos até 200 malhas (21,6% até 27,5%), seguido de brusca queda para o passante em 200 malhas (15,6% de SiO_2). Já o Al_2O_3 apresenta, no geral, comportamento inverso ao observado para a sílica. Os teores de Fe_2O_3 são relativamente homogêneos.

A análise dos teores, passantes e retidos do ensaio, mostra que a maior variação de MnO_2 e SiO_2 obtida está relacionada às frações finas (-0,074 mm). O MnO_2 atinge um teor de 34% no passante de 200 malhas (-0,074 mm), caindo para 30% no passante de 100 malhas (-0,15 mm). Já a sílica revelou comportamento inverso, apresentando teor de 15% no passante de 200 malhas, e sofrendo um aumento para 23% no passante de 100 malhas. Tal comportamento das frações finas é também observado nos produtos retidos (Figura 10).

Os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 apresentam-se constantes nos produtos retidos e passantes, com exceção dos produtos passantes na malha de 0,074 mm, que apresentam um aumento no teor de Al_2O_3 , maior que 12% no passante

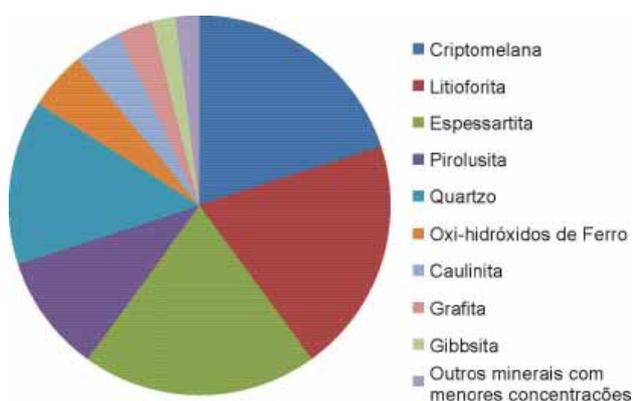


Figura 9. Gráfico de proporção dos minerais de manganês presentes no minério.

das malhas de 0,15 mm para 16% no passante da malha 0,075 mm.

Os compostos analisados distribuem-se majoritariamente nas frações retidas em 100 malhas (0,15 mm), onde estão contidos MnO_2 68%; SiO_2 66%; Al_2O_3 65% e 61% de Fe_2O_3 da amostra. A Figura 11 mostra a distribuição dos compostos nas diversas frações, onde é possível se observar o comportamento homogêneo do MnO_2 , assim como Al_2O_3 e SiO_2 , todos acompanhando a curva da massa. A sílica, porém, apresenta um leve empobrecimento nas frações finas e a alumina um leve enriquecimento. O Fe_2O_3 apresenta-se distribuído principalmente nas frações intermediárias (entre 0,42 e 0,074 mm).

Separação em Líquido Denso

Os estudos para determinação do grau de liberação dos minerais de manganês das frações finas do minério foram realizados através do método de separação por líquido denso (tetra bromo etano-TBE), com densidade de 2,95 g/cm³. Este estudo não permitiu a individualização das diferentes espécies minerais portadoras de manganês.

Tabela 3. Análise granulométrica do produto de cominuição e seus respectivos teores para as 12 amostras de minério maciço.

Fração (mm)	Massa (%)		Teores (%)							Distribuição (%)					
	Retida	Acumulada	MnO_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	
-0,84 + 0,42	32,4	32,4	33,0	21,8	13,3	7,52	0,53	0,33	33,4	29,8	33,5	30,2	25,2	35,4	
-0,42 + 0,15	34,3	66,7	32,5	25,6	11,6	7,35	0,84	0,31	34,8	37,0	31,1	31,3	42,4	35,0	
-0,15 + 0,074	22,5	89,2	29,1	27,5	12,2	8,44	0,85	0,30	20,5	26,1	21,5	26,6	27,9	22,4	
-0,074	10,8	100	34,2	15,6	16,5	8,57	0,28	0,20	11,5	7,10	13,9	11,9	4,50	7,20	
Total calculado	100	100	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	100	100	100	100	100	100	

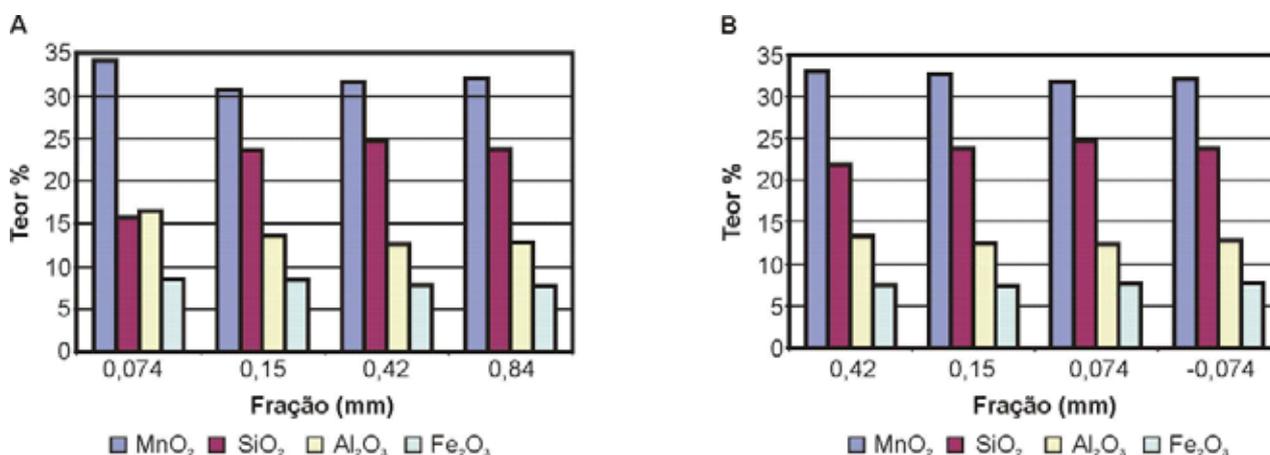


Figura 10. Teores médios passantes (A) e retidos (B) dos produtos de cominuição.

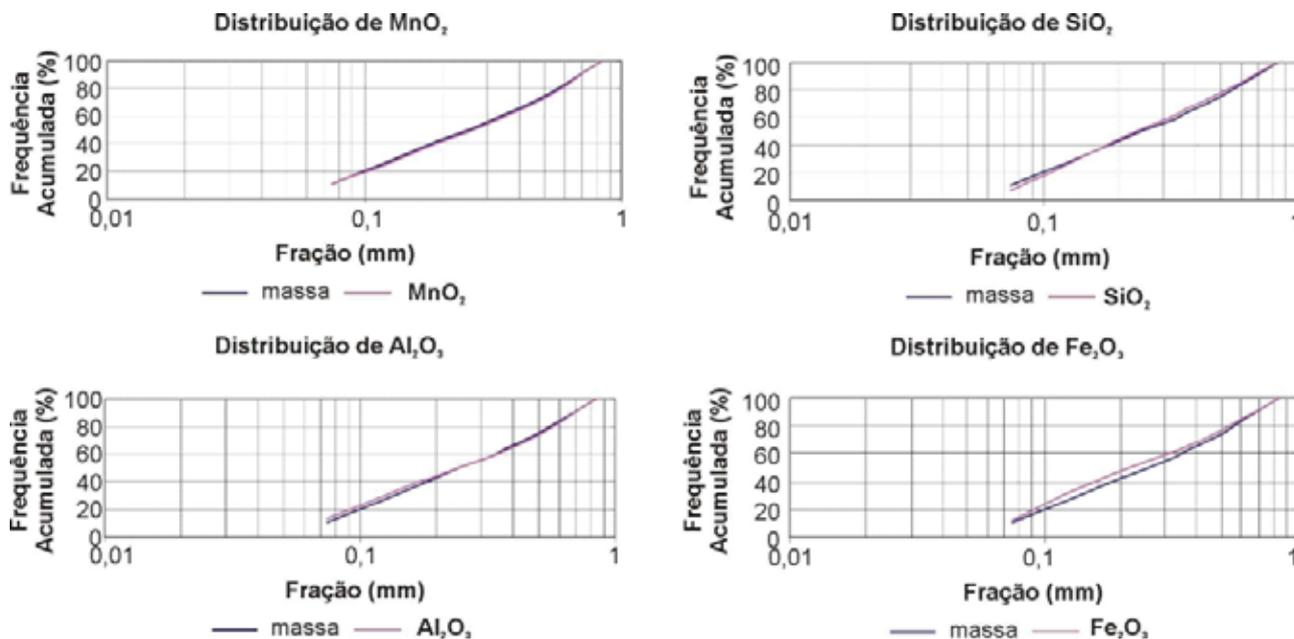


Figura 11. Diagramas de distribuição da fração granulométrica x teores de MnO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

O produto afundado, com densidade de $3,5 \text{ g/cm}^3$, medido através de picnômetro, representa 58% em massa para o material retido em 200 malhas. Trata-se de material algo poroso, constituído essencialmente por MnO_2 (43%), SiO_2 (12%), Al_2O_3 (10%) e Fe_2O_3 (7,7%). A partição no ensaio e os teores de manganês são relativamente homogêneos para as frações granulométricas estudadas, com teores entre 42% e 44% de MnO_2 . O produto afundado carrega 79% do Mn contido no ensaio e 70% do total contido na amostra (Tabela 4).

O produto flutuado, por sua vez, apresenta densidade de $2,66 \text{ g/cm}^3$, representando 42% em massa para o material retido em 200 malhas (Tabela 4). É constituído essencialmente por SiO_2 (43%), e MnO_2 (16%), Al_2O_3 (15%) e Fe_2O_3 (7,7%) subordinados. Cerca de 21% do Mn contido acima de 200 malhas está associado a este produto (19% do Mn contido na amostra). Adicionalmente, o produto flutuado contém ainda 73% SiO_2 , 51% de Al_2O_3 , e 42% de Fe_2O_3 .

A maior concentração de MnO_2 apresenta-se nas frações mais grossas com teores de 44,3%, contudo, nas frações finas o minério chega a atingir teores em torno de 34% MnO_2 que faz parte do minério explotado pela empresa MIL (Mineração Itapira Ltda.).

Os ensaios para a determinação do grau de liberação dos minerais de manganês foram efetuados através de separações em líquido denso. Os resultados são apresentados na Figura 12, mostrando que frações granulométricas passantes em 20 malhas (0,84 mm), excluídas as frações menores que 200 malhas (-0,074 mm), apresentaram 79% de liberação,

indicando 21% de perda do MnO_2 presente nas amostras, o que representa 70% do manganês contido na amostra efetivamente aproveitável na mina Córrego do Cocho.

As alternativas para a concentração do minério foram avaliadas através da concentração por densidade da massa mineralizada, onde foi calculado o valor do “critério de concentração” (CC), através da equação (1), empregando-se valores de peso específico obtidos para os produtos gerados no ensaio de separação em líquido denso ($TBE = 2,95 \text{ g/cm}^3$).

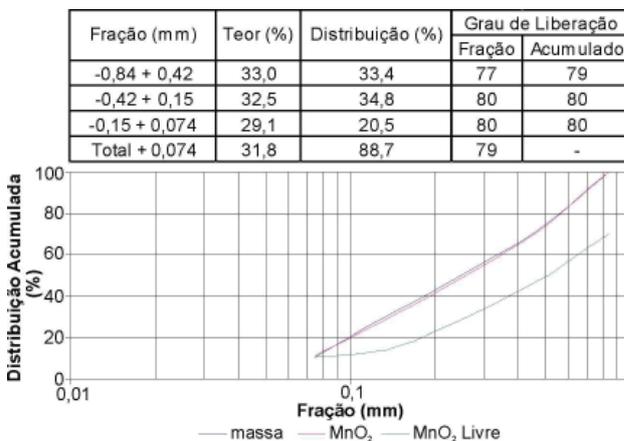


Figura 12. Tabela (A) e Diagrama (B) de distribuição e grau de liberação de MnO_2 nas diversas frações granulométricas.

Tabela 4. Distribuição de teores apresentados pelo minério nos produtos de separação em líquido denso (TBE-2,95 g/cm³).

Fração (mm)	Produto	Peso (%)		Teores (%)						Distribuição no ensaio (%)						Distribuição na amostra (%)					
		Ensaio	Amostra	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
-0,84 + 0,42	Flutuado	42,8	13,9	17,9	36,7	17,2	7,85	0,25	0,46	23,2	72,0	55,5	44,7	20,2	59,9	7,75	21,4	18,608	13,496	5,08	21,2
	Afundado	57,2	18,5	44,3	10,7	10,3	7,27	0,74	0,23	76,8	28,0	44,5	55,3	79,8	40,1	25,6	8,4	14,892	16,704	20,12	14,2
	Total	100	32,4	33,0	21,8	13,3	7,52	0,53	0,33	100	100	100	100	100	100	33,4	29,8	33,5	30,2	25,20	35,4
-0,42 + 0,15	Flutuado	39,0	13,4	16,2	47,2	13,7	7,06	0,21	0,27	19,4	71,9	46,0	37,4	9,7	34,3	6,77	26,6	14,293	11,721	4,11	12,0
	Afundado	61,0	20,9	42,9	11,8	10,3	7,54	1,25	0,33	80,6	28,1	54,0	62,6	90,3	65,7	28,0	10,4	16,807	19,579	38,29	23,0
	Total	100	34,3	32,5	25,6	11,6	7,35	0,84	0,31	100	100	100	100	100	100	34,8	37,0	31,1	31,3	42,40	35,0
-0,15 + 0,074	Flutuado	44,7	10,1	13,2	47,5	14,1	8,39	0,16	0,20	20,3	75,0	51,6	44,4	8,5	29,8	4,15	19,6	11,089	10,487	2,36	6,69
	Afundado	55,3	12,4	42,0	12,8	10,7	8,48	1,40	0,38	79,7	25,0	48,4	55,6	91,5	70,2	16,3	6,5	10,411	13,113	25,54	15,7
	Total	100	22,5	29,1	28,3	12,2	8,44	0,85	0,30	100	100	100	100	100	100	20,5	26,1	21,5	23,6	27,90	22,4
Total + 0,074	Flutuado	41,8	37,3	16,0	43,4	15,1	7,72	0,21	0,32	21,1	72,8	51,1	42,0	12,1	43,0	18,7	67,6	44,0	35,7	11,56	39,9
	Afundado	58,2	51,9	43,2	11,6	10,4	7,67	1,10	0,31	78,9	27,2	48,9	58,0	87,9	57,0	70,0	25,3	42,1	49,4	83,94	52,9
	Total	100	89,2	31,8	24,9	12,4	7,69	0,73	0,31	100	100	100	100	100	100	88,7	92,9	86,1	85,1	95,50	92,8

$$CC = (\delta_p - \delta_m) / (\delta_l - \delta_m) \quad (1)$$

Onde: δ_p = peso específico do mineral pesado = 3,60
(valor médio para o produto pesado)

δ_l = peso específico da ganga leve = 2,66

δ_m = densidade do meio de separação = 1.

O valor obtido, $CC = 1,57$, indica que a separação mediante concentração densitária é relativamente difícil, devendo ser preferencialmente efetuada em faixas granulométricas estreitas, de forma a aumentar a eficiência da separação. Não se deve esperar por resultados satisfatórios mediante o emprego da jigagem, face às características de granulação dos minerais envolvidos e às suas diferenças de peso específico, fato agravado pela elevada porosidade do minério. Seria interessante avaliar o emprego de espirais e/ou mesas vibratórias, se possível processando o material em faixas granulométricas distintas, conforme mostrado por Gaudin (1978) e Wills (1992). A utilização de mesas vibratórias, por vezes otimiza a recuperação do minério de granulação fina; entretanto, no caso estudado não se teve aumento na concentração de minério na malha abaixo de 0,074 mm. Assim, os concentrados a serem obtidos deverão apresentar teores próximos de 38-40% de MnO₂. Outra alternativa a ser avaliada e devidamente pesquisada compreende a concentração de manganês através de flotação.

ANÁLISE COMPARATIVA COM O MINÉRIO DE OURO FINO (MG)

Na região entre as cidades de Jacutinga e Ouro Fino, situada no sul do estado de Minas Gerais, ocorrem diversas mineralizações de manganês associadas às rochas do Grupo Itapira, onde os protominérios de manganês formam um *trend* de corpos lenticulares (*boudins*) embutidos em biotita e/ou hornblenda gnaisses (Figura 13). A jazida utilizada para este estudo comparativo corresponde a do bairro Caneleiras (Figura 14), que encerra recursos (incluindo depósitos vizinhos) de 4,2 Mt com teor médio de 30% em MnO₂. É composta por protominério silicático à semelhança de Itapira e, localmente, sob forma de pequenos veios que apresentam teores de 38% a 40% em MnO₂.

Foram executados trabalhos de caracterização tecnológica, similares aos realizados na mina Córrego do Cocho, cujos resultados foram passíveis de comparação (Tabela 8). A composição química média do minério obtidos nos estudos da mina Caneleiras (Tabela 5) apresenta teores de MnO₂ (29,7%) e SiO₂ (24,6%), menores que no minério do Córrego do Cocho, e concentrações de Fe₂O₃ (9,2%) e Al₂O₃ (17,0%) mais elevadas. Com relação aos minérios maciço e rolado, em Ouro Fino, tem-se relação inversa à que ocorre em Itapira, com teores de MnO₂ menores no minério rolado.

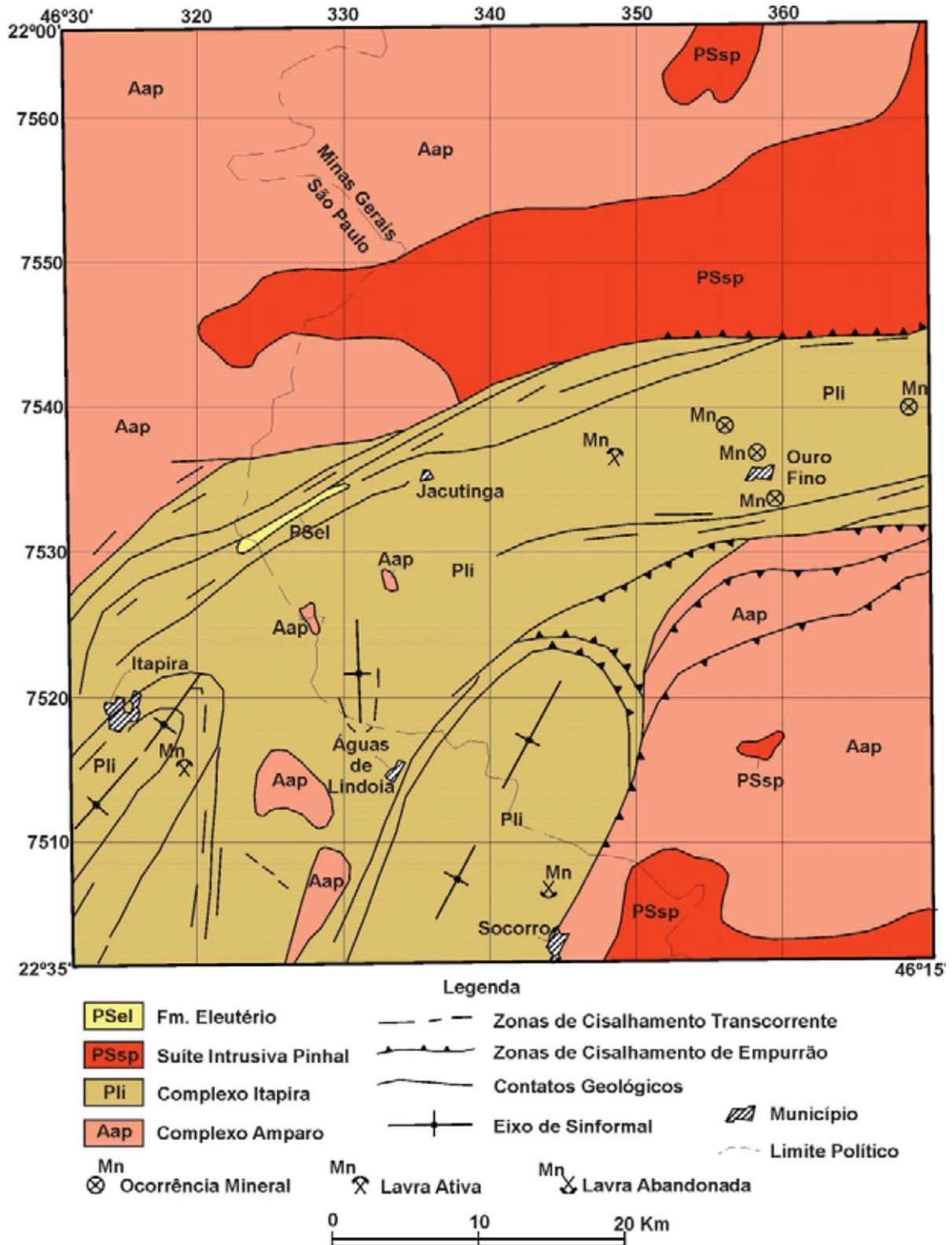


Figura 13. Ocorrências de jazimentos e minas de manganês no Grupo Itapira, na porção entre as cidades de Itapira e Ouro Fino (modificado de Veríssimo, 1991).

O minério é constituído por espessartita, além de criptomelana, pirolusita, lioforita, hidróxido de manganês (pequenas partículas de $Mn(OH)_4$), todorokita e outros óxidos e hidróxidos de manganês criptocristalinos, que representam 43% do minério (Oliveira, 1987). Já os minerais de ganga são compostos por quartzo, que ocorre como cristais isolados ou vênulas, gibbsita e caulinita, que perfazem 26%

do minério. Portanto, apresentam mineralogia com menores porcentagens de minerais de ganga e de espessartita (13%) quando comparados com o minério dos depósitos de Itapira.

Dos resultados das análises granulométricas (Figuras 11 e 15) é possível observar um comportamento constante de Fe_3O_4 , Al_2O_3 e MnO_2 nas diversas frações granulométricas nos jazimentos de Jacutinga/Ouro Fino, onde se inclui



Figura 14. Aspecto geral da jazida de Caneleiras (Ouro Fino-MG). À direita, observa-se o minério britado e estocado; e à esquerda a área já lavrada.

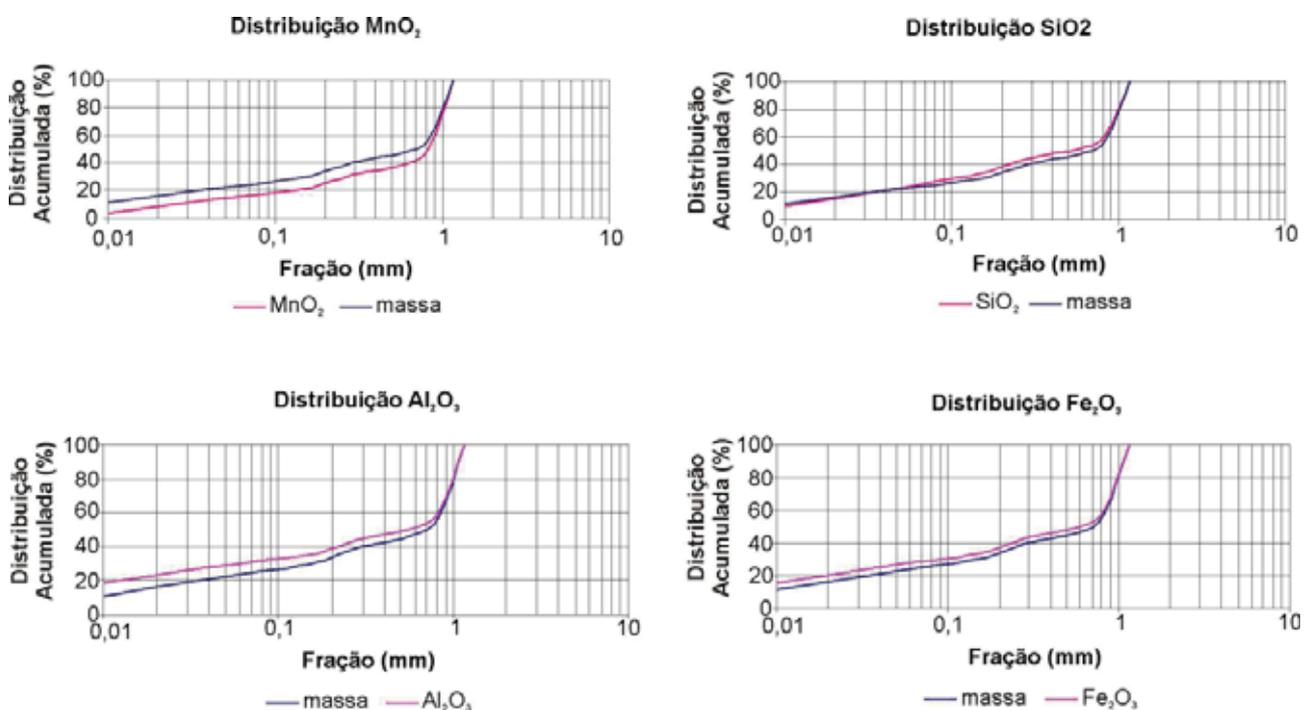


Figura 15. Diagramas de distribuição de MnO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em relação às frações granulométricas do minério da mina Caneleiras.

a mina Caneleiras (Oliveira, 1987), fato também detectado em Itapira. Porém, a sílica apresenta comportamento distinto nas duas minas, mostrando variação diretamente proporcional à massa e à granulometria, e inversamente proporcional aos teores de MnO_2 , em Itapira. Por sua vez, em Ouro Fino (Caneleiras), o comportamento da sílica é inversamente proporcional ao da granulometria, porém a relação com o MnO_2 é praticamente similar. As frações finas exibem características singulares, apresentando brusca queda nos teores de SiO_2 e MnO_2 , e aumento nos teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , diferentemente, em Itapira, onde os teores de MnO_2 nas frações finas apresentam ligeiro aumento.

Em geral, os compostos se distribuem predominantemente nas frações mais grossas (retidos na malha 0,15 mm) em Itapira, e na malha 1,16 mm em Ouro Fino, concentrando de 60% a 70%, em Itapira, e 42% em Ouro Fino. As frações finas, no ensaio neste último depósito, apresentam uma concentração considerável Al_2O_3 e Fe_2O_3 chegando a 31% e 23%, respectivamente. Já em Itapira, as frações finas representam 11% de MnO_2 contido na amostra, além de 7% em Fe_2O_3 e 14% em Al_2O_3 (Tabelas 3 e 6).

Os ensaios de separação em líquido denso, em ambos os casos, apresentaram a concentração de SiO_2 nos produtos

flutuados na ordem de 70%, com teores de 43,4% em Itapira, e 60% em Ouro Fino. Os produtos afundados liberaram 79% de MnO_2 , em Itapira, e 90% em Ouro Fino, com teores de 43,2% e 38,0%, respectivamente (Tabelas 4 e 7). Da mesma forma os resultados da comparação dos minérios de Ouro Fino e Itapira com relação à composição química e mineralógica, e com os resultados da caracterização tecnológica discutidos anteriormente, encontram-se sintetizadas na Tabela 8.

CONCLUSÕES

Em função do total dos recursos (medido, indicado e inferido) de 2,0 Mt a um teor médio de 23% MnO_2 , os depósitos e a mina do Córrego do Cocho (Itapira) são economicamente viáveis, e vem sendo explotados intermitentemente. No entanto, o valor agregado ao produto final será maior com sua aplicação na indústria de fertilizantes e como corretivo de solos. Os recursos da mina de Caneleiras (Ouro Fino) já apresentam reservas medidas da ordem de 400.000 t (recursos totais de 1,1 Mt) com teor médio de 32% em MnO_2 , e maior grau de liberação. Assim, o minério pode ser recuperado, após o beneficiamento, produzindo um produto de fração granulométrica mais grossa e, mais rico em MnO_2 (igual ou acima de 46%), além do que se tem recursos maiores a um maior teor.

Considerando os novos dados obtidos nessa pesquisa, em Itapira, demonstra-se que o aproveitamento das frações mais finas do minério, com teores médios de 34% MnO_2 , que atualmente não são aproveitados (tidos como rejeito), será possível um ganho de 11% no total de MnO_2 produzido atualmente. Através da caracterização mineralógica, composição química e do potencial de concentração física (separação por líquido denso ou magnético) verificou-se que minérios oxidados com teores de 33% MnO_2 , 17%

Tabela 5. Composição química média do minério maciço e rolado da mina de Caneleiras (MG).

	MnO_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
Minério Maciço	33,8	23,4	15,1	8,25	1	0,22
Minério Rolado	25,6	25,8	18,9	10,2	0,35	0,1
Média	29,7	24,6	17	9,23	0,68	0,16

Tabela 6. Análises granulométricas do minério da mina Caneleiras, onde se observa a distribuição dos óxidos presentes no minério com relação às porcentagens retidas e acumuladas nas várias frações e seus respectivos teores.

Fração	Peso		Teores				Distribuição			
	Retido	Acumulado	MnO_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
1,16	42,3	43,8	33,7	23	16,6	8,79	49,3	38,3	39,2	40
1,16 + 0,83	11	53,3	32,3	24,5	16,6	8,85	12,1	10,6	10,2	10,4
0,83 + 0,58	6,64	59,9	31,8	24,9	16,6	9,06	7,15	6,55	6,19	6,47
0,58 + 0,29	10,1	70	29,8	28,3	16,3	9,09	10,2	11,1	9,25	9,89
0,29 + 0,15	8,86	78,9	26,9	35,4	14,5	8,6	8,06	11,8	7,41	8,3
0,15 + 0,04	9,88	88,8	27,2	33,1	15,3	9,01	9,06	12,3	8,75	9,69
-0,04	11,2	100	17,7	20,7	28,6	12,4	4,12	9,28	19	15,2
Total calculado	100	-	29,5	25,6	18,1	9,32	100	100	100	100

Tabela 7. Distribuição e teores dos produtos do ensaio de separação por líquido denso da mina Córrego do Cocho.

Fração (mm)	Produto	Peso		Teores						Distribuição no ensaio						Distribuição na amostra					
		Ensaio	Amostra	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃		
1,16	Flutuado	10,4	4,41	18	51,7	13,4	5,34	5,26	23,7	8,86	6,84	2,3	9,79	3,73	2,81						
	Afundado	89,6	38,2	37,4	19,2	15,9	8,4	94,7	76,3	91,1	93,2	41,4	31,5	38,4	38,3						
	Total	100	42,6	35,2	22,8	15,6	8,08	100	100	100	100	100	43,7	41,3	41,1						
1,16 + 0,83	Flutuado	11,1	1,31	13,3	58,9	12,6	4,16	4,25	28,3	8,9	5,64	0,51	3,34	1,03	0,64						
	Afundado	88,9	10,5	37,6	18,7	16,1	8,71	95,8	71,8	91,1	94,4	11,4	8,49	10,5	10,7						
	Total	100	11,8	34,8	23,6	15,4	8,05	100	100	100	100	11,9	11,8	11,5	11,3						
0,83 + 0,58	Flutuado	13,5	1,07	12	62,5	12,7	3,93	4,68	34,9	11,2	6,4	0,37	2,8	0,85	0,5						
	Afundado	86,5	6,81	38,1	18,3	15,8	8,99	95,3	65,2	88,8	93,6	7,6	5,24	6,75	7,27						
	Total	100	7,88	34,7	24	15,2	8,25	100	100	100	100	7,97	8,04	7,6	7,77						
0,58 + 0,29	Flutuado	16,7	1,86	9,85	66,8	11,4	3,25	4,84	44	12,5	6,83	0,54	5,29	1,35	0,76						
	Afundado	88,3	9,8	38,8	17	15,9	9,43	95,2	56	87,5	93,2	10,5	6,72	9,47	10,4						
	Total	100	11,2	34	25,3	15,3	8,37	100	100	100	100	11,1	12	10,8	11,2						
0,29 + 0,15	Flutuado	21,9	2,22	8,71	69,2	11,2	3,02	5,8	55,8	16,4	7,91	0,57	6,52	1,58	0,8						
	Afundado	78,1	7,94	39,6	15,4	16	9,84	94,2	44,2	83,6	92,1	9,2	5,18	8,06	9,27						
	Total	100	10,2	33	27,1	15	8,29	100	100	100	100	9,77	11,7	9,64	10,1						
0,15 + 0,04	Flutuado	20,8	2,25	9,94	56,8	17,8	3,56	6,23	48,1	22,5	8,4	0,65	5,19	2,52	0,95						
	Afundado	79,2	8,54	39,4	16,1	16,1	10,2	93,8	5,86	77,5	91,6	9,82	5,59	8,69	10,4						
	Total	100	10,8	33,3	23,5	16,4	8,81	100	100	100	100	10,5	10,8	11,2	11,4						
Total calculado	Flutuado	13,8	13,1	12,9	59,3	13,3	4,11	5,2	34,4	11,9	6,96	4,94	32,9	11,1	6,46						
	Afundado	86,2	81,7	33,4	18,1	15,9	8,94	94,8	65,6	88,1	93	90	62,7	81,9	86,4						
	Total	100	94,9	34,4	23,7	15,5	8,19	100	100	100	100	95	95,7	92,9	92,8						

Tabela 8. Tabela comparativa dos resultados de caracterização tecnológica do minério de manganês das minas Córrego do Cocho (Itapira-SP) e Caneleiras (Ouro Fino/Jacutinga-MG).

	Itapira	Ouro Fino/Jacutinga
Composição química média	Minério apresenta teores de 31,44% de MnO ₂ e 29,75% de SiO ₂ com Al ₂ O ₃ (6,46%) e Fe ₂ O ₃ (3,8%) subordinados.	Minério apresenta teores de 29,7% de MnO ₂ e 24,6% de SiO ₂ com Al ₂ O ₃ (17%) e Fe ₂ O ₃ (9,2%) subordinados.
MINERALOGIA DO MINÉRIO		
Minerais de minério	Espessartita (20%), litioforita, criptomelana, pirolusita, psilomelana, hausmannita, manganita, hollandita, jacobssita, woodruffita e todorokita (50%).	Espessartita (13%), litioforita e óxidos e hidróxidos de manganês criptocristalinos e amorfos (61%).
Minerais de ganga	Quartzo (15%), caolinita, nontronita, gibbsita, hematita, goethita e grafita, além de titano-magnetita e grafita.	Quartzo (16%), gibbsita e caolinita (10%).
Minério maciço	Teores de MnO ₂ (25%).	Teores de MnO ₂ (34%), SiO ₂ (23%), Al ₂ O ₃ (15%) e Fe ₂ O ₃ (8%).
Minério rolado	Teores de MnO ₂ (40%).	Teores de MnO ₂ (26%), SiO ₂ (25%), Al ₂ O ₃ (19%) e Fe ₂ O ₃ (10%).
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
Massa:	As frações retidas na malha de 0,15 mm representam 67% de massa da amostra, enquanto que o passante representa 33%, sendo que 10,8% (finos passantes na malha 0,074 mm).	As frações retidas na malha de 0,15 mm representam 79% de massa da amostra e o passante 21%.
TEORES		
MnO ₂	Teor médio de 32,1%, de forma homogênea nas diversas frações, com maior valor nas frações finas (passante da malha 0,074 mm), onde apresenta concentrações de 34,2%.	Apresenta teor médio de 30%, de forma homogênea nas diversas frações, com brusca queda nas frações finas (passante na malha 0,04 mm), decrescendo para 11%.
SiO ₂	Apresenta teor médio de 23,7% com comportamento similar ao da granulometria, chegando a 15,6% nos finos (passante da malha 0,074 mm).	Apresenta teor médio de 25,5% com comportamento inverso ao da granulometria, com brusca queda nos finos (passante na malha de 0,04 mm).
Al ₂ O ₃	Apresenta comportamento homogêneo nas diversas frações granulométricas com teores variando de 13,3% a 11,5%.	Apresenta comportamento homogêneo com relação a granulometria com teor médio de 18,5%, brusco aumento nas frações finas, chegando até 37%.
Fe ₂ O ₃	Apresenta comportamento homogêneo nas diversas granulometrias com teor médio de 8,06%.	Apresenta comportamento homogêneo nas frações granulométricas grossas com teor médio de 9,32%, brusco aumento nas frações finas, chegando a 14%.
Distribuição	Os elementos distribuem-se de maneira decrescente conforme a massa e a granulometria, concentrando-se principalmente nas frações retidas na malha de 0,15 mm (60% a 70%).	Os elementos encontram-se distribuídos nas diversas frações, concentrando-se principalmente nas frações grosseiras, retidas na malha de 1,16 mm (42% em média).
Separação por líquido denso	Obteve-se concentrações de 70% SiO ₂ nos produtos flutuados com teor 43%. No produto afundado obteve-se 70% de MnO ₂ , com teores de 43%. Al ₂ O ₃ concentrou-se levemente nos flutuados e Fe ₂ O ₃ nos afundados.	Apresentou concentração de 70% de SiO ₂ nos produtos flutuados com teor de 60%, e de 90% de MnO ₂ nos produtos afundados com teor de 38%. Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ também concentraram-se nos afundados.

SiO₂, 14% Al₂O₃, e 5% Fe oxi-hidróxidos, próximos aos de Itapira, são viáveis, principalmente para produção de sulfato de manganês. Em função dos resultados obtidos, o minério da mina Córrego do Cocho deve ser empregado na agricultura como micronutriente, principalmente em terrenos onde se utiliza da calagem, a qual reduz a disponibilidade de manganês, que influencia significativamente os nutrientes foliares. Nos solos, sob forma de óxidos ou carbonatos, da mesma maneira, podem ser empregados diretamente com aproveitamento de 41 e 45%, respectivamente. É o caso oposto ao minério da mina de Caneleiras, que apresenta minério concentrado em frações mais grossas (entre 0,84 e 0,074 mm) e teores aproximadamente similares aos de Itapira, que desta forma pode ser empregado na produção de ligas Fe-Si-Mn para a indústria do aço.

Em face da ocorrência de uma dezena de depósitos similares, regionalmente, a mina do Córrego do Cocho, bem como os demais três jazimentos vizinhos, assume um grau de importância que não deve ser ignorado, e necessita de nova reavaliação, segundo a metodologia aplicada.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Sr. Gustavo Sartori, proprietário da MIL (Mineração Itapira Ltda), pela permissão da divulgação dos resultados aqui apresentados, ao Geólogo MSc José Paulo Donatti Filho, que participou da primeira fase das pesquisas realizadas em Itapira, e a dois revisores anônimos deste periódico, que contribuíram com discussões e revisões detalhadas e cientificamente construtivas para esta versão final.

REFERÊNCIAS

- ANGELI, N.; CARVALHO, S. G.; OLIVEIRA, M. A. F.; CHOUDHURI, A.; SARAGIOTTO, J. A. R. Caracterização das ocorrências de minério de manganês em parte da porção nordeste do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. v. 8, p. 3710-3723.
- AZEVEDO, C. L. L. Produção Integrada de Citros-BA. In: *Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. Sistema de Produção*, 2ª ed., n. 15, Salvador, 2007. Disponível em: <http://sistemasdeprodução.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Citros/CitrosBahia>. Acesso em: 08 maio de 2009.
- BORCHERT, H. On the ore deposition and geochemistry of manganese. *Mineralium Deposita*, Berlim. v. 5, n. 3, p. 300-314, 1970.
- BORKERT, C. M.; LANTMANN, A. F.; PALHANO, J. B.; SFREDO, G. J. Determinação química do manganês absorvível pela soja. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 3., 1984, Campinas. *Anais...* Campinas: EMBRAPA/CNPSo, 1984. p. 879-887.
- CHOUDHURI, A.; ANGELI, N.; JIMENEZ-RUEDA, J. R. Caracterização e gênese dos depósitos de manganês associados a gonditos na porção centro-leste do estado de São Paulo. Rio Claro: UNESP, 1984. 32 p. (Relatório FAPESP, Nº 83/0393-5).
- CHUKHROV, F. V.; GORSHKOV, A. I.; SIVTISOV, A. V.; BEREZOVSKEYA, V. V. The Nature and Genesis of Lithioforite. Traduzido de “*K voprosu o konstitutsii I genezise litioforitov*”. *Izvestiya an SSSR, seriya geologicheskaya*, n. 2, p. 3-15, 1985.
- DAMMER, D.; McDOUGALL, I.; CHIVAS, R. C. Timing of Weathering – Induced Alteration of Manganese Deposits in Western of Austrália: evidence from K / Ar and ⁴⁰Ar / ³⁹Ar Dating. *Economic Geology*, v. 94, p. 87-108, 1999.
- DER - Departamento de Estradas de Rodagem. Disponível em: <http://der.sp.gov.br/documentos/mapas.aspx>, Acesso em: 25 outubro de 2011.
- DONATTI FILHO, J. P. *A relação genética do minério de manganês do sudeste de Itapira (SP) com a tectônica do Cenozóico, e caracterização tecnológica do minério da Mina Córrego do Cocho*. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia)-Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Rio Claro, 2004.
- EBERT, H. Os Paraibides entre São João Del Rei (MG) e Itapira (SP), e a bifurcação entre Paraibides e Araxáides. *Publ. Especial SBG-Núcleo SP / Pró-Minério (In memoriam)*. São Paulo, v. 12, p. 72-103, 1984.
- FAN, D.; YANG, P. Introduction to and classification of manganese deposits of China. *Ore Geology Reviews*, v. 15, n.1, p. 1-13, 1999.
- FERMOR, L. L. The manganese ore deposits of India. *Memoir Geology Survey of India*, v. 37, p. 93-101, 1909.
- GAUDIN, A. M. *Principles of Mineral Dressing*. 7ª Ed. Nova Delhi: McGraw-Hill Publ. Company Ltd., 1978, 554 p.
- HASUI, Y.; RODRIGUES, E. de P.; OLIVEIRA, M. C. B. D.; ENS, H. H.; MORALES, N.; ZANARDO, A.; QUADE, H.; NYK, R.; KÜLLER, M. L.; FRASCÁ, M.

- H. B. de O. *Deformação por cisalhamento dúctil: modelo de transformações de rochas pré-cambrianas antigas do leste do Estado de São Paulo*. São Paulo: Pró-Minério, 1998. (Relatório IPT N° 25.908).
- Heilbron, M.; Pedrosa-Soares, A. C.; Campos Neto, M. C.; Silva, L. C.; Trouw, R.; JANASI, V. A. Província Mantiqueira. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; DAL RÉ CARNEIRO, C.; BRITO NEVES, B. B. de (Ed.). *Geologia do Continente Sul-Americano, Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Editora BECA, 2004. Cap. 13, p. 203-235.
- KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p.147-265, 1956.
- LAZARINI, A. P. *Petrologia de metabasitos e ultrabasitos da região de Águas de Lindóia*. 2000. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Geociências e Ciências Exatas- Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, São Paulo, 2000.
- OLIVEIRA, E. G. de. A mina de manganês de Jacutinga (MG). Lava e caracterização tecnológica do minério. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 6., 1987, Rio Claro. *Atas...* Rio Claro: SBG/SP, 1987. v. 2, p. 457-469.
- OLIVEIRA, M. A. F. de; ZANARDO, A.; SILVA, A. H. M.; LAZARINI, A. P. Anfibolitos associados à Faixa Metamórfica Amparo – Itapira na região de Socorro – Amparo – Águas de Lindóia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG/Núcleo MG, 1998. p. 456.
- PIRES, F. R. M.; LEONARDOS Jr., O. H.; PARENTI COUTO, J. G. Gonditos na região de Pouso Alegre, Minas Gerais. *Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro, v. 52, n. 312, p. 237-239, 1970.
- REZENDE, F. E. DE O.; DA SILVA SÁ, J. A. Caracterização tecnológica de minérios de manganês visando a produção de manganês metálico e sulfato de manganês. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. v. 5, p. 4100-4105.
- RIBEIRO FILHO, E.; ANGELI, N.; DE SOUZA, J. V. Litióforitas do distrito manganífero Aracoíaba – Pacajús, Ceará e de Itapira, São Paulo. In: JORNADAS CIENTÍFICAS DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA USP, 1990, São Paulo. *Boletim Especial...* São Paulo: IGc-USP, 1990. p. 98-99.
- ROY, S.; MITRA, F. N. Mineralogy and genesis of the gondites associated with metamorphic manganese orebodies of Madhya Pradesh, India. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 20, p. 86-114, 1964.
- ROY, S. Mineralogy of the different genetic types of manganese deposits. *Economic Geology*, v. 63, p. 76-786, 1968.
- THE FERTILIZER INSTITUTE, Washington (DC). *Manual de Fertilizantes*, traduzido por CEFER-IPT. 1976.
- VALARELLI, A. V. La Lithioforite de La Serra de Navio, Amapá, Brazil. *Bulletin Suisse de Minéralogie et Pétrographie*, v. 55, p. 19-35, 1975.
- VERÍSSIMO, C. U. *Evolução geológica dos corpos de protominério e mineralizações de manganês associadas, porção leste de São Paulo e Sul de Minas Gerais*. 1991. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro (SP), 1991.
- WERNICK, E. *A geologia da região de Amparo, leste do Estado de São Paulo*. 1967. Tese (Doutorado)-Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Rio Claro (SP), 1967.
- WERNICK, E.; FERNANDES, N. A.; ALMEIDA Jr., N. F. Gonditos de Socorro e Itapira, SP. *Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro, v.39, n. 372, p. 16-21, 1976.
- WERNICK, E. Contribuição a estratigrafia do Pré-Cambriano do leste do estado de São Paulo e áreas vizinhas. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 206-216, 1978.
- WILLS, B. A. *Mineral Processing Technology*. New York: Pergamon Press, 1992. 885 p.
- ZANARDO, A. *Análise petrográfica e microestrutural das rochas da Folha de Águas de Lindóia*. 1987. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- ZANARDO, A. *Pesquisa geológica e de matérias primas cerâmicas do centro nordeste do estado de São Paulo*. 2003. Tese (Livre Docência) - Instituto De Geociências E Ciências Exatas (Unesp), Rio Claro (SP), 2003.