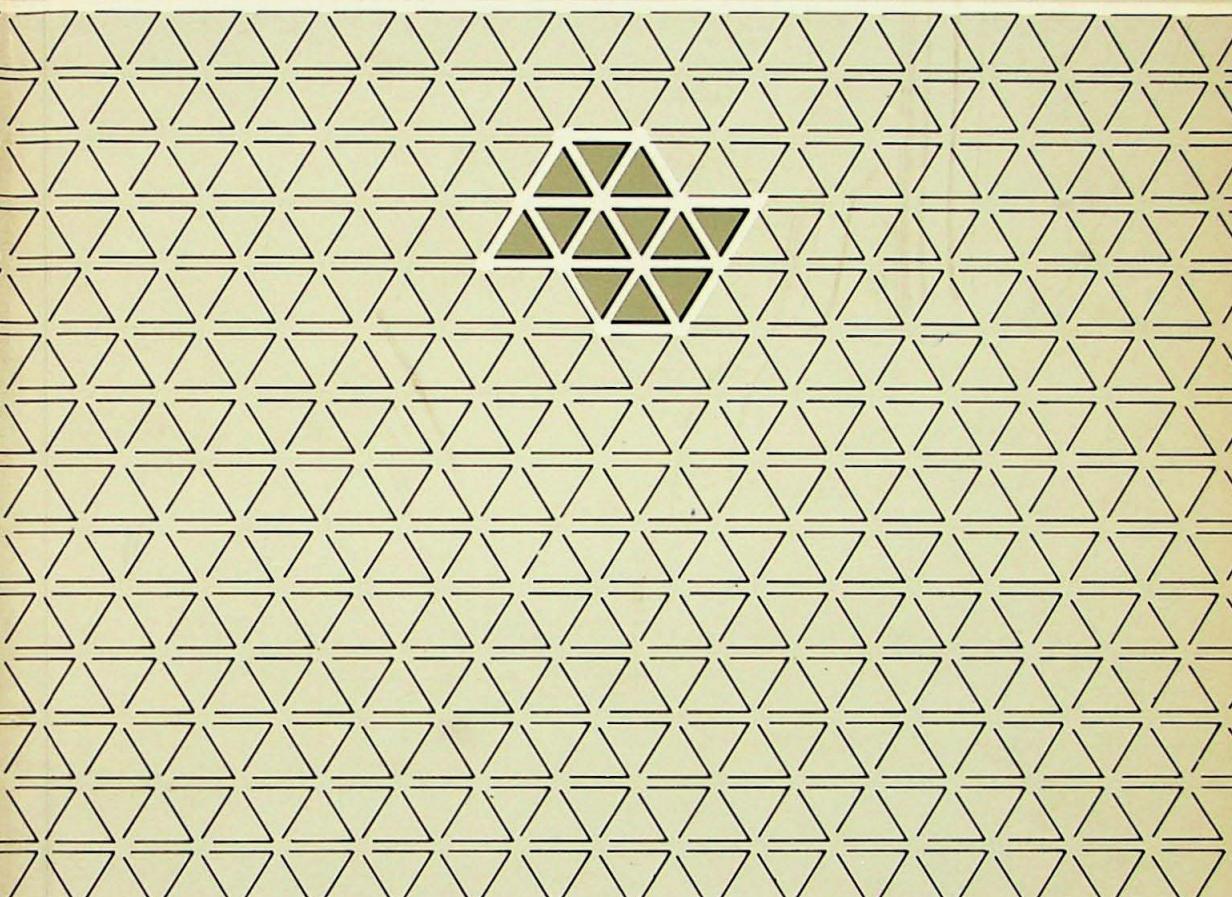


GEOCIÊNCIAS

Universidade Estadual Paulista/UNESP



MINERALIZAÇÕES NOS TERRENOS GREENSTONE DE ALPINÓPOLIS E FORTALEZA DE MINAS

Sebastião Gomes de CARVALHO*
Paulo Cesar SOARES**
Aledir Paganelli BARBOUR***

- RESUMO: No presente trabalho são abordadas em termos geológicos e metalogenéticos as manifestações vulcão-sedimentares arqueanas (*greenstone belt* "Morro do Ferro") no sudoeste do Estado de Minas Gerais. Especial ênfase é dada às concentrações de sulfetos de níquel, cobre, zinco e ferro, que ocorrem no referido greenstone nas proximidades das cidades de Alpinópolis e Fortaleza de Minas. O estudo comparativo das assembleias sulfetadas nestas duas regiões permitiram, ainda que em termos preliminares, esboçar um modelo genético-evolutivo explicativo para as mesmas.
- UNITERMOS: Metalogênese; modelo genético; *greenstone belt*; mineralizações.

Introdução

A empresa de mineração "Serra da Fortaleza", atualmente "Empresa de Mineração e Agropecuária J. S. Ltda.", vem desenvolvendo trabalhos de prospecção, há pelo menos 10 anos, no *greenstone belt* "Morro do Ferro", localizado no sudoeste do Estado de Minas Gerais (Figura 1). Durante esse período foram detectadas importantes anomalias geoquímicas de solo para níquel e cobre (superpostas) no referido greenstone (Figura 2).

Apesar dos pequenos investimentos realizados, estes trabalhos tiveram como consequência o descobrimento, em 1983, do primeiro depósito de níquel-cobre e cobalto do Brasil (depósito O'Toole), neste tipo de terreno. Esse descobrimento foi efetuado pela BP - Mineração, que comprou os direitos de pesquisa da Mineração

* Departamento de Petrologia e Metalogenia – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – 13500 – Rio Claro – SP.

** Departamento de Geologia – UFPR – 80000 – Curitiba – PR.

*** Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada – IG-USP – 05508 – Cidade Universitária – SP.

Serra da Fortaleza. Rigorosamente onde se situam as anomalias geoquímicas de níquel e cobre é que a BP – Mineração descobriu posteriormente o depósito O'Toole.

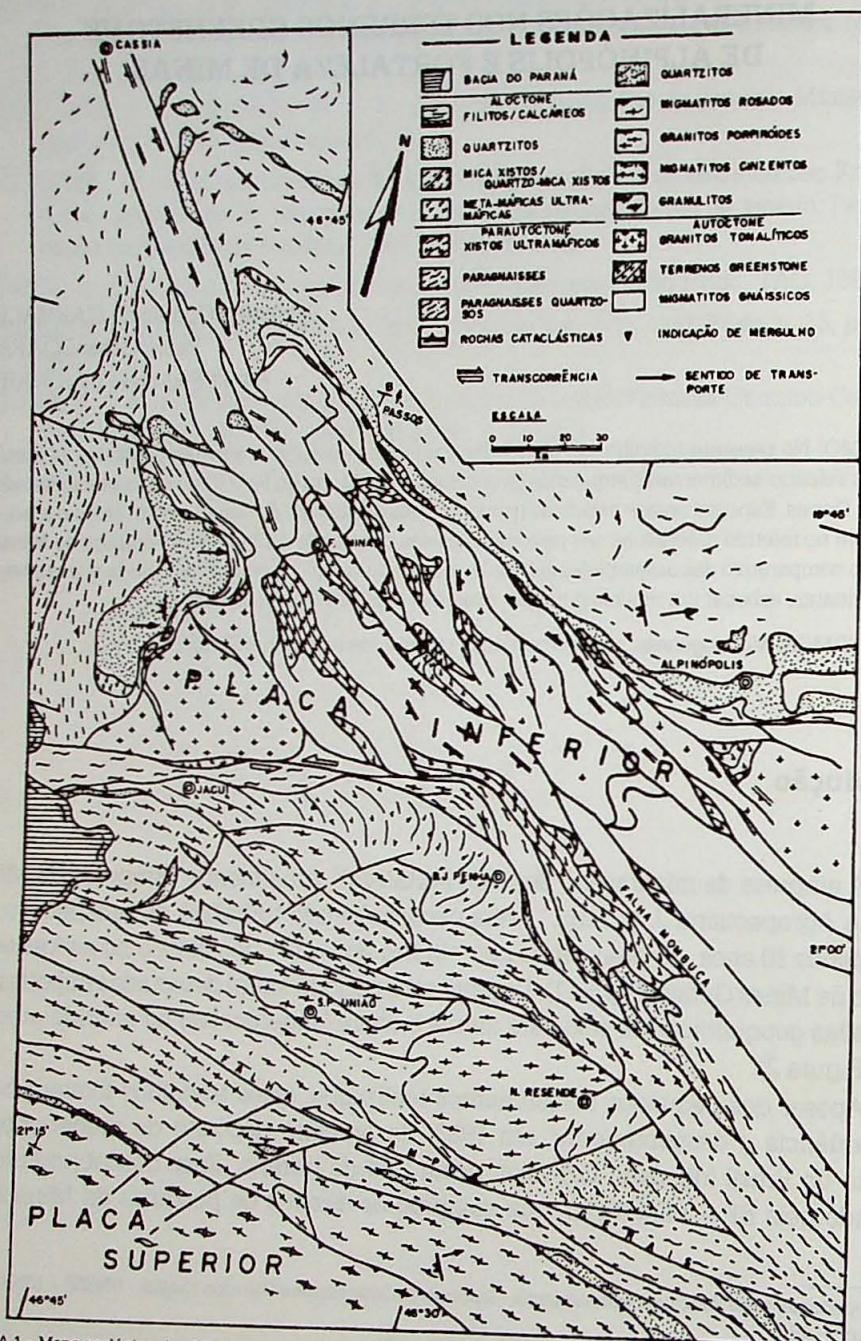


FIGURA 1 – Mapa geológico simplificado, mostrando a distribuição dos terrenos granito-greenstone no sul de Minas Gerais. Fonte: L. de Soares, 1990.

Dando continuidade aos seus trabalhos prospectivos, a empresa estendeu suas pesquisas para áreas vizinhas e, em particular, para a seqüência vulcão-sedimentar de Alpinópolis, também integrante do *greenstone belt* "Morro do Ferro". Nesta seqüência, através de furos de sondagem, foram detectados vários corpos mineralizados a sulfetos, em muitos aspectos comparáveis aos de Fortaleza de Minas. No presente trabalho pretende-se apresentar parte dos resultados obtidos na seqüência vulcão-sedimentar de Alpinópolis, dando ênfase às suas mineralizações, fazendo comparações preliminares com aquelas que ocorrem em Fortaleza de Minas (depósito O'Toole).

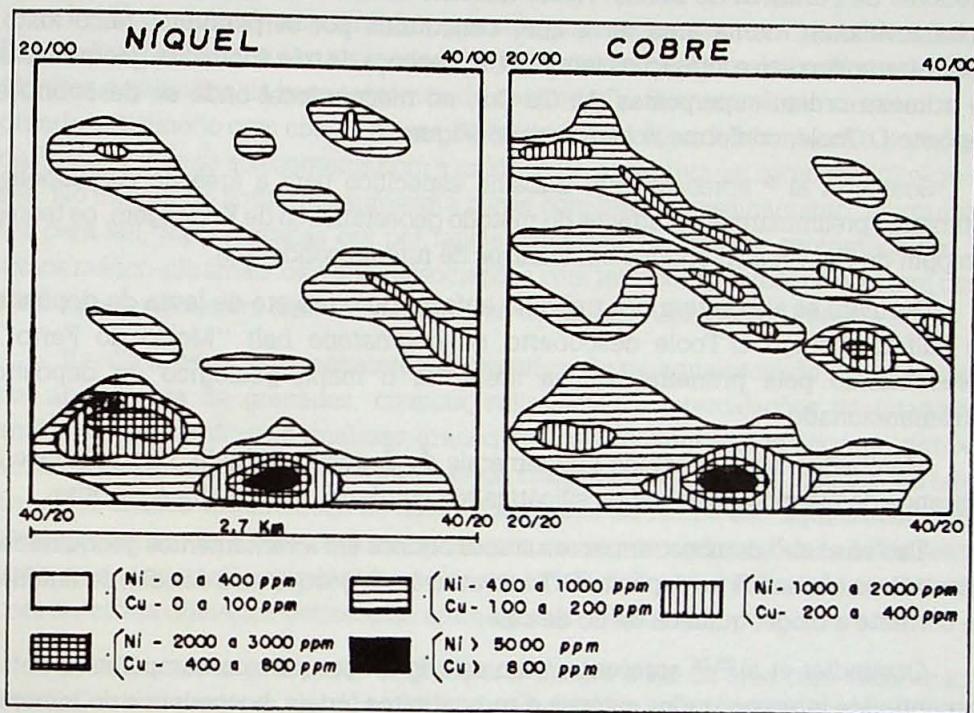


FIGURA 2 – Anomalias geoquímicas de solo para níquel e cobre no *greenstone belt* "Morro do Ferro" nas proximidades da cidade de Fortaleza de Minas (MG).

Trabalhos anteriores

Os primeiros trabalhos geológicos executados no *greenstone belt* "Morro do Ferro" foram realizados pela Companhia Eletro-Metalúrgica de Ribeirão Preto (SP), que explorou a formação ferrífera Bandada do Morro do Ferro entre 1922 e 1925.¹

Durante os trabalhos de avaliação desta jazida, foram encontrados indícios de mineralizações niquelíferas (garnieritas) no então denominado Morro Pelado, que corresponde hoje à jazida do Morro do Níquel. Desta maneira, as primeiras referências geológicas com objetivos econômicos na região, tais como Moraes,²⁰ Santivanez,²⁷ Swensson³³ e Griffon e Richter,¹³ tratam da geologia, economicidade e metalurgia da jazida Morro do Níquel.

Posteriormente, Alecrim & Pinto² fazem um estudo de prospecção geoquímica regional, detectando, nas diferentes unidades geológicas próximas de Fortaleza de Minas, anomalias Pb, Zn, Cu, Co, Mn e Cr.

Carvalho⁷ faz um estudo avaliando a geologia e o potencial de mineralização dos arredores de Fortaleza de Minas. Neste trabalho os dados de geoquímica de solo e rocha revelaram, numa área de 4 km², constituída por serpentinito, talco xisto, clorita-tremolitaxisto e formações ferríferas, a presença de três anomalias geoquímicas de primeira ordem superpostas (Ni-Cu-Co), no mesmo local onde se descobriu o depósito O'Toole, conforme já mencionado (Figura 2).

Soares et al.²⁹ apresenta um trabalho específico para a área de Alpinópolis, estimando preliminarmente, através do método geoestatístico de Krigeagem, os teores em ppm de Cu, Zn e Ni obtidos em análises de furo de sondagem.

Germani et al.¹¹ fazem um trabalho enfocando o projeto de lavra do depósito de sulfeto maciço O'Toole descoberto no *greenstone belt* "Morro do Ferro", apresentando pela primeira vez na literatura o mapa geológico do depósito retromencionado.

Marchetto¹⁹ faz um estudo dos minerais do depósito O'Toole, dando ênfase à presença de platinóides na ganga silicática em pentlandita, cobaltita e pirrotita.

Taufen et al.³⁴ demonstram os resultados obtidos em levantamentos geoquímicos orientativos efetuados no depósito O'Toole através de geoquímica de solo, sedimento de corrente e biogeoquímica de pé de café.

Oostindier et al.^{25,26} apresentam um estudo litogegeoquímico comparativo entre serpentinitos intemperizados estéreis e serpentinitos férteis, hospedeiros de mineralizações niquelíferas em Fortaleza de Minas.

Carvalho⁸ em tese de doutoramento aborda a geologia, petrologia e metalogenia da seqüência vulcano-sedimentar de Alpinópolis.

No que concerne à geologia local e regional existe um grande volume de informações que estão consubstanciadas em trabalhos diversos, entre os quais destacam-se Teixeira³⁵ e Teixeira et al.^{36,37} a quem coube a primazia de caracterizar e definir o *greenstone belt* "Morro do Ferro". Outros trabalhos com enfoque local para o referido greenstone na área são devidos a Carvalho et al.⁶, Choudhuri et al.,⁹ Morales et al.,²¹ Oliveira et al.,²⁴ Schmidt,²⁸ Marchetto et al.,¹⁸ Teixeira et al.³⁸ e Szabó.³²

Aspectos da geologia regional

As manifestações vulcano-sedimentares arqueanas (*greenstone belt* "Morro do Ferro") no sul de Minas Gerais, próximas das cidades de Jacuí, Nova Resende, Alpinópolis e Fortaleza de Minas, estão localizadas em uma área de geologia excepcionalmente complexa, dominada por quatro grandes conjuntos litológicos: (I) Complexo de migmatitos e granitos gnáissicos, com terrenos greenstone embutidos; (II) Complexo de paragnasses, com intercalações de xistos, quartzitos e migmatitos; (III) Complexo granulítico-migmatítico; e (IV) Complexo de filitos, xistos e quartzitos, com intercalações de mármore e xistos máfico-ultramáficos.³⁰

I – *Complexo de migmatitos e granitos gnáissicos*. Ocorre a norte da falha de Riacho Fundo (Jacuí) e é contornado a oeste, norte e nordeste pelo conjunto de filitos, filonitos e milonitos da base tectônica do conjunto IV. Sua ocorrência caracteriza um grande anticlinório com eixo noroeste, balizado pelas falhas de Mombuca e Bom Jesus da Penha. Próximo aos contatos com a unidade IV, apresenta-se como milonito-gnisses. No interior do antiforme apresenta zonas com intenso cisalhamento, mergulhantes para sul, representadas ora por faixas cataclásticas, ora por protomilonitos. Os xistos máfico-ultramáficos e suas associações com terrenos greenstone ocorrem como restos preservados em sinformes (Fortaleza de Minas, Alpinópolis, Petúnia etc.).

II – *Complexo de paragnasses-migmatitos*. Os paragnasses são caracterizados por abundância de granadas, cianitas, sillimanitas e intercalações de quartzitos, anfibolitos granatíferos e gnaisses granodioríticos; os migmatitos ocorrem também em faixas leste-oeste, com tipos de anatexia cinzentos, de injeção e rosados. As faixas de xistos máfico-ultramáficos de Jacuí-Bom Jesus da Penha são aqui consideradas como pertencentes a este conjunto gnássico de origem sedimentar e não correlatas aos terrenos greenstone embutidos no conjunto I. Teixeira et al.³⁸ chamaram a atenção para a notória diferença petrológica entre os dois conjuntos.

III – *Complexo granulítico-migmatítico*. Ocorre a sul da área com estruturação WNW. Contém gnaisses charnoquíticos e enderbíticos, granulitos básicos, intercalados com gnaisses granodioríticos a hornblenda, biotita, migmatitos e quartzitos.

IV – *Complexo de filitos, xistos e quartzitos*. Ocorre a norte da falha de Riacho Fundo (Jacui), contornando o Complexo I. Apresenta três fatias tectônicas: uma basal, alóctone sobre o embasamento gnássico-migmatítico, constituída de filitos, filonitos, mármore, clorita, biotita, anfibólito, granada xistos e corpos de rochas máfica-ultramáficas serpentinizadas e xistificadas. O grau metamórfico aumenta progressivamente para oeste, notadamente de Alpinópolis para Serra do Chapadão, a oeste de Fortaleza de Minas: da zona da clorita para a zona da almandina. A fatia intermediária é formada por milonitos, filonitos, quartzitos e muscovita-quartzo xistos. Estão intensamente transpostos, numa foliação referida como C2, cortando uma anterior

(S1), cuja intersecção gera uma lineação "b" bem desenvolvida; dobras rompidas são comuns. A fatia superior é uma espessa associação de muscovita e biotita xistos, com intercalações de quartzitos, hornblenda gnaisses, xistos granatíferos e ortoanfibolitos. O grau metamórfico também aumenta de leste para oeste. O pacote também está transposto, o que é mais evidente nos xistos micáceos com lineações "a" de estiramento mineral bem desenvolvidas nos planos de cisalhamento dos xistos; lentes sigmoidais mostrando o par "SC" são comuns. Com freqüência são observados remanescentes de xistosidade pretérita em micrólitos.

O arranjo desses conjuntos litológicos em termos geotectônicos foi interpretado por Soares et al.³⁰ como de uma região de cavalgamento de ante-país ou placa cavalgada, conforme mostra a Figura 1. É esta situação que permitiu a preservação das associações supracrustais de Alpinópolis e Fortaleza de Minas.

Geologia das concentrações sulfetadas em Alpinópolis

Os corpos com mineralizações sulfetadas em Alpinópolis foram detectados em profundidades diversas através de furos de sondagem (Figura 3). No presente estudo foram considerados apenas aqueles que apresentam uma quantidade mínima de 10% de sulfeto (em peso) e espessura superior a 50 centímetros. Nos locais onde ocorrem estas mineralizações, trabalhos de natureza geofísica, tais como eletromagnetometria (EM) e polarização induzida (IP), forneceram evidências de que estes corpos são contínuos por uma extensão superior a 500 metros. As Figuras 3 e 4 mostram que na sua totalidade as mineralizações hospedam-se em rochas metaultrabásicas e metassedimentares, ou nos contatos entre um tipo e outro, estando ausentes nos litotipos metabásicos. Pode-se assim observar que cinco corpos sulfetados ocorrem encaixados exclusivamente em rochas metaultrabásicas (clorita-actinolita/tremolita xisto com pseudomorfos de olivina, talco xisto ou no contato entre os dois litotipos). Hospedados somente em metassedimentos (granada-biotita-xisto) ocorrem sete corpos que são geralmente os mais enriquecidos (clinzoisita-actinolita-tremolita), com até 60% de sulfeto, apresentando localmente espessuras superiores a cinco metros. Finalmente, no contato metassedimento/metaultrabásica ocorrem sete corpos mineralizados.

Essas mineralizações, quando observadas no seu conjunto, exibem um notável paralelismo entre si (Figura 4), com direção geral N20W a N40W. Essa orientação baliza a direção da foliação principal (milonítica), que por sua vez é controlada por um conjunto de falhas (zona de cisalhamento) na área. Estas feições caracterizam o forte domínio tectônico na formação destas mineralizações, e confirmam seu caráter pervasivo em relação aos controles litológicos, mostrando que estes corpos enriquecidos se alojam dentro de zonas de falhas, resultando a configuração espacial observada na Figura 4.

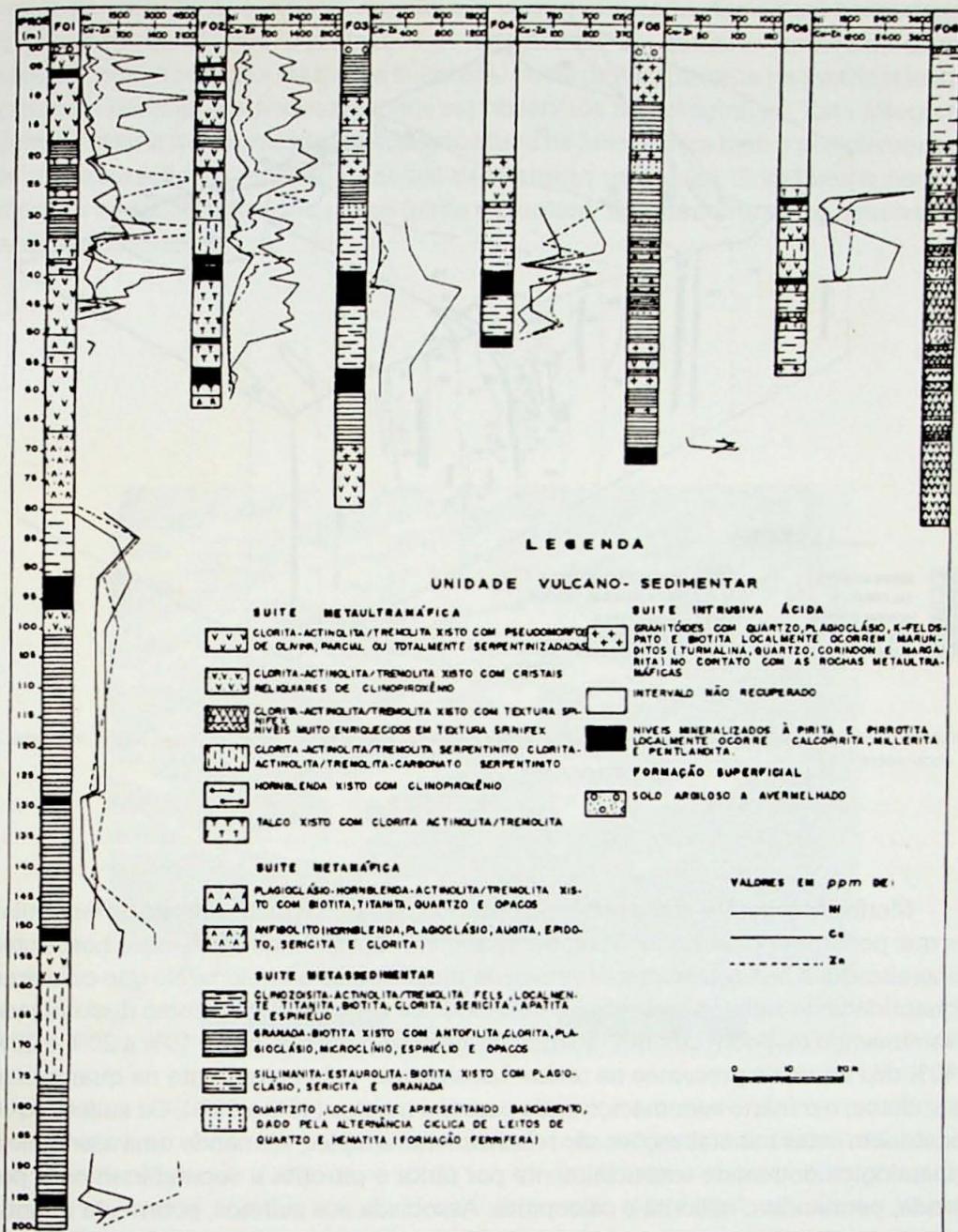


FIGURA 3 – Perfis de furos de sondagens realizadas no greenstone belt "Morro do Ferro" (imediações de Alpinópolis), mostrando a distribuição de níquel, cobre e zinco em diferentes litologias e níveis com concentrações stratabound de sulfetos.

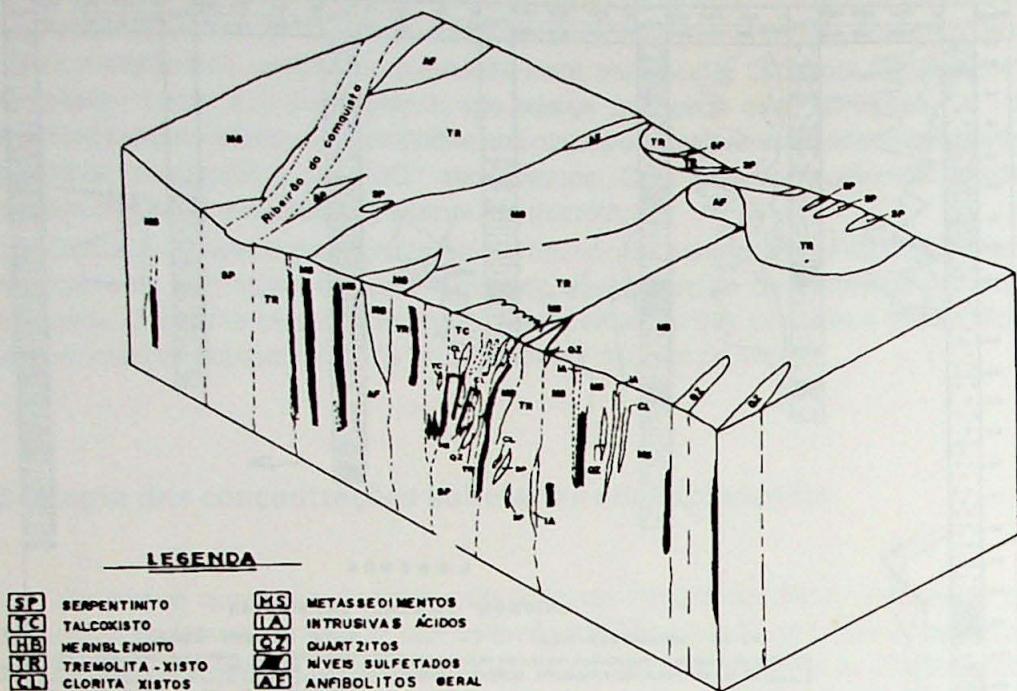


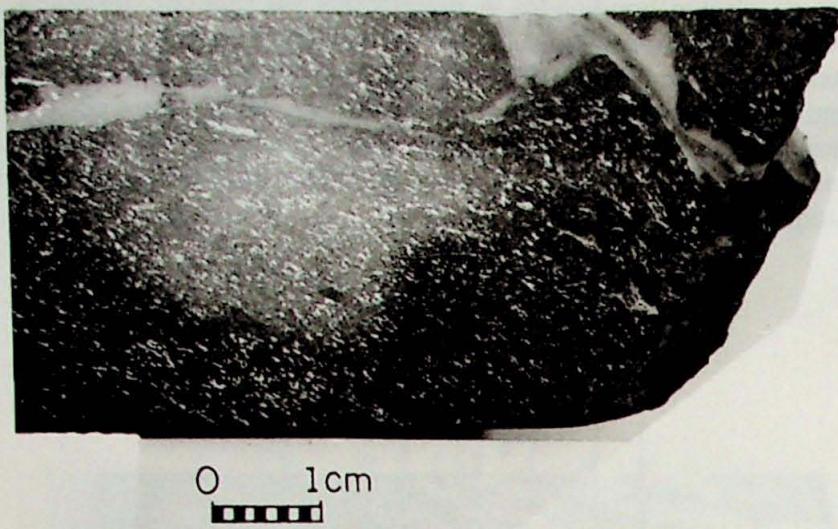
FIGURA 4 – Bloco-diagrama mostrando a localização em profundidade e as relações espaciais entre corpos sulfetados e encaixantes.

Morfologicamente essas concentrações constituem corpos estreitos e lenticulares que podem ser classificados como *stratabound*. Os contatos entre esses horizontes mineralizados e suas encaixantes variam de transicionais a bruscos. No que concerne à quantidade de sulfetos presentes, o minério pode ser classificado como disseminado e semimaciço respectivamente, quando os sulfetos perfazem entre 10% a 20% e 20% a 40% dos minerais presentes na rocha. Localmente, pelo incremento na quantidade de sulfetos, o minério semimaciço pode passar a maciço (40% a 80%). Os sulfetos que constituem estas mineralizações são relativamente simples, formando uma assembléia mineralógica dominada essencialmente por pirita e pirrotita e secundariamente por blenda, pentlandita, millerita e calcopirita. Associada aos sulfetos, ocorre em quantidades subordinadas uma assembléia de óxidos, que contém magnetita, ilmenita, rutilo e cromoespinélio. Embora simples em termos quantitativos e qualitativos, eventos tectônico-metamórficos atuantes na área provocaram modificações intensas em ambas as assembléias.

Os processos deformacionais que atingiram a área provocaram modificações texturais, estruturais e compostionais nos corpos mineralizados e suas hospedeiras. A presença de clastos boudinados e deformados de quartzo, tremolita, clorita, granada, etc., no interior da massa sulfetada, ou de pirita e pirrotita na matriz silicática formando brechas mineralizadas pode ser observada na Fotografia 1. Esta fotografia, além de ilustrar a deformação intensa que atuou na área, marca bem o posicionamento da mineralização na foliação principal de natureza milonítica. Localmente pode-se observar remobilizações de sulfetos (pirita e pirrotita), ligadas a processos hidrotermais tardios (Fotografia 2).



FOTOGRAFIA 1 – Minério tipo semimaciço constituído por pirrotita e pirita. Observar os fragmentos encaixantes (clastos deformados) envolvidos por sulfetos. No interior dos clastos é possível identificar antigos planos de foliação marcados por sulfetos, agora dobrados.



FOTOGRAFIA 2 – Minério disseminado constituído predominantemente por piritas dispostas ao longo da foliação. Veios de quartzo ligados possivelmente a processos de descompressão cortam esta foliação.

Pirita (py) e pirrotita (po) são os dois sulfetos onipresentes e dominantes nestas mineralizações. Localmente um pode suplantar o outro e representam a quase totalidade (100%) dos minerais de minério. Estudos em secções polidas mostram que a formação destes minerais se deu através de várias etapas de mineralizações. A geração mais antiga (PY1 e PO1) foi reconhecida somente nas litologias metaperidotíticas, na forma de cristais diminutos (inferiores a 0,1mm), e deve estar relacionada a remanescentes dos sulfetos primários disseminados no magma ultrabásico de foliação komatiítica. O segundo tipo de pirita e pirrotita (PY2 e PO2) forma as principais concentrações (disseminado e semimaciço) sulfetadas da área. São caracterizadas por uma superfície impregnada por material microcristalino reliquiário, que representa uma foliação mais antiga (Fotomicrografia 1). Processos de metamorfismo acompanhado de deformação intensa na área afetam concentrações previamente formadas, provocando brechação (Fotomicrografia 2) e mistura tectônica com as encaixantes silicatadas, levando ao desenvolvimento de um bandamento no minério (Fotomicrografia 3) e caracterizando no conjunto um fluxo cataclástico, originando assim uma nova geração de pirita e pirrotita (PY3 e PO3). Sob a ação desse metamorfismo, as pirrotitas formadas anteriormente (PO2) patrocinam localmente a formação de exsoluções de calcopirita e pentlandita, além de sofrerem uma recristalização generalizada (*annealing*). Com a continuidade do processo e incremento de temperatura, formam-se novas piritas

(PY4), bem cristalizadas com formas édricas. Uma última geração de pirita e secundariamente pirrotita (PY5 e PO5), caracterizada na área, pode ser observada em zonas de fraturas das encaixantes, via de regra preenchidas por quartzo com pouca ou nenhuma deformação, possivelmente originada pela ação de soluções hidrotermais (Fotografia 2).

A blenda (bl) é um mineral relativamente comum nos níveis sulfetados em metassedimentos e metavulcânicas. Nas metavulcânicas ocorrem leves disseminações interpretadas como de uma primeira geração. Nos metassedimentos ela é mais abundante e se localiza sempre em fraturas e planos de cataclase das rochas, e em ambos os litotipos nunca ultrapassam 1% do total dos sulfetos presentes. Apresentam granulações finas, inferiores a 0,1 mm, e seus cristais são predominantemente xenomórficos. O seu posicionamento sempre em fraturas bem como a ausência de deformações intensas são evidência de uma segunda geração de blenda ligada a manifestações hidrotermais tardias, durante o último evento metamórfico (fácie xisto verde) que afetou a área (Fotomicrografia 4).

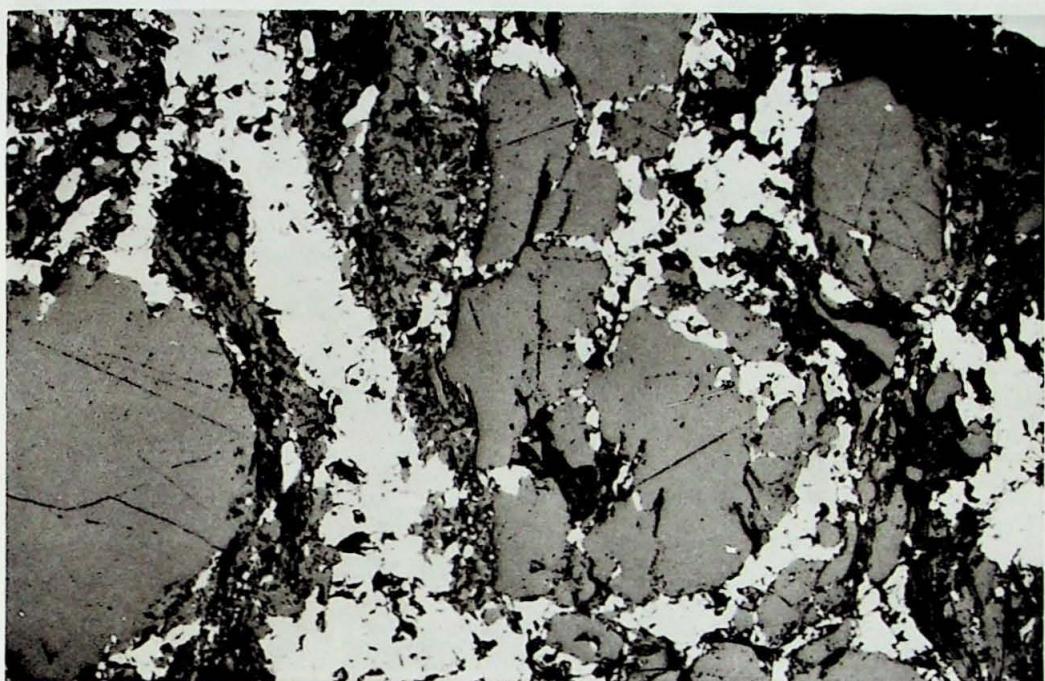
Calcopirita (cp) ocorre dispersa irregularmente na massa sulfetada como fracas disseminações. Forma grãos regulares (hipidiomórficos) e irregulares (xenomórficos), podendo ainda se apresentar na forma de lamelas de exsolução no interior de pirrotitas. No que concerne às suas relações temporais é possível observar uma geração mais antiga em contato com pirrotita e pirita (PY2 e PO2), uma segunda geração como exsolução em pirrotitas (PO2) e, finalmente, uma terceira geração de calcopirita, que se faz presente na área, corresponde a formas bem cristalizadas (Fotomicrografia 4) em zonas de fraturas na rocha e em íntima associação com blenda.

As pentlanditas (pnt) presentes nos níveis sulfetados em Alpinópolis ocorrem de duas maneiras específicas. O primeiro tipo (Pnt-1) forma predominantemente disseminações finas inferiores a 0,02 mm, no interior de porfiroblastos de antigas olivinas (hoje tremolitas). Localmente pode ocorrer na matriz metaperidotítica com forma de glóbulos de dimensões variáveis entre 0,002 mm e 0,3 mm (Fotomicrografia 5). Em ambos os casos apresentam deformações controladas pela foliação principal e estão intimamente associadas a pirrotitas e magnetitas. Essas pentlanditas foram interpretadas como tendo uma origem ligada a processos de diferenciação magmática primária.

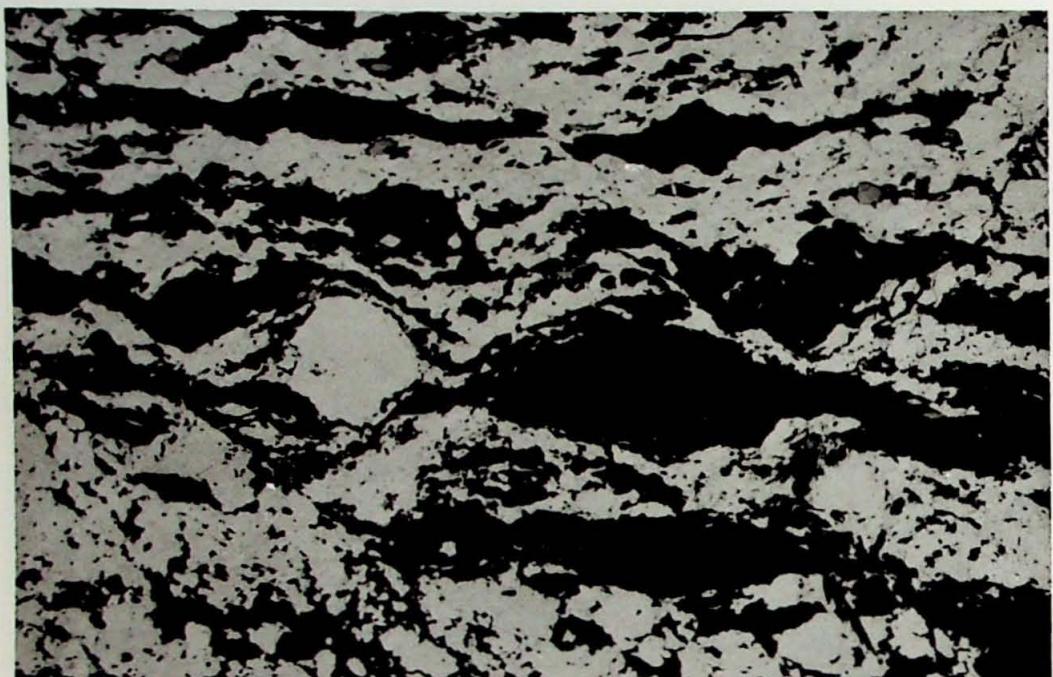
O segundo tipo (Pnt-2) ocorre como exsoluções em pirrotitas (PO2) caracterizadas como de segunda geração. Geralmente essas exsoluções só ocorrem no minério semimáciço, quer seja hospedado em metassedimento, quer seja hospedado em metavulcânica, e quando a pirrotita é o sulfeto predominante. Além de pentlandita, que é o principal mineral do minério de níquel, ocorrem ainda disseminações submicroscópicas de millerita, no interior de pseudomorfos de olivina, e que só puderam ser identificadas através de estudos em microssonda eletrônica.



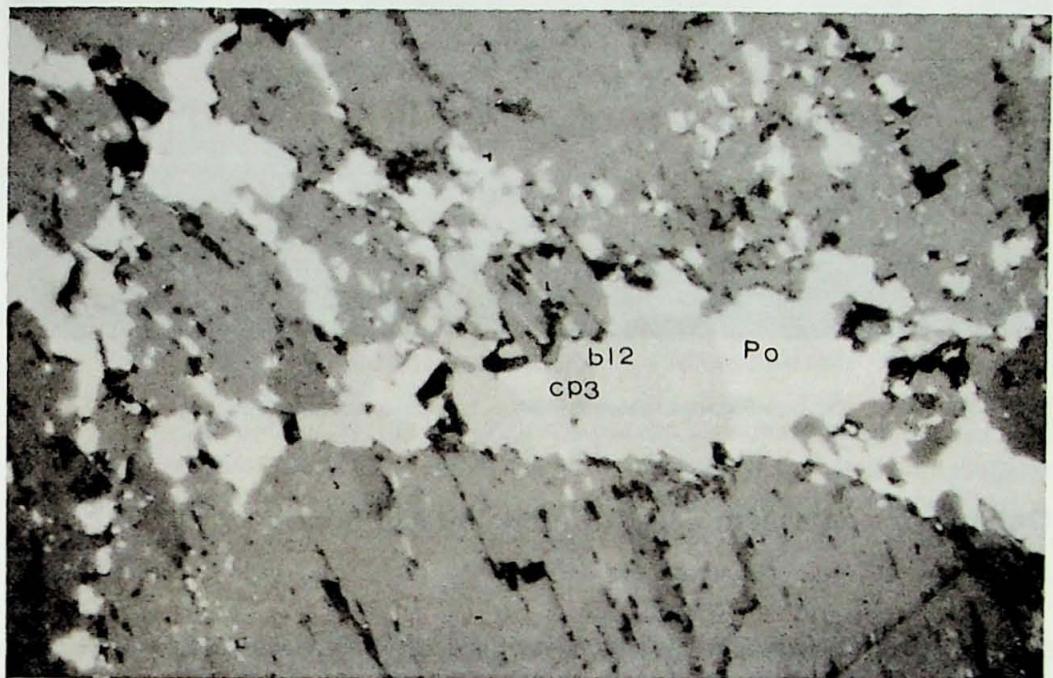
FOTOMICROGRAFIA 1 – Aspectos de duas gerações distintas de pirita em planos de foliações também distintos. A pirita mais antiga (PY2) ocorre como uma massa (com início de recristalização) associada a uma foliação caracterizada pela presença de restos de minerais silicatados microcristalinos no seu interior. A segunda geração (PY3) está intensamente deformada ao longo da foliação "S". Mais atentamente, pode-se observar início da formação de uma nova geração de piritas (PY4) através de processos de recristalização nas duas gerações anteriores.



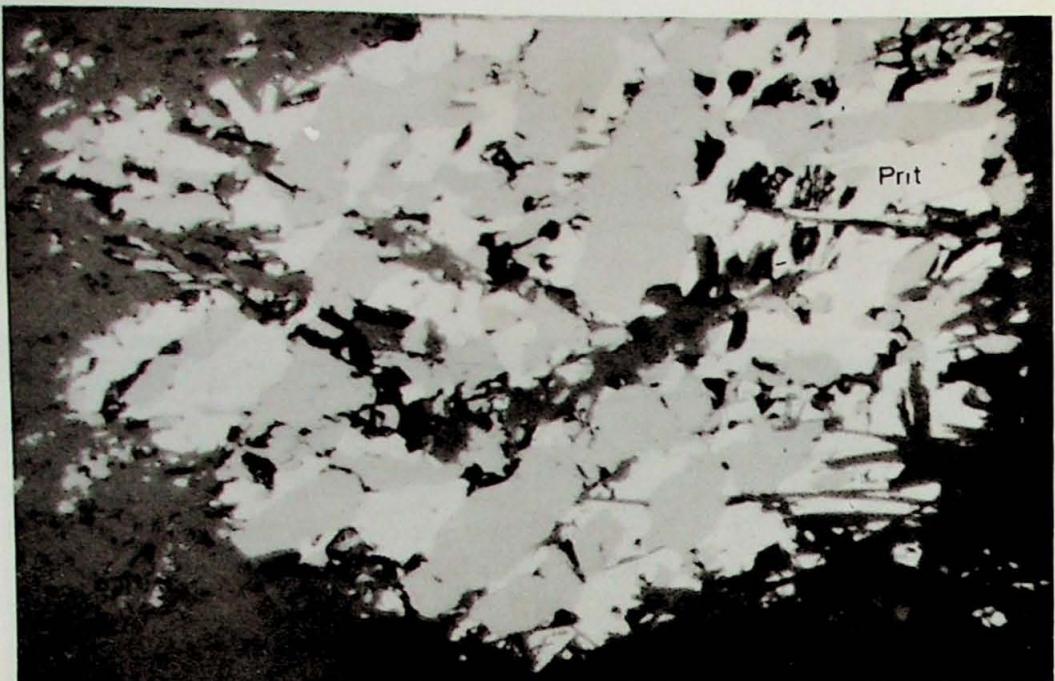
FOTOMICROGRAFIA 2 – Porfiroclastos de tremolitas com formas ovaladas, entremeados por pirrotitas e pirita. É possível observar zonas de moagem parcialmente recristalizada próximo aos clastos, com sulfetos em posições intermediárias caracterizando “fluxo cataclástico”.



FOTOMICROGRAFIA 3 – Sulfeto maciço bandado constituído pela alternância de leitos de tremolita, pirrotita e secundariamente pirita, concordante com a foliação principal (C2). Pode-se observar que cristais de pirita mais antigos exibem franjas de recristalização nas quais a pirita se altera para pirrotita. Os silicatos são subordinados e exibem um comportamento similar aos sulfetos, embora possam-se observar localmente zonas de moagens mais intensas junto aos contatos sulfetos/silicatos.



FOTOMICROGRAFIA 4 – Pirrotitas, esfaleritas (bl-2) e calcopirita (cp-3) preenchendo fraturas perpendiculares aos planos principais de fraturamento. Esses planos principais são paralelos à foliação cataclástica da rocha.



FOTOMICROGRAFIA 5 – Detalhe de pentlanditas globulares (pnt-1) em matriz metaperidotítica associadas com magnetita.

Geoquímica da assembléia sulfetada de Alpinópolis

Análises químicas rotineiras para dosagem de teores dos elementos Cu-Zn-Ni foram realizadas em testemunho de vários furos de sondagens, tais como aqueles de números 01, 02, 03, 04, 05 e 08, cuja distribuição em termos de teores está impressa na Figura 3.

No furo de sondagem 01 (Figura 3) os resultados analíticos de 87 amostras revelam, de um modo geral, que o cobre e o zinco possuem uma boa correlação nos intervalos metassedimentares onde estão presentes as concentrações sulfetadas. Os conteúdos de zinco, em particular, são bastante elevados, com valores crescentes a partir de 150 metros de profundidade, atingindo valores máximos de 0,38% na profundidade de 195,70 metros. Além desses, outros intervalos, tais como nos de 24, 31 e 33 metros, também apresentam teores elevados de zinco, da ordem de pelo menos cinco vezes os valores de *background* (330 ppm). Os pequenos deslocamentos apresentados pelo elemento zinco em relação aos níveis sulfetados se devem ao sistema de amostragem empregado (uma análise a cada metro). O cobre apresenta um comportamento semelhante ao do zinco, apresentando valores crescentes e

máximos nos mesmos intervalos onde o zinco também é máximo. O valor máximo obtido para o cobre no nível de 85,1 metros, atinge uma concentração da ordem de 0,12%. O elemento níquel não apresenta uma boa correlação com o cobre e o zinco e, geralmente onde os valores de zinco e cobre são máximos, os de níquel são decrescentes. Quando se considera o sistema de amostragem empregado (metro a metro), fica óbvio que os valores de níquel foram diluídos pela mistura de amostra de rochas metaultrabásicas com metassedimentos. No entanto, esses valores são suficientemente elevados para caracterizarem sua presença também nos níveis sulfetados localizados nos metassedimentos, e não somente associados às rochas vulcânicas (serpentinitos, talco xisto e tremolita-xistos), como ocorre naturalmente.

No furo de sonda 02 (Figura 3), foram realizadas 63 análises químicas, com dosagem para os mesmos elementos discutidos no furo de sondagem 01 (Cu, Zn e Ni). Nota-se aí que cobre e zinco, além de apresentarem uma boa correlação entre si, se correlacionam também com o níquel. Observa-se que, com raras exceções, quando um elemento mostra valores crescentes de teores, os outros elementos apresentam comportamento similar. Apesar disso o valor máximo dosado para níquel é em torno de 0,29% em talco xisto e o teor de cobre é de 0,04% em metassedimentos. Este é um dos perfis que mostra que os níveis sulfetados, quando hospedados em litologias ultrabásicas/ultramáficas, comparativamente com aqueles hospedados em metassedimentos, não apresentam grandes variações no comportamento dos teores dos elementos. Esse fato demonstra mais uma vez que essas concentrações não são litológicas e apresentam um comportamento similar nas diferentes litologias. Vale ressaltar que essas concentrações de sulfetos apresentam-se intensamente deformadas e ocupam zonas de cisalhamento nas rochas vulcânicas ou então ocorrem em locais poupadados pela deformação intensa. Os valores de níquel, muito mais elevados neste perfil do que nos demais, são facilmente explicados face às litologias apresentadas.

Nos furos 03, 04, 05 e 06 (Figura 3) o conjunto de valores de teores para Ni, Zn e Cu tem comportamento similar ao que foi comentado para o furo 02, com teores de níquel muito elevados. No furo 03, onde dominam litologias metassedimentares e intrusivas ácidas, os teores de níquel nos níveis sedimentares atingem mais de 0,1%. Essa situação se repete para os furos 04, 05 e 06, atestando que o níquel faz parte das assembléias sulfetadas hospedadas nos metassedimentos, cabendo portanto o mesmo raciocínio efetuado para o furo de sondagem 02.

Algumas análises químicas para Cu, Zn e Ni foram feitas nos testemunhos de sondagens do furo 08. Esse furo mostra uma possível sucessão de derrames peridotíticos em perfil com pouca ou nenhuma intercalação de metassedimentos. A presença de pequena quantidade de sulfetos nesses furos ostenta os mesmos processos deformacionais retromencionados. As análises químicas efetuadas mostram baixíssimos teores de Zn e Cu, e valores normais para o níquel nestas litologias; e por esta razão não foram plotados ao longo do referido furo.

De uma maneira geral os maiores teores de Cu, Zn e Ni correspondem a níveis enriquecidos em sulfetos, onde se tem a presença de calcopirita, esfalerita e pirrotita com exsoluções de pentlandita.

Geologia das concentrações sulfetadas em Fortaleza de Minas

O greenstone belt "Morro do Ferro", nas imediações de Fortaleza de Minas (Figura 5), é caracterizado por três conjuntos litológicos, denominados: unidades metaultrabásica, metabásica e metassedimentar.^{6,7}

O conjunto metaultrabásico é constituído por serpentinitos (podendo conter quantidades subordinadas de talco, clorita, carbonato e actinolita/tremolita), talco xisto e piroxenitos que originariamente deveriam corresponder a litotipos peridotíticos e piroxéníticos. O conjunto metabásico é formado essencialmente pelos litotipos clorita-tremolita/actinolita xisto, talco-clorita xisto e talco-clorita-tremolita/actinolita xisto, interpretados tentativamente como litologias basálticas originais.

Os litotipos metassedimentares ocorrem intercalados e em íntima associação com as rochas metaultrabásicas e metabásicas (Figura 5), correspondendo a rochas quartzíticas monominerálicas, metacherts grafitosos e formações ferríferas bandadas, definidas pela alternância cíclica de leitos quartzosos e hematíticos.

O depósito de níquel-cobre e cobalto (depósito O'Toole), com reservas de 5,44 milhões de toneladas de minério, com teores de 2,72% de Ni; 0,45% de Cu; 0,06% de Co de 1,3 ppm de platinóides (Marchetto¹⁹), foi detectado através de furos de sondagens nas imediações de Fortaleza de Minas. A Figura 5 mostra a localização geológica do depósito no contato entre serpentinito/metacherts; serpentinito e clorita-actinolita/tremolita xisto.

O corpo mineralizado tem orientação N40W, que é também a direção da foliação principal CF-2, sendo que ambas as orientações são controladas por um conjunto de falhas paralelas que cortam toda a área, gerando uma zona de cisalhamento que localmente atinge mais de 4 km de largura. Dessa maneira o corpo de minério O'Toole é controlado tectonicamente por essas falhas, o que explica o seu comportamento pervasivo em relação às litologias encaixantes, podendo ser classificado em termos morfológicos como do tipo *stratabound*.

Os mesmos processos deformacionais descritos para Alpinópolis afetaram também a região de Fortaleza de Minas, provocando modificações texturais, estruturais e compostionais no corpo mineralizado O'Toole e em suas encaixantes. Como em Alpinópolis, essa deformação é atestada pela presença de clastos boudinados e deformações de quartzo, tremolita, clorita etc., com o minério exibindo feições de cisalhamento, recristalização, brechação, bandamento tectônico e remobilização.

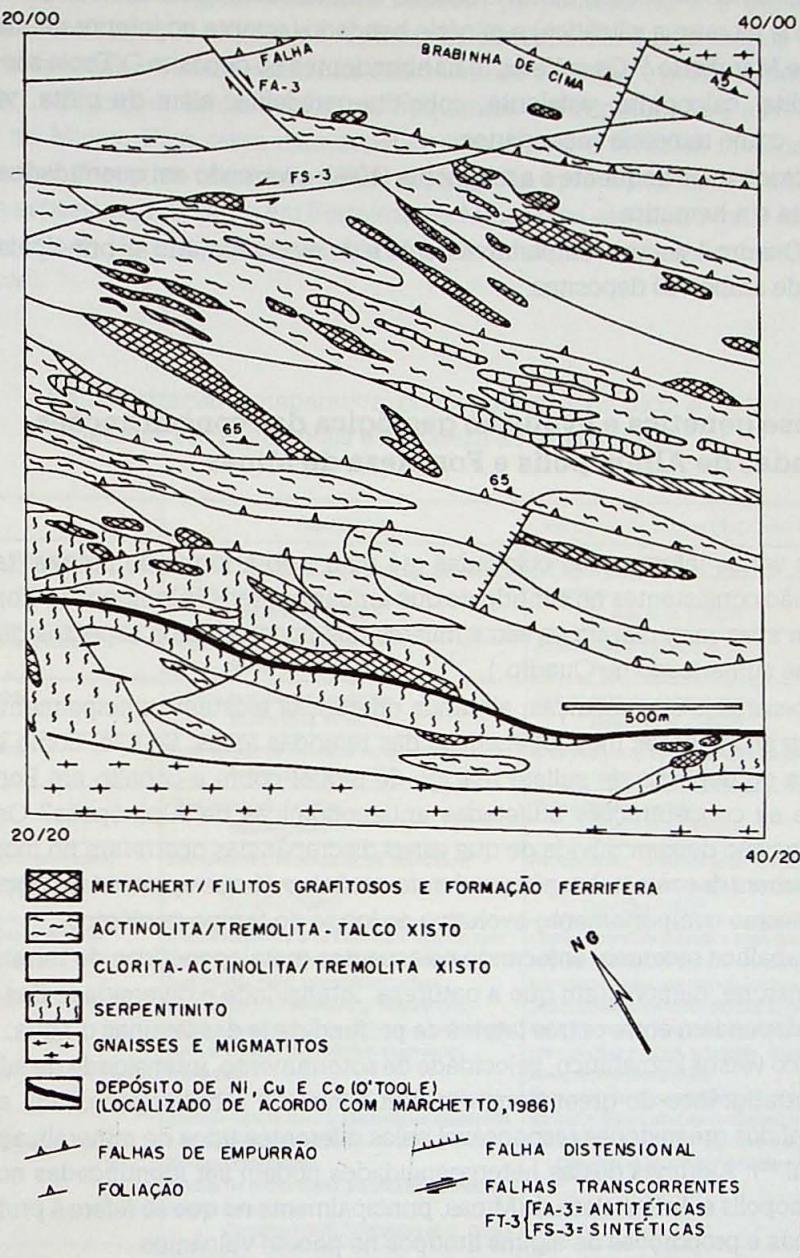


FIGURA 5 – Mapa geológico simplificado da área de Fortaleza de Minas, parte do greenstone belt "Morro do Ferro". Notar a lenticularização de corpos produzida por transposição de baixo ângulo (CFM-22), posteriormente dobrada e faltada por FP-3 (SMF-3). Modificado de Carvalho, 1983.

O minério foi classificado (baseando-se principalmente nos seus aspectos texturais) como intersticial (minério primário), brechóide (matriz de sulfeto maciço, com fragmentos de rochas metavulcânicas e metassedimentares), stringuer (cordões de sulfetos na massa silicática) e minério bandado (sempre no interior de metachert), conforme Marchetto.¹⁹ Os sulfetos mais abundantes no depósito O'Toole são pirrotita, pentlandita, calcopirita, esfalerita, cobaltita-gersdorffita, além de pirita, violarita e bravoita, como minerais secundários.

O óxido mais freqüente é a magnetita (10%), ocorrendo em quantidades menores a ilmenita e a hematita.

O Quadro 1 ilustra comparativamente e de modo sumário as principais características de ambos os depósitos.

Hipótese genética e evolução geológica das concentrações sulfetadas de Alpinópolis e Fortaleza de Minas

As várias informações colocadas até aqui, sob a forma de figuras, tabelas ou textos, são consistentes no sentido de que ambas as áreas (Alpinópolis e Fortaleza de Minas) e suas mineralizações são similares nos mais variados aspectos geológicos, conforme summarizado no Quadro 1.

Apesar das semelhanças, algumas diferenças existem principalmente no que concerne aos padrões metalogenéticos das referidas áreas. Se não, como explicar a presença do depósito de sulfeto maciço de níquel-cobre e cobalto em Fortaleza de Minas e as concentrações sulfetadas antieconômicas de Alpinópolis? Os estudos realizados não deixam dúvida de que essas discrepâncias ocorreram no momento do *emplacement* das mineralizações no fundo oceânico, já que apresentam rigorosamente um mesmo comportamento evolutivo ao longo do tempo geológico.

Trabalhos recentes, enfocando os aspectos metalogenéticos de terrenos grani-to-greenstone, demonstram que a natureza, intensidade e diversidade das mineralizações dependem entre outros fatores da profundidade das lâminas d'água: vulcanismo félscio versus komatiítico, velocidade de soterramento, intensidade de falhamento, nível estratigráfico do greenstone etc. Em resumo é a heterogeneidade espacial e temporal dos greenstones responsável pelos diferentes tipos de mineralizações (Groves et al.¹⁶). Algumas destas heterogeneidades podem ser identificadas no terrenos de Alpinópolis e de Fortaleza de Minas, principalmente no que se refere à profundidade das águas e proporções de alguns litotipos no pacote vulcânico.

No que concerne à profundidade da lâmina d'água, pode-se observar que os metassedimentos presentes em Fortaleza de Minas são predominantemente ortoquímicos (formações ferríferas na fácie silicato, óxido, grafite e sulfeto), refletindo assim um ambiente marinho profundo. Em Alpinópolis a presença de formações ferríferas (fácie

silicato e óxido) é subordinada, dominando os sedimentos clásticos aluminosos (granada-biotita xisto, tremolita-biotita-xisto etc.) e caracterizando uma menor profundidade da lâmina d'água. Um outro aspecto preponderante é a presença de anfibolitos (basaltos), que na área de Alpinópolis corresponde a pelo menos 20% das litologias mapeadas, enquanto em Fortaleza de Minas este tipo é muito subordinado. Além disso, infiltrações ácidas são muito freqüentes em Alpinópolis e ausentes em Fortaleza de Minas. Uma outra característica importante e também divergente é a espessura dos derrames ultrabásicos em Alpinópolis, que atingem no máximo 20 metros de espessura, enquanto em Fortaleza de Minas eles são muito mais espessos, atingindo mais de 100 metros de espessura na parte sul da área (estimados em derrames peridotíticos).

Quadro 1 – Caracterização comparativa do contexto geológico e concentrações sulfetadas em Alpinópolis e Fortaleza de Minas (MG)

	Alpinópolis	Fortaleza de Minas (depósito O'Toole)
1 – Ambiente Geológico	Vulcano-sedimentar	Vulcano-sedimentar
2 – Idade	Arqueano Soares et al. (1990) ³⁰	Arqueano Soares et al. (1990) ³⁰
3 – Posição Geotectônica	Área de placa cavalgada Soares et al. (1990) ³⁰	Área de placa cavalgada Soares et al. (1990) ³⁰
4 – Deformações	Quatro eventos deformativos Soares et al. (1990) ³⁰	Quatro eventos deformativos Soares et al. (1990) ³⁰
5 – Falhamentos	Dois conjuntos de falhas características Soares et al. (1990) ³⁰	Dois conjuntos de falhas características Soares et al. (1990) ³⁰
6 – Foliações	Três foliações distintas Soares (1990) ³⁰	Três foliações distintas Soares et al. (1990) ³⁰
7 – Feições microestruturais das encaixantes e do minério	Recuperação, recristalização sombra de pressão, porfiroblastos e fraturamento Carvalho (1990) ⁸	Recuperação, recristalização sombra de pressão, porfiroblastos e fraturamento Carvalho (1990) ⁸
8 – Associações litológicas nas áreas	Clorita-tremolita/actinolita xisto com ou sem textura spinifex, serpentinitos, talco xisto, hornblenda xisto, piroxenito (rochas peridotíticas piroxeníticas). Hornblenda – albíta – actinolita/tremolita xisto e anfibolitos (rochas basálticas predominantemente toleíticas). Formação ferrífera na fácies óxidos e silicato, granada-biotita xisto portadores de sillimanita e estaurolita, tremolita-biotita, xisto (rochas metassedimentares). Rochas de composição granitóides (intrusivas ácidas) freqüentes. Carvalho (1990), ⁸ Carvalho et al. (1990)	Clorita-actinolita/tremolita xisto com ou sem textura spinifex, serpentinitos, talco xisto, hornblenda xisto, piroxenito (rochas peridotíticas-piroxeníticas) clorita-actinolita/tremolita xisto e albíta-actinolita/tremolita xisto (rochas e albíta-actinolita, tremolita xisto, rochas basálticas). Formações ferríferas na fácies óxido, sulfeto, silicato e grafita (rochas metassedimentares). Teixeira et al. (1987), ³⁸ Carvalho (1990) ⁸ Carvalho et al. (1990), ⁸ Marchetto (1986) ¹⁹
9 – Hospedeiras das mineralizações	Serpentinitos, talco xisto, tremolita/actinolita xisto, granada-biotita xisto (portadores ou não de sillimanita e cordierita). Carvalho (1990) ⁸	Serpentinito, talco xisto, actinolita/tremolita xisto, piroxenito e metacherts Marchetto (1986) ¹⁹
10 – Metamorfismo	Fácies anfibolito e fácies xisto verde (retrogressivo)	Fácies anfibolito e fácies xisto verde (retrogressivo)

	Alpinópolis	Fortaleza de Minas (depósito O'Toole)
11 - Espessura do horizonte mineralizado	Espessura variável nos vários níveis mineralizados 0,20-5,0 m/comprimento inferido por geofísica (IPEM) = 500 m Carvalho (1990) ⁸	Espessura máxima: 10 m Comprimento: 1600 m Germani et al. (1985) ¹¹
12 - Associação mineralógica (sulfetos e óxidos)	Pirrotita, pirita, esfalerita, calcopirita, pentlandita e millerita, magnetita, ilmenita, espinélio, titanita e hematita Carvalho (1990) ⁸	Pirrotita, pentlandita, calcopirita, esfalerita, cabaltita-gersdorffita, pirita, marcassita, violarita e bravoita; magnetita ilmenita, hematita. Marchetto (1986) ¹⁹
13 - Teores dos principais elementos	Ni = valores máximos = 0,30% Zn = valores máximos = 0,40% Cu = valores máximos = 0,15% Carvalho (1990) ⁸	Ni = 2,72% Pt = 1,3 ppm Cu = 0,45% S = 10,73% Co = 0,06%
		Germani et al. (1985) ¹¹ , Marchetto (1986) ¹⁹
14 - Economicidade	Antieconômico	Econômico
15 - Controle da mineralização	Foliação milonítica de transposição caracterizada pelo par S_2-C_2 Soares et al. (1990) ³⁰	Foliação milonítica de transposição caracterizada pelo par S_2-C_2 Soares et al. (1990) ³⁰
16 - Composição química de pentlanditas e pirrotitas. Valores mínimos e máximos (% em peso)	Pentlandita: Fe = 28,26 - 34,57 Ni = 25,04 - 35,59 Co = 0,01 - 6,37 S = 32,52 - 35,41 Pirrotita: Fe = 50,04 - 60,49 Ni = 0,06 - 3,34 Co = 0 - traços S = 38,89 - 40,67 Carvalho (1990) ⁸	Pentlandita: Fe = 27,7 - 31,6 Ni = 34,6 - 37,8 Co = 0,5 - 0,9 S = 32,3 - 33,8 Pirrotita: Fe = 59,3 - 62,2 Ni = 0,2 - 1,5 Co = 0 - 0,1 S = 37,9 - 39,6 Marchetto (1987) ¹⁹
17 - Gênese	Vulcânico-exalativo Carvalho (1990) ⁸	Magmático Marchetto (1986) ¹⁹

Essas diferenças permitem a inferência de que a região de Fortaleza de Minas teria se formado em um ambiente marinho mais profundo, com derrames peridotíticos/komatiíticos mais espessos. A ausência ou menor frequência de ocorrência de litotipos de composição basáltica e ácida parece determinante no sentido de caracterizar que o pacote vulcão-sedimentar aí presente possa corresponder ao grupo ultramáfico do *greenstone-belt* "Morro do Ferro". De maneira análoga é possível inferir que a pilha vulcão-sedimentar em Alpinópolis é mais característica do grupo *greenstone* ou calco-alcalino. Nesse aspecto as mineralizações em Fortaleza de Minas seriam do tipo proximal, enquanto as de Alpinópolis seriam do tipo distal. Dentro desta concepção, as mineralizações nas duas áreas poderiam ser explicadas em quatro estágios, a saber:

Estágio 1

A concentração de sulfeto em Fortaleza de Minas ocorre associada a derrames ultrabásicos de natureza komatiítica representados por serpentinito, talco xisto, meta piroxenito e clorita-actinolita/tremolita xisto. A presença de intercalações de metassedimen-

mentos químicos interderrame deve refletir períodos de quiescências do vulcanismo. A formação do depósito de níquel, cobre e cobalto (depósito O'Toole) deve estar relacionada a processos vulcânicos que ocorreram no assoalho oceânico. O principal mecanismo apontado e capaz de gerar esse tipo de depósito é aceito como sendo o de segregação de massas sulfetadas a partir de um magma ultrabásico, em função da imiscibilidade apresentada pelos sulfetos, conforme as idéias de Naldrett,²² Naldrett & Campbell,²³ Groves et al.¹⁵ De acordo com estas idéias, a imiscibilidade e a consequente concentração por gravidade da fase sulfetada levariam à formação de uma solução sólida monosulfetada (MSS), que corresponde composicionalmente a uma pirrotita rica em níquel e cobre. Com o declínio da temperatura durante o resfriamento magmático, ocorre inicialmente formação de calcopirita seguida de pentlandita, por processos de desmisturação (exsolução). Apesar de discutível, esta é a hipótese mais aceita mundialmente para explicar a formação de depósitos com associação de níquel, cobre e cobalto em *greenstone belt*. Baseando-se nas relações texturais e associação mineral, Marchetto¹⁹ admite uma origem deste tipo para o depósito O'Toole em Fortaleza de Minas. Realmente a complexidade evolutiva exibida pela área e a similaridade entre esse depósito com outros conhecidos na literatura mundial (principalmente australianos), mais a ausência de estudos específicos e diagnósticos para a sua compreensão genética, faz com que a hipótese mais aceita seja a da diferenciação magmática.

Em Alpinópolis, apesar das mineralizações também estarem inseridas num contexto com vulcanismo komatiítico, os processos mineralizantes parecem ter sido diferentes em pelo menos alguns aspectos, a saber:

- A mineralização está relacionada predominantemente com metassedimentos (granada-biotita-xisto e metachert) e secundariamente com metavulcânicas (serpentinitos e clorita-tremolita/actinolita xisto).
- Os níveis mineralizados são antieconômicos, sendo que a maior concentração é de zinco, seguido do elemento cobre. Dominantemente esfaleritas e calcopiritas ocorrem em fraturas tardias, relacionadas com o final dos processos geológicos.
- A concentração de níquel é relativamente baixa, com teores (0,3%) pouco acima dos valores de limiar para litologias dessa natureza. Os elementos cobalto e secundariamente cromo têm comportamento similar e também não apresentam valores expressivos, e são inferiores aos valores de *background* apresentados por serpentinitos e peridotitos não mineralizados.

Os aspectos retomencionados são evidências contra uma origem magmática para estas concentrações e apontam para uma origem vulcano-exalativa, que poderia se processar inicialmente nos seguintes moldes:

- Durante a formação do cortejo litológico no piso oceânico, a exalação de soluções hidrotermais (solfataras e fontes termais), durante e após a extrusão de derrames maficos/ultramáficos sucessivos, ricas em metais de transição (Fe, Ni, Co, Cu),

conduziu à formação inicial de concentrações sulfetadas, possivelmente maciças, dominadas por sulfetos de ferro (pirita e pirrotita), enriquecidas nesses metais de transição.^{3,4, 5, 14} As reentrâncias e depressões existentes no substrato vulcânico seriam os principais metalotectes para aprisionar estas salmouras metalíferas.¹² O enxofre necessário para se combinar com os metais viria com a própria salmoura,^{10,17} através de processos lixiviantes na pilha vulcão-sedimentar, com origem semelhante para os metais calcófilos. Possivelmente as fracas disseminações de pirita-pirrotita, pentlandita, millerita, magnetita e cromita, presentes nas vulcânicas, representam minerais primários disseminados, originados por segregação magmática e preservados da dissolução pelos processos gerados em condições exalativas.

– Nesse estágio ter-se-iam formado as concentrações maciças e semimaciças de pirita e pirrotita possivelmente acompanhadas de metamorfismo hidrotermal. Apóiam estas idéias a presença de cherts ferruginosos, metassedimentos aluminosos e a espessura reduzida dos derrames na área.

Estágio 2

Após a formação do minério maciço e/ou semimaciço no piso ocêanico em Alpinópolis e Fortaleza de Minas e independente dos processos genéticos, toda a região foi palco de deformação e metamorfismo intenso³¹ que atingiram condições de fácies (anfibolito), afetando as rochas encaixantes e os corpos sulfetados que permaneciam na posição original de sua formação. Este evento gerou uma foliação (S1), muitas vezes preservada no interior dos corpos sulfetados, caracterizada pela impregnação de material microcristalino reliquiário (Fotomicrografia 1).

Nesse estágio a temperatura mínima foi superior a 500°C, sendo que seu limite superior atingiu seguramente o início de fusão de rochas, conforme atestado pela ocorrência local de várias infiltrações graníticas em Alpinópolis, o que pode ter causado inclusive a fusão de sulfetos presentes.

Estágio 3

Um novo evento tectono-metamórfico atinge a área, gerando uma forte foliação milonítica de transposição em posição oblíqua àquela formada no estágio 2, caracterizada pelo par S₂-C₂ (Fotomicrografia 3), que corresponde à foliação principal na área, formada por associações paragenéticas de clorita, tremolita, talco, serpentinita, balizando o metamorfismo como de fácies xisto verde. Esse processo afetou tanto as rochas supracrustais (encaixantes) como também os corpos sulfetados e rochas do embasamento cristalino, tornando-os regionalmente concordantes segundo uma direção regional NW.

As supracrustais e em particular os sulfetos do estágio anterior reagem a esta deformação com um comportamento dúctil, o que é atestado pela moagem intensa (porfiroclastos rotacionados de pirita, tremolita e quartzo), dentro de bandas formadas por intenso estiramento de pirita e pirrotita (Fotomicrografia 3), gerando, muitas vezes, feições de brechas mineralizadas (Fotomicrografia 2) e bandamento tectônico no minério. Esta foliação (S_2-C_2) é responsável ainda pela geometria lenticularizada exibida pelos corpos (Figura 4) e pela mistura tectônica entre as encaixantes.

Os sulfetos formados anteriormente sob ação desse novo regime tectono-metamórfico vão sofrer recristalizações generalizadas e patrocinam a formação de exsoluções de pentlanditas e/ou calcopiritas em pirrotita, compatíveis com as temperaturas que ocorrem nos limites superiores da fácie xisto verde, correspondendo a uma terceira geração de sulfetos (PY3 e PO3), caracterizado em Alpinópolis.

Em resumo, no estágio 3 teríamos:

- deformação e transposição de uma estrutura mais antiga S1, gerando uma nova foliação (C_2, S_2);
- as concentrações sulfetadas, previamente formadas, mostram estas feições de deformação intensa, através de recristalizações, estiramento e brechação;
- em consequência desses processos tectono-metamórficos, os corpos sulfetados assumem as posições espaciais atuais;
- quimicamente observa-se em Alpinópolis que os minerais de minério sofrem mudanças e se enriquecem em cobre, níquel e cobalto.⁸

Estágio 4

O estágio 4 também é caracterizado por um evento deformativo (D4) com metamorfismo nas condições de fácie xisto verde (temperaturas inferiores a 300°C), acompanhado de alteração hidrotermal. Esse evento provoca o surgimento de falhas com direção Nordeste, dobrando coaxialmente a foliação anterior, gerando uma nova foliação, dada principalmente por crenulações e *kink bands* (S_3).

Nestas condições de deformação menos intensa e temperaturas mais brandas, parte da pirrotita é substituída por pirita subédrica em Alpinópolis, que gradativamente tendem a piritas édricas (PY4 e PO4). Os fluidos que acompanharam este evento metamórfico reagem com as rochas encaixantes, provocando localmente feldspatização, cloritização e talcificação. Nas fraturas provocadas por D4, ocorre deposição de esfalerita e calcopirita (Fotomicrografia 4), as quais não sofreram nenhuma deformação posterior.

CARVALHO, S. G. de, SOARES, P. C., BARBOUR, A. P. Mineralization phases in the Alpinópolis and Fortaleza de Minas greenstone belts (Minas Gerais State, Brazil). *Geociências*, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 19-47, 1992.

■ **ABSTRACT:** The metallogenetic characteristics of the Archean volcanic-sedimentary rocks of the Morro do Ferro greenstone belt, SW Minas Gerais, is here discussed. The study of Ni, Cu, Fe and Zn sulphide concentrations, cropping near Alpinópolis and Fortaleza de Minas, is emphasised. A metallogenetic model for the origin of the sulphide assemblages, in both cress, is proposed.

■ **KEYWORDS:** Metallogeny; genetic modo; greenstone belt.; mineralization.

Referências bibliográficas

1. ABREU, S. F. de. *Recursos minerais do Brasil*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 754 p.
2. ALECRIM, J. D., PINTO, L. C. Considerações sobre alguns elementos traços em sedimentos de corrente na região de Fortaleza de Minas (MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. Camboriú, 1980. *Anais...* Camboriú: SBG, 1980. v. 1, p. 57-67.
3. BAVINTON, O. A., KEAYS, R. R. Precious metal values from interflow sedimentary rocks from the komatiite sequence at Kambalda, Western Australia. *Geoch. Cosmoch. Acta*, v. 42, p. 1151-63, 1978.
4. BAVINTON, O. A. The nature of sulphidic sediments al Kambalda and their broad relationships with associated ultramafic rocks and nickel ores. *Econ. Geol.*, v. 76, p. 1606-28, 1981.
5. BARLEY, M. E., GROVES, D. I. Hydrothermal Alteration of Archaean supracrustal sequences in the central Norseman – Wiluna Belt, Western Australia: a Brief review. *Pré-Cambrian Gold Deposits*. s. l. p: University West Australia, 1987. (Publ. 11). p. 51-66.
6. CARVALHO, S. G., CHOUDHURI, A., OLIVEIRA, M. A. F., FIORI, A. P., SOARES, P. C. Paragênese e possível origem dos xistos básicos e ultrabásicos de Fortaleza de Minas, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32. Salvador, 1982. *Anais...* Salvador: SBG, 1982. v. 2, p. 641-7.
7. CARVALHO, S. G., BATISTA, J. J. Prospecção geoquímica de solo no cinturão vulcana-sedimentar "Morro do Ferro", Fortaleza de Minas, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2. Belo Horizonte, 1983. *Atas*. Belo Horizonte: SBG, 1983. p. 248-58.
8. CARVALHO, S. G. *Geologia, petrologia e metalogenia da seqüência vulcana-sedimentar de Alpinópolis, Minas Gerais*. São Paulo, 1990. Tese (Doutorado) – IG, Universidade de São Paulo.
9. CHOUDHURI, A., SZABO, G. J. A., EBERT, H. D. Feições estruturais e texturais dos derrames ultramáficos a norte e nordeste de Petrópolis, sul de Minas Gerais. *Ciênc. Ter.*, n. 7, p. 18-20, 1982.

10. FINLOW, B. T. The chemical and physical controls on the genesis of submarine extrusive ore bodies and their implications for formulating exploration concepts. *Geol. Jahrbuch*, v. 40, p. 131-68, 1980.
11. GERMANI, D. J., MUNEMASSA, Y. A. Lavra da jazida de níquel sulfetado denominado O'Toole, de Fortaleza de Minas (MG). In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 1. Brasília, 1985. *Anais...* Brasília: Instituto Brasileiro de Mineralogia, 1985. p. 64-81.
12. GRESHAM, J. J., LOFTUS-HILLS, G. D. The geology of the Kambalda nickel field. *Econ. Geol.*, v. 76, p. 1373-416, 1981.
13. GRIFFON, J. C., RICHTER, H. Geologia, mineração e tratamento do minério de níquel do Morro do Níquel, MG. *Geol. Miner.*, v. 40, p. 387-405, 1976.
14. GROVES, D. I., BARRETT, F. M., McQUEEN, K. G. Geochemistry and origin of cherty metasediment within ultramafic flow sequences and their relationship to nickel mineralization. In: GLOVER, J. E., GROVES, D. I., (Ed.). *Archaeon Cherty Metasediments: their sedimentology, micropalaontology, biogeochemistry and significance to mineralization*. Geol. Dept. & Extension Service, s. l. p.: Univ. West Australia, 1978. (Publ. 2), p. 57-69.
15. GROVES, D. I., BARRETT, F. M., McQUEEN, K. G. The relative roles of magmatic segregation, volcanic exhalation and regional metamorphism in the generation of volcanic-associated nickel ores of Western Australia. *Can. Min.*, v. 17, n. 2, p. 319-36, 1979.
16. GROVES, I. D., BATT, D. W. Spatial and temporal variation of archaen metallogenetic associations in terms of evolution of Granitoid-Greenstone Terrains with particular emphasis on the Western Australian Shield. In: KRONER, A., HANSON, G. N., GOODWIN, A. M. *Archaen Geochemistry*.
17. HUTCHINSON, R. W., FYFE, W. S., KERRICH, R. Deep fluid penetration and ore deposition. *Min. Sci. Eng.*, v. 12, p. 107-20, 1980.
18. MARCHETTO, C. M. L., BRENNER, T. L., FRANKE, N. D., CHENEY, J. T., TEIXEIRA, N. A., MOREIRA, A. E., PIMENTEL, R. C., GALLO, C. B. M. Geologia e petrografia do segmento do greenstone belt Morro do Ferro a sul de Fortaleza de Minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33. Rio de Janeiro, 1984. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. p. 149.
19. MARCHETTO, C. M. L. Platinóides associados ao minério de níquel, cobre e cobalto de Fortaleza de Minas, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34. Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia: SBG, 1986. v. 5, p. 1589-603.
20. MORAES, L. J. *Níquel do Brasil*. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 1935. (Boletim, 9). 169 p.
21. MORALES, N., CARVALHO, S. G., OLIVEIRA, M. A. F., RODRIGUES, M. F. B., ZANARDO, A. Geologia das Folhas de Fortaleza de Minas, Alpinópolis, Jacuí e Nova Rezende. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2. *Anais...* Belo Horizonte: SBG - Núcleo de Minas Gerais, 1983. p. 411-22.
22. NALDRETT, A. J. Nickel sulfide deposits: classification, composition, and genesis. *Econ. Geol.*, v. 75, p. 626-85, 1981.

23. NALDRETT, A. J., CAMPBELL, I. H. Physical and chemical constraints on genetic models for komatiite related Ni-Sulphide deposits. In: ARNDT, N. T., NISBET, E. G., (Ed.). *Komatiites*. London: George Allen & Unwin, 1982. p. 423-34.
24. OLIVEIRA, M. A. F., CARVALHO, S. G., MORALES, N., RODRIGUES, M. F. P., ZANARDO, A. Geologia das quadriculas de Cássia e São Sebastião do Paraíso (MG). In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2. Anais... Belo Horizonte: SBG – Núcleo de Minas Gerais, 1983. p. 432-9.
25. OOSTINDIER, J., TAUFEN, P. M., VRIEND, S. P. An application of lithogeochemistry to the evaluation of the Ni-Sulphide ore Potential of weathered serpentinites in the Fortaleza de Minas Gerais Greenstone Belt, Minas Gerais, Brasil. *J. Geoch. Expl.*, v. 31, p. 5773, 1987.
26. OOSTINDIER, J., VRIEND, S. P., HUIJSMANS, J. P. P., TAUFEN, P. M. Weathered, Ni-sulfide ore-hastening and barren serpentinites in the Fortaleza de Minas greenstone belt, Minas Gerais, Brasil: a rock geochemical study. *Chem. Geol.*, v. 81, p. 209-20, 1990.
27. SANTIVANEZ, A. O. As serpentinas niquelíferas do Morro do Níquel em Pratápolis, Minas Gerais. *Eng. Min. Metal.*, v. 42, n. 248, p. 61-4, 1965.
28. SCHMIDT, W. *Die Geologie der Araxá Gruppe in Sudwest Minas Gerais, Brasilien, unter besonderer Berücksichtigung des Grunsteingurtels von Fortaleza de Minas*. Freiburg, 1983. Tese (Doutorado) – Universidade de Freiburg.
29. SOARES, P. C., CARVALHO, S. G., TAKIYA H., ALVES, R. Aplicação da Krigeagem em prospecção por geoquímica do solo. In: SIMPÓSIO DE QUANTIFICAÇÃO EM GEO-CIÊNCIAS, 1. Rio Claro, 1985. Atas. Rio Claro: 1985.
30. SOARES, P. C., FIORI, A. P., CARVALHO, S. G. Tectônica colisional obliqua entre o bloco do Paraná e a margem sul do Cráton do São Francisco, no maciço de Guaxupé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36. Natal, 1990. Anais... Natal: SBG, 1990. v. 6, p. 2723-34.
31. SOARES, P. C., CARVALHO, S. G., FIORI, A. P. *Geologia estrutural, evolução geológica e mineralizações sulfetadas nos terrenos granito-greenstone no sul de Minas Gerais*. (Em preparação).
32. SZABÓ, G. A. J. *Contexto geológico e petrologia das rochas metaultramáticas de Alpinópolis*. M. G. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado) – IG, Universidade de São Paulo.
33. SWENSSON, T. Produção de Ferro-Níquel na usina do Morro do Níquel S&A. In: SEMANA DE ESTUDO DE OURO PRETO, 6. Ouro Preto, 1968.
34. TAUFEN, P. M.; BRENNER, T. L. Geochemical orientation survey of the Fortaleza de Minas O'Toole Ni deposits southwestern Minas Gerais, Brasil. *Geoch. Bras.*, v. 1, n. 1, p. 1-18, 1987.
35. TEIXEIRA, N. A. *Geologia e petrologia e prospecção geoquímica da seqüência vulcanosedimentar Morro do Ferro, Fortaleza de Minas (MG)*. Brasília, 1978. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília.

36. TEIXEIRA, N. A., DANNI, J. C. Geologia da raiz de um greenstone belt na região de Fortaleza de Minas, Minas Gerais. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 9, n. 1, p. 17-26, 1979.
37. TEIXEIRA, N. A., DANNI, J. C. Petrologia de lavas metabásicas da seqüência vulcano-sedimentar Morro do Ferro, Fortaleza de Minas (MG). *Rev. Bras. Geoc.*, v. 9, n. 2, p. 151-8, 1979.
38. TEIXEIRA, N. A., GASPA, J. C., BRENNER, T. L., CHENEY, J. T., MARCHETTO, C. M. L. Geologia e implicações geotectônicas do greenstone belt do Morro do Ferro (Fortaleza de Minas-MG). *Rev. Bras. Geoc.*, v. 17, p. 209-20, 1987.