

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus de Rio Claro*

**GÊNESE DOS CORPOS DE SULFETO MACIÇO  
HIDROTHERMAL E PLATINÓIDES ASSOCIADOS NO  
DEPÓSITO DE FORTALEZA DE MINAS (MG).**

Carolina Michelin de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Gomes de Carvalho

Dissertação de Mestrado elaborado junto ao  
Curso de Pós-Graduação em Geociências  
- Área de Concentração em Geologia Regional,  
para obtenção do Título de Mestre  
em Geociências.

Rio Claro (SP)

2003

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Sebastião Gomes de Carvalho

---

Prof. Dr. Antenor Zanardo

---

Prof. Dr. João Batista Moreschi

---

Carolina Michelin de Almeida

- aluna-

Rio Claro, 10 de Outubro de 2003.

Resultado: APROVADA

Dedico esta dissertação  
a três HEROÍNAS, que são  
exemplos de vida e com as quais  
eu tive e tenho a felicidade de ser  
afilhada, neta e filha... vovó  
Genoveva, vovó Benzica  
e mamãe Cida. A vocês,  
o meu muito obrigada.

## A G R A D E C I M E N T O S

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração direta e indireta de inúmeras pessoas...

Ao Prof. Dr. Sebastião Gomes de Carvalho pela oportunidade de estudar os corpos de MMH da Jazida de Fortaleza de Minas.

A FAPESP, através do processo 00/10176-9, pela concessão da bolsa de mestrado e ajuda de custo que permitiram a realização deste trabalho.

A Mineração Serra da Fortaleza S.A., em nome do geólogo Thomas L. Brenner, pelo apoio logístico aos trabalhos de campo e pelo material cedido para estudo.

Ao Prof. Dr. Washington Barbosa Leite Júnior, pelo amigo e professor, que me apresentou de forma fascinante a Geologia Econômica, pelo apoio e presença em todos os momentos importantes da minha vida e principalmente por acreditar em mim.

Ao Prof. Antenor Zanardo, pelo amigo e professor, pelas discussões referentes à mineralogia presente no MMH e encaixantes e pelo auxílio na interpretação dos resultados de difração de raios X.

Ao Prof. Nelson Angeli, pelo amigo e professor, pela oportunidade de estudar os PGMs no Canadá, pelo carinho e atenção.

À Profa. Gema Ribeiro Olivo, da *Queen's University*, Canadá, pelo interesse e auxílio na realização deste trabalho, através de discussões e bibliografias.

Ao Prof. Bernardino Ribeiro Figueiredo, da UNICAMP, pelas críticas construtivas durante a qualificação deste trabalho, as quais promoveram o melhor aproveitamento e interpretação dos dados.

Ao Prof. César Fonseca Ferreira Filho, da UnB, pelo intermédio junto aos pesquisadores alemães para a realização de análises de microsonda eletrônica dos minerais do grupo da platina e pelo auxílio na técnica de cálculo dos dados de geoquímica para 100% sulfeto.

Ao Prof. Dr. C. Michael Lesher, *Laurentian University*, Canadá, pelo envio de bibliografias importantes para o bom desenvolvimento deste trabalho e auxílio em algumas interpretações.

Aos Dr. Bernhard Stribny e Dr. Frank Melcher, do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto Federal de Geociências e Recursos Naturais, Alemanha, pela realização de análises de microsonda eletrônica.

A técnica Cíntia Matsumura, do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências, UFRGS, pela paciência e atenção dedicadas nas análises de microsonda eletrônica e ao Prof. Dr. Léo Hartmann por todo apoio logístico.

Ao técnico Dailto Silva, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, Instituto de Geociências, UNICAMP, pela paciência e auxílio na procura dos minerais do grupo da platina.

A todos os funcionários da Biblioteca do campus de Rio Claro pela paciência, auxílio, correções, carinho e amizade.

Aos funcionários Adilson, Isabel, Júnior, Laerte, Nádia, Vânia e Vladimir do Departamento de Petrologia e Metalogenia, IGCE, por toda amizade, carinho, auxílio e pelos momentos de descontração.

Aos meus amigos de pós-graduação Aninha, Leila, Ivaldo, Feola, Cabanas e Leandra, pelo carinho, amizade e companheirismo durante todo o árduo percurso da realização deste mestrado.

Ao Marcos pela amizade e companheirismo durante todo o período do mestrado, pelas discussões e auxílio na elaboração de textos e figura.

As minhas amigas do coração Lia, Fran, Irena e Renata Rocha pelos momentos de descontração, pelo apoio, carinho e amizade.

Aos meus amigos da CUSTA pelo apoio, orações, carinho e compreensão pelas ausências, em especial ao casal Maura e José Carlos, Débora, Jô, Kika, Zé, Graciete, Suelen e Sandra.

Ao Marcelo pela pessoa maravilhosa que é e por todo apoio e carinho fundamentais na conclusão deste trabalho.

Aos meus irmãos, tios, primos e amigos pelos momentos de descontração, pela força, pelas orações e pelo carinho...

Aos meus pais, por toda compreensão pelos momentos de ausência, pelo apoio incondicional, pela força, incentivo de nunca desistir e por acreditarem junto comigo neste sonho.

A Deus por seu amor incondicional, por estar sempre ao meu lado, iluminando meu caminho e guiando meus passos.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente fizeram parte desta história e que, sem querer, eu esqueci de citar.

## SUMÁRIO

Índice	<i>i</i>
Índice de Tabelas	<i>iv</i>
Índice de Figuras	<i>v</i>
Resumo	<i>xi</i>
Abstract	<i>xii</i>
Capítulo I. Introdução	1
Capítulo II. Esboço Geológico Regional	10
Capítulo III. Geologia do Depósito	19
Capítulo IV. Corpos de Minério Maciço Hidrotermal	35
Capítulo V. Caracterização Mineralógica Do Minério Maciço Hidrotermal	49
Capítulo VI. Química Mineral	72
Capítulo VII. Geoquímica	82
Capítulo VIII. Discussões e Considerações Finais	86
Capítulo IX. Referências	92
Capítulo X. Bibliografia Consultada	109

Apêndice I – Dados Analíticos dos sulfetos, sulfoarsenetos e óxidos

Anexo I – Difrações De Raios X

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I. Introdução .....</b>	<b>1</b>
I.1 Generalidades .....	1
I.2 Objetivos Propostos .....	2
I.3 Localização e Acesso à Área de Estudo .....	2
I.4 Aspectos Fisiográficos .....	4
I.5 Materiais e Métodos .....	5
I.6 Trabalhos Anteriores .....	8
<b>CAPÍTULO II. Esboço Geológico Regional .....</b>	<b>10</b>
II.1 Introdução .....	10
II.2 Descrição das Unidades Lito-Estruturais .....	10
II.2.1 Complexo Barbacena .....	10
II.2.2 Complexo Varginha .....	12
II.2.3 Sequência MetavulcanoSedimentar .....	13
II.2.3.1 Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro .....	13
II.2.4 Grupo Araxá-Canastra .....	15
II.2.5 Grupo Bambuí .....	16
II.3 Estruturação Geotectônica .....	17
<b>CAPÍTULO III. Geologia do Depósito .....</b>	<b>19</b>
III.1 Introdução .....	19
III.2 Classificação dos Depósitos Magmáticos de Ni-Cu-Co-(PGE) associado a vulcanismo komatiítico .....	20
III.3 Geologia do Depósito .....	23
III.4 Principais Tipos de Minério .....	28
III.5 Associação Mineral Metamórfica das Encaixantes .....	29
III.6 Evolução Tectono-Metamórfica do Minério .....	30

<b>CAPÍTULO IV. Corpos de Minério Maciço Hidrotermal .....</b>	<b>35</b>
IV.1 Apresentação do Tema .....	35
IV.2 Geologia dos Corpos de Minério Maciço Hidrotermal no Depósito de Sulfeto Maciço de Fortaleza de Minas .....	41
IV.2.1 Introdução .....	41
IV.2.2 Características Gerais do Minério Maciço Hidrotermal .....	41
 <b>CAPÍTULO V. Caracterização Mineralógica do Minério Maciço Hidrotermal ....</b>	<b>49</b>
V.1 As Rochas Encaixantes .....	49
V.1.1 Serpentinó .....	49
V.1.2 Talco Xisto .....	50
V.2 Composição Mineralógica do Minério Maciço Hidrotermal .....	51
V.2.1 Principais Minerais de Minério .....	51
V.2.2 Principais Minerais Acessórios .....	53
V.2.2.1 Minerais da Série Cobaltita-Gersdorffita .....	53
V.2.3 Carbonatos e Quartzo .....	54
V.2.4 Minerais Raros .....	63
V.4.1 Minerais do Grupo da Platina (PGM) .....	63
V.4.1.1 Paládio (Pd) .....	66
V.4.1.2 Platina (Pt) .....	66
V.4.1.3 Irídio (Ir) .....	67
V.4.1.4 Ósmio (Os) e Rutênio (Ru) .....	67
 <b>CAPÍTULO VI. Química Mineral .....</b>	<b>72</b>
VI.1 Introdução .....	72
VI.2 Principais Minerais de Minério .....	72
VI.2.1 Sistema Fe-Ni-S .....	73
VI.2.2 Coeficientes de Correlação .....	75
VI.3 Magnetita – O Principal Óxido .....	77
VI.4 Minerais da Série Cobaltita-Gersdorffita .....	79
VI.4.1 Sistema CoAsS-NiAsS-FeAsS .....	79

<b>CAPÍTULO VII. Geoquímica .....</b>	<b>82</b>
VII.1 Introdução .....	82
VII.1.1 Diagrama Cobre versus Níquel .....	83
VII.1.2 Diagrama Cu/(Cu+Ni) versus Pt/(Pt+Pd) .....	85
<b>CAPÍTULO VIII. Discussões e Considerações Finais .....</b>	<b>86</b>
<b>CAPÍTULO IX. Referências .....</b>	<b>92</b>
<b>CAPÍTULO X. Bibliografia Consultada .....</b>	<b>109</b>

**APÊNDICE I – DADOS ANALÍTICOS DOS SULFETOS,  
SULFOARSENETOS E ÓXIDOS**

**ANEXO I – DIFRAÇÕES DE RAIOS X**

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de tipos mineralizados em depósitos magmáticos de Ni-Cu-PGE associados a komatiíticos. _____	22
Tabela 2 – Composição dos minerais e fases do grupo da platina presentes no minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas. _____	65
Tabela 3 – Dados geoquímicos de amostras do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas normalizados para 100% sulfeto. _____	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 – Mapa de localização da Jazida de Fortaleza de Minas. \_\_\_\_\_3
- Figura 2 – Mapa lito-estrutural da região de Fortaleza de Minas. \_\_\_\_\_ 11
- Figura 3 – Mapa geológico simplificado dos arredores de Fortaleza de Minas, mostrando a distribuição das unidades litológicas do *Greenstone belt* Morro do Ferro. \_\_\_\_\_ 26
- Figura 4 – Sucessão estratigráfica do Depósito de Fortaleza de Minas. \_\_\_\_\_26
- Figura 5 – Mapa geológico simplificado da porção central do Depósito de Fortaleza de Minas, a partir de mapeamento geológico em galeria. \_\_\_\_\_27
- Figura 6 – Perfil geológico perpendicular ao corpo de minério na seção 100S. \_\_\_\_\_27
- Figura 7 – Serpentinó encaixante do minério maciço hidrotermal exibindo fraturas preenchidas por carbonatos. Nas posições axiais (centro) dessas fraturas preenchidas por carbonatos ocorrem finos veios sulfetados. \_\_\_\_\_44
- Figura 8 - Minério maciço hidrotermal formado por substituição intensa de talco-xisto. Pode ser observado ainda resto preservado do talco-xisto hospedeiro. \_\_\_\_\_ 44
- Figura 9 - Rocha encaixante serpentínica sendo substituída por bandas sulfetadas e carbonáticas; banda sulfetada maciça rica em calcopirita, seguida de faixa enriquecida em carbonato. Observar o contato sinuoso entre a rocha mineralizada e a rocha encaixante. \_\_\_\_\_45
- Figura 10 - Minério maciço hidrotermal formado após substituição total da rocha encaixante. No detalhe pode ser observados megacristais de pentlandita em matriz pirrotítica e pentlandítica e restos de serpentinitos que não foram digeridos pelo minério novo. Observar também a concentração de sulfetos (calcopirita e pirrotita) injetados através da foliação mais antiga do serpentinito. \_\_\_\_\_ 45
- Figura 11 -Feição típica que mostra o zoneamento mineralógico provocado por soluções hidrotermais que penetram foliações pretéritas das encaixantes serpentínicas. Do centro para a borda ocorre processo de magnetização (serpentinó manchado), uma auréola de cloritização e secundariamente carbonatação e sulfetação (calcopiritização) nas porções mais externas da amostra. \_\_\_\_\_ 46
- Figura 12 - Concentrações maciças de calcopirita com menores quantidades de carbonatos que se formam localmente, na forma de disseminações ou leitos orientados

na foliação pretérita, nos corpos do minério maciço hidrotermal hospedados em serpentinitos. \_\_\_\_\_ 46

Figura 13 - Minério maciço hidrotermal hospedado em serpentinito mostrando estrutura bandada marcada pela alternância de leitos ricos em calcopirita e leitos enriquecidos em pirrotita e pentlandita em matriz carbonática. \_\_\_\_\_ 47

Figura 14 - Ilustra a substituição do antigo minério maciço brechóide pelo novo minério maciço hidrotermal (porções com aspecto poroso). Observar que as soluções hidrotermais provocam uma intensa reforma no minério pretérito, que permanecem como se fossem ilhas isoladas. \_\_\_\_\_ 47

Figura 15 - Feição comum que ocorre no contato entre as rochas encaixantes serpentínicas e o corpo de minério junto aos falhamentos de direção NE. Observar o intenso processo de substituição carbonática do serpentinito e o processo de sulfetação (pirrotita, pentlandita, calcopirita e pirita) posterior que ocupa os espaços entre o carbonato. \_\_\_\_\_ 48

Figura 16 – Variedade do minério maciço hidrotermal onde se destaca na matriz pirrotítica e pentlandítica agregados de cristais subesféricos de pentlanditas de uma nova geração. \_\_\_\_\_ 48

Figura 17 – Apresenta grandes cristais de pirrotita (Po) com inclusão de cristal euédrico de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (CG<sub>ss</sub>). Observar exsoluções de pentlandita (Pn) em pirrotita (Po). Cristal de magnetita (Mag) associado à massa sulfetada. \_\_\_\_\_ 56

Figura 18 – Ilustra cristais poligonais de pirrotita (Po) com contatos levemente curvos, definindo uma junção tríplice. Pode-se também observar finas lamelas de exsolução de pentlandita (Pn) orientadas em pirrotita (Po) \_\_\_\_\_ 56

Figura 19 – Ilustra cristal de pirrotita (Po) intercrescido e intimamente associado com calcopirita (Ccp). Observar cristal subédrico de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (CG<sub>ss</sub>) associado a calcopirita (Ccp) em contato com pirrotita (Po). \_\_\_\_\_ 56

Figura 20 – Mostra grande massa calcopirítica associada a pentlandita (Pn) granular. Cristais de pirrotita (Po) presentes no lado esquerdo. \_\_\_\_\_ 56

Figura 21 – Apresenta grande cristal de pentlandita (pn) neoformada associado a pirrotita (Po). A magnetita (Mag) ocorre associada. \_\_\_\_\_ 56

Figura 22 – Ilustra lamelas de exsolução de pentlandita (Pn) orientadas em pirrotita (Po). Cristal subeudral de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (CG<sub>ss</sub>) ocorre incluso em pirrotita (Po). \_\_\_\_\_ 56

- Figura 23 – Mostra a presença de cristais anedrais de esfalerita (Sp) associado com calcopirita. \_\_\_\_\_57
- Figura 24 – Observar veio de pirita (Py) hidrotermal no contato entre a massa calcopirítica e a rocha encaixante serpentínica. \_\_\_\_\_57
- Figura 25 – Ilustra a presença de regiões deformadas em interior das encaixantes serpentínicas. Nesses locais cristais anédricos de calcopirita (Ccp) ocorrem intercrescidos com minerais de serpentina (Srp) nos planos da foliação principal. \_\_\_\_57
- Figura 26 – Mostra veio de calcopirita (Ccp) hidrotermal cortando a rocha encaixante serpentínica. \_\_\_\_\_57
- Figura 27 – Mostra a presença de calcopirita (Ccp) tardia ocupando planos de fratura em magnetita (Mag) \_\_\_\_\_57
- Figura 28 – Ilustra a presença de veio de pirita (Py) hidrotermal cortando a massa calcopirítica. \_\_\_\_\_57
- Figura 29 – Obsrevar veio de pirita (Py) cortando cristais de pirrotita (Po). \_\_\_\_\_58
- Figura 30 – Mostra veio de pirita (Py) bordejado por vênulas milimétricas carbonáticas cortando a massa calcopirítica. No canto superior direito também pode ser observada vênula preenchida por carbonatos (Carb) cortando a calcopirita (Ccp). \_\_\_\_\_58
- Figura 31 - Ilustra a presença de vênula de pirita (Py) e carbonato (Carb) tardia cortando todo o minério maciço hidrotermal (MMH). Na porção superior pode ser observada vênula milimétrica de carbonato (Carb) cortando a massa sulfetada. \_\_\_\_\_58
- Figura 32 – Mostra cristais de violatira (Vio) formados a partir da alteração de cristais de pentlandita (Pn) e pirrotita (Po). Cristais esparsos e anédricos de calcopirita (Ccp) ocorrem associados. \_\_\_\_\_58
- Figura 33 – Cristal de violarita (Vio) e magnetita (mag) cortados por vênulas carbonáticas podem ser observados. Massa calcopirítica ocorre associada. \_\_\_\_\_58
- Figura 34 – Mostra a presença de cristais de violarita (Vio) gerados a partir da alteração hidrotermal de pentlandita (Pn) granular, associados a calcopirita (Ccp). \_\_\_\_\_58
- Figura 35 – Ilustra cristais de pirrotita (Po) e pentlandita (Pn) passando para violarita (Vio). Cristais anedrais de magnetita (Mag) podem ser observados no canto superior direito. \_\_\_\_\_59
- Figura 36 – Mostra massa calcopirítica assocaida a pentlandita (Pn) violaritzada e cristais de pirrotita (Po) exibindo alteração incipiente para violarita (Vio). \_\_\_\_\_59

- Figura 37 – Detalhe de cristal de magnetita (Mag) neoformado com inclusão de associação sulfetada – pirrotita (Po) – pentlandita (Pn) – calcopirita (Ccp). \_\_\_\_\_59
- Figura 38 – Cristais anedrais de magnetita (Mag) neoformados associados a cristais de calcopirita (Ccp) e pirrotita (Po). \_\_\_\_\_59
- Figura 39 – Ilustra aglomerados de cristais de magnetita (Mag) neoformados no contato entre a massa sulfetada e a rocha encaixante. \_\_\_\_\_59
- Figura 40 – Detalhe de cristal de magnetita (Mag) circundado por vênula carbonática. (Feição bastante freqüente no minério maciço hidrotermal – MMH). \_\_\_\_\_59
- Figura 41 – Ilustra cristal de pirrotita (Po) exibindo lamelas de exsolução orientadas de pentlandita (Pn). Cristais anedrais de calcopirita (Ccp) ocorrem associados. Observar pequeno cristal anedral de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (CG<sub>ss</sub>) disperso na pirrotita (Po). \_\_60
- Figura 42 – Observar cristal subeudral de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (CG<sub>ss</sub>) incluso em calcopirita (Ccp) associada com pirrotita (Po) e pentlandita (Pn) exibindo textura em bloco. \_\_\_\_\_60
- Figura 43 – Apresenta cristal subeudral de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (CG<sub>ss</sub>) intimamente associado a calcopirita (Ccp) em contato com pirrotita (Po). \_\_\_\_\_60
- Figura 44 – Ilustra a presença de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (CG<sub>ss</sub>)euédrica, de hábito cúbico no contato entre cristais de pirrotita (Po) portadores de exsoluções de pentlandita (Pn) e calcopirita (Ccp) associada. Cristal anedral de magnetita (Mag) no canto inferior direito envolto por vênula carbonática. \_\_\_\_\_60
- Figura 45 – Apresenta a presença de veio carbonático tardio cortando todo o minério maciço hidrotermal (MMH). \_\_\_\_\_60
- Figura 46 – Mostra a presença de veios e vênulas carbonáticas ocupando planos de fraturas em calcopirita (Ccp) e de clivagem na pentlandita (Pn). \_\_\_\_\_60
- Figura 47 – Ilustra a presença de veio preenchido por cristais de carbonato (Carb) e pirita (py) associados entre si e cortando a rocha encaixante. \_\_\_\_\_61
- Figura 48 – Apresenta vênulas carbonáticas tardias preenchendo planos de clivagem de cristais de pentlandita (Pn). \_\_\_\_\_61
- Figura 49 – Mostra cristais de pentlandita (Pn) neoformados apresentando inclusão de cristal de pirrotita (Po) e planos de clivagem preenchidos por carbonatos (Carb). \_\_\_\_61
- Figura 50 – Ilustra a presença de cristal de sperrylita (PGM) de 50um no contato entre a rocha serpentinitica e a massa sulfetada. Observar vênulas carbonáticas cortando o minério sulfetado. \_\_\_\_\_61

- Figura 51 – Apresenta duas direções principais de vênulas preenchidas por carbonatos (Carb) e quartzo (Qz). \_\_\_\_\_ 61
- Figura 52 – Imagem de cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> exibindo zonamento. As regiões mais claras correspondem a zonas mais ricas em níquel, enquanto que as mais escuras são enriquecidas em cobalto. Os números em vermelho representam pontos analisados em microsonda eletrônica. \_\_\_\_\_ 62
- Figura 53 – Ilustra cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> zonado. Observar a borda espessa cobaltífera e um núcleo irregular e delgado enriquecido em níquel. \_\_\_\_\_ 62
- Figura 54 – Mostra grão de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> apresentando zonamento irregular, onde a borda é niquelífera e o núcleo mais espesso é cobaltífero. Observar zonas nucleares enriquecidas em níquel. \_\_\_\_\_ 62
- Figura 55 – Apresenta cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> mostrando zonamento complexo. Notar que a borda direita é mais espessa e cobaltífera enquanto que a da esquerda mostra-se delgada e niquelífera. O núcleo é enriquecido em níquel, exibindo regiões isoladas ricas em cobalto. \_\_\_\_\_ 62
- Figura 56 – Cristais de Pd-melonita inclusos em cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_ 68
- Figura 57 – Cristal de Pd-melonita associado a pirrotita e pentlandita. \_\_\_\_\_ 68
- Figura 58 – Cristal de Pd-melonita disperso na massa serpentínica. \_\_\_\_\_ 68
- Figura 59 – Pequeno cristal de michenerita disperso em talco. \_\_\_\_\_ 68
- Figura 60 – Cristal de sperrylita substituindo grão de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 69
- Figura 61 – Cristal de sperrylita, exibindo bordas corroídas, incluso em cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 69
- Figura 62 – Cristal de irarsita exibindo as faces arredondadas incluso em cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 69
- Figura 63 – Cristal de irarsita incluso em cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 69
- Figura 64 – PGM zonado incluso em cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 70
- Figura 65 – PGM zonado incluso em cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 70
- Figura 66 – PGM (Os-Ru-Te) exibindo hábito losangular incluso em cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 70
- Figura 67 – Cristal de Os-Ru-Te incluso em cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>. \_\_\_\_\_ 70
- Figura 68 – Os-Ru-Te incluso em massa pirrotítica. \_\_\_\_\_ 71
- Figura 69 – Pequeno cristal de Os-Ru-Te incluso em serpentina. \_\_\_\_\_ 71
- Figura 70 – Grão de Ru-Te-As incluso em serpentina. \_\_\_\_\_ 71

- Figura 71 – Ru-Te-As associado a serpentina. \_\_\_\_\_71
- Figura 72 – Seção isotérmica do sistema Fe-Ni-S a 400°C. A fase violarita (Vio), pentlandita (Pn) e godleversikita (Gs) já estão presentes. Dados analíticos obtidos em microsonda eletrônica da fase sulfetada de níquel – pirrotita, pentlandita, violarita e pirita – do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG). \_\_\_\_\_74
- Figura 73 – Diagramas binários mostrando os coeficientes de correlação dos elementos químicos presentes nos principais minerais de minério do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG). \_\_\_\_\_76
- Figura 74 – Diagrama ternário  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -FeO- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  referente a composição química de magnetita presente no minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG). \_\_\_\_\_77
- Figura 75 - Diagramas binários mostrando os coeficientes de correlação dos elementos químicos presentes em cristais de magnetita do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG). \_\_\_\_\_78
- Figura 76 – Dados analíticos de minerais da série cobaltita-gersdorffita presentes no minério maciço hidrotermal obtidos em microsonda eletrônica, plotados no sistema CoAsS-FeAsS-NiAsS. \_\_\_\_\_80
- Figura 77 – Relação entre As/S e (Ni+Fe) em minerais da série cobaltita-gersdorffita presentes no minério maciço hidrotermal. \_\_\_\_\_80
- Figura 78 - Diagramas binários mostrando os coeficientes de correlação dos elementos químicos presentes em minerais da série cobaltita-gersdorffita do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG). \_\_\_\_\_81
- Figura 79 – Conteúdo de níquel (Ni wt%) e cobre (Cu wt%) da fase sulfetada de vários depósitos niquelíferos. \_\_\_\_\_84
- Figura 80 – Razões de Pt/(Pt+Pd) versus Cu/(Cu+Ni) para depósitos de sulfeto de níquel. Os quadrados vermelhos representam amostras do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas. \_\_\_\_\_85

## **RESUMO**

A mineralização sulfetada de Ni-Cu-Co (PGE), associado a rochas komatiíticas, da Jazida de Fortaleza de Minas, no sudoeste do Estado de Minas Gerais é tido como de origem magmática, porém processos pós-magmáticos modificaram substancialmente a distribuição original, estrutura, textura, mineralogia e química dos minérios. Estão presentes três importantes tipos de minérios sulfetados mobilizados: brecha, formação ferrífera bandada (BIF) e minério maciço hidrotermal. O último, é o objeto de estudo desta pesquisa. O minério maciço hidrotermal está associado a zonas de falhas transversais tardias, de direção NE-SW e N-S que cortam as rochas hospedeiras, e são perpendiculares a principal zona de cisalhamento que contém o principal corpo de minério. O minério maciço hidrotermal é formado por uma matriz oxi-sulfetada, constituída por pirrotita, pentlandita, calcopirita, pirita, violarita e magnetita, contendo minerais da série cobaltita-gersdorffita, minerais do grupo da platina, minerais da série linneita-polidymita, siegenita, além de carbonatos e quartzo. Os minerais do grupo da platina ocorrem disseminados por todo minério, associados a fases silicáticas hidratadas, inclusos em grãos de magnetita e minerais da série cobaltita-gersdorffita, no contato entre o minério e as rochas encaixantes. Próximo ao contato, são observados típicas feições de alteração hidrotermal do tipo talco-carbonato-clorita-sulfeto. Ao final do evento tectono-metamórfico, durante o Neo Proterozóico, que atuou na área em condições de baixa a alta temperatura ( fácies xisto verde), foram produzidas diversas soluções hidrotermais que afetaram as rochas encaixantes nas proximidades do corpo de minério, bem como do próprio minério, originando um novo tipo de minério, aqui designado como minério maciço hidrotermal.

Palavras chaves: Depósito de Fortaleza de Minas, minério maciço hidrotermal, sulfeto, PGM e minerais da série cobaltita-gersdorffita.

## **ABSTRACT**

The komatiite-associated Ni-Cu-Co (PGE) sulphide mineralization at Fortaleza de Minas, southwestern of Minas Gerais state is believed to have a magmatic origin, but a number of post-magmatic processes significantly modified the original distribution, structure, texture, mineralogy and chemistry of the ores. Three important types of mobilized sulphide are present: breccia, banded iron formation (BIF) and hydrothermal massive ore. The last is the object of study of this research. The hydrothermal massive ore are associated to the late transversal fault zones, of N-S and NE-SW direction that cut host rocks, and are perpendicular to the principal shear zone that comprise the main ore body. The hydrothermal massive ore is formed by a massive oxi-sulphated matrix, consisted of pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite, pyrite, violarite and magnetite, comprising cobaltite-gersdorffite minerals series, platinum-group minerals, linnaetepolydymite minerals series, siegenite, besides carbonates and quartz. The platinum-group minerals occur disseminated over the entire ore, associated to hydrated siliceous phases, and enclosed in magnetite grains and cobaltite-gersdorffite mineral series, in the contact between the ore and enclosing rocks. Next to this contact, are observed typical hydrothermal alteration features as talc-carbonate-chlorite-sulphide. In the end of the tectonic-metamorphic event, during the Neo Proterozoic, that actuated in the area in conditions of low to medium temperatures (greenschist facies), were produced a number of hydrothermal solutions that affected enclosing rocks next to the ore body as well as the proper ore, generating a new type of ore, here designated as hydrothermal massive ore.

Key words: Fortaleza de Minas deposit, hydrothermal massive ore, sulphide, PGM and cobaltite-gersdorffite mineral series.

# CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

---

## *1.1 GENERALIDADES*

Próximo à cidade de Fortaleza de Minas, no Sudoeste do Estado de Minas Gerais, descobriu-se em 1983 o primeiro depósito brasileiro de sulfeto maciço de Ni-Cu-Co e PGE hospedado em lavas peridotíticas de natureza komatiítica, pertencentes ao *Greenstone Belt* Morro do Ferro, inicialmente denominado de Depósito O'Toole hoje, Fortaleza de Minas.

Trabalhos já publicados sobre esse depósito e principalmente outros que se encontram disponíveis apenas em relatórios internos da empresa, apontam que o corpo de minério é constituído por quatro tipos de minério, denominados de maciço brechóide, intersticial, disseminado e de formação ferrífera. Enquanto que os três primeiros são considerados como singenéticos e originados a partir de diferenciação magmática ocorrida em lavas komatiíticas, a quarta é claramente posterior e representa localizadas infiltrações hidrotermais em um espesso horizonte de formação ferrífera.

Um quinto tipo de minério, possivelmente contemporâneo ao minério de formação ferrífera, apresenta um conjunto de características geológicas, composição química, teores, texturas e estruturas que o distingue das demais tipos já descritos, sugerindo que sua origem esteja relacionada a atuação de sistemas hidrotermais, retrabalhando o minério maciço brechóide.

São esses corpos de minério que constituem o objeto de estudo da presente dissertação, que tem como finalidade principal, a caracterização geológica e genética desses corpos de minério designados como **MINÉRIO MACIÇO HIDROTHERMAL (MMH)**.

## *1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS*

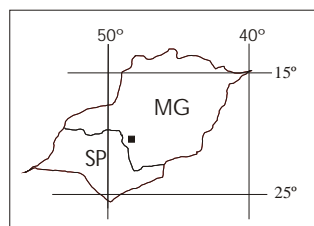
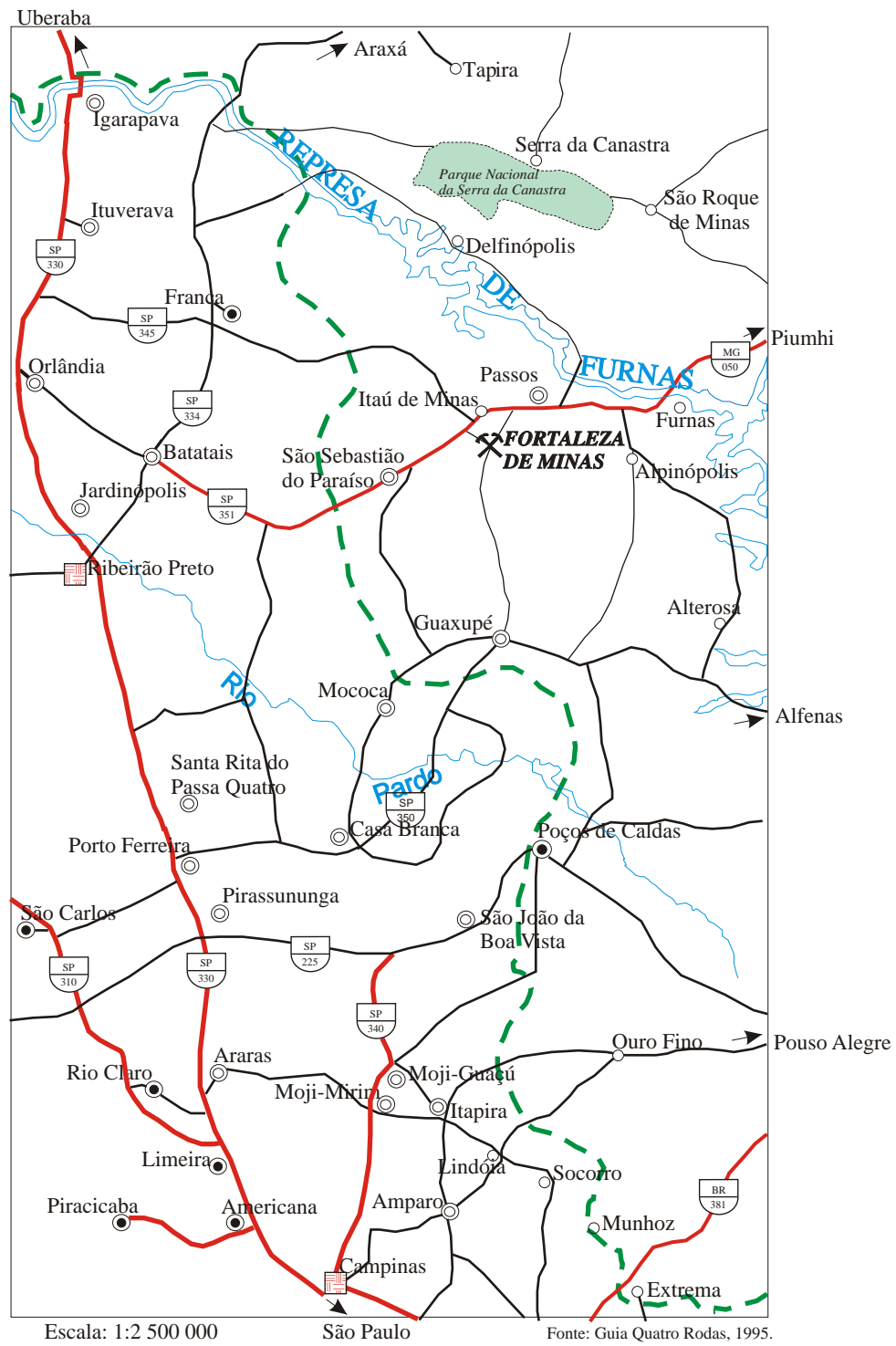
O objetivo central dessa pesquisa é contribuir para a compreensão dos processos geológicos envolvidos na formação do novo tipo de minério (MMH), discriminados durante trabalhos de mapeamento geológico pormenorizados nas frentes de lavra da Jazida de Fortaleza de Minas.

Para alcançar o objetivo principal, vários outros objetivos secundários foram buscados, destacando-se entre outros:

- a) Localização espacial e temporal das ocorrências de minério maciço hidrotermal (MMH) relativamente aos outros tipos de minério (BR, IN, DS, BIF) que constituem os corpos de minério principal.
- b) Caracterização mineralógica e química das assembléias de minerais de minério (opacos) e minerais silicatados (transparentes) que constituem os MMH com especial ênfase aos minerais do grupo da platina (PGM).
- c) Caracterização dos teores de níquel, cobre, cobalto e elementos do grupo da platina.
- d) Compreensão dos mecanismos de transportes responsáveis pela mobilização dos elementos de níquel, cobre, cobalto e do grupo da platina (PGM).
- e) Comparação dos resultados obtidos com outros depósitos similares bem estudados, disponíveis na literatura internacional.

### ***1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO***

Os corpos do minério maciço hidrotermal (MMH) de interesse para esta pesquisa ocorrem localmente individualizados no corpo de minério principal que constitui a jazida de Fortaleza de Minas, Situada no município de Fortaleza de Minas, Estado de Minas Gerais (Figura 1). As coordenadas geográficas no ponto central são 46°43'W de longitude e 20°54'S de latitude, dista cerca de 350 km da cidade de Belo Horizonte e 400 km da cidade de São Paulo. O acesso à área é feito principalmente através das rodovias SP (Rio Claro - Araras), SP-330 (Araras - Ribeirão Preto), SP-334 (Ribeirão Preto – Batatais), SP-351 (Batatais – São Sebastião do Paraíso) e MG-050 (São Sebastião do Paraíso - Passos). A partir de Passos o acesso é feito por via secundária de terra. A jazida dista 24 km de Passos e 54 km de São Sebastião do Paraíso.



**LEGENDA:**

- ⊗ Jazida de Fortaleza de Minas
- Rios
- Estrada de terra
- Asfalto
- Asfalto pista simples
- Asfalto pista dupla
- Divisa interestadual
- ⊡ Rodovia estadual
- ⊡ Rodovia federal
- De 10.001 a 25.000 habitantes
- ⊙ De 100.001 a 150.000 habitantes
- De 150.001 a 300.000 habitantes
- Acima de 300.000 habitantes

Figura 1. Mapa de Localização da Jazida de Fortaleza de Minas-MG.

#### ***1.4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS***

O Planalto Sul de Minas ou Planalto do Rio Grande distribui-se a noroeste da Serra da Mantiqueira, alongando-se para norte até as cabeceiras do Rio São Francisco, e para oeste até ser recoberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná. É caracterizado por uma ampla superfície ondulada, talhada essencialmente em rochas do complexo gnáissico-migmatítico, com altitudes em torno de 900m, sendo interrompido por uma série de cristas adaptadas às orientações gerais dos gnaisses e quartzitos, atingindo cotas superiores a 1.000m.

Particularmente, na região de estudo, a morfologia é condicionada amplamente às feições geológicas, sendo o relevo na região do embasamento bastante dissecado e com cristas alongadas segundo a direção dos principais lineamentos estruturais, sugerindo uma evolução sob controle tectônico. O cinturão meta-ultramáfico distribui-se em um “corredor” de relevo colinoso, onde se destacam cristas alinhadas, sustentadas no topo por *metacherts*, com altitudes em torno de 1.000m. A morfologia do embasamento contrasta-se com cristas de quartzitos do Grupo Araxá/Canastra, cuja expressão morfológica é localmente representada pela Serra da Fortaleza, que atinge altitudes superiores a 1.100m.

A drenagem dendrítica retangular, ou padrão retilíneo paralelo reflete o enérgico sistema de fraturas secundárias. A área conta com boa densidade de drenagens, sendo os principais representantes os rios São João, Santana, Ribeirão Passa Sete e os córregos do Salvador e da Contagem.

A região apresenta clima tropical de altitude, correspondente à variedade Cwb de *Koepen*, com temperatura média anual quase sempre inferior a 22°C, variando principalmente entre 18 e 20°C. A pluviosidade varia entre 1.500 e 1.750mm anuais, havendo concentração de chuva nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, e seca em junho, julho e agosto.

O Planalto Sul de Minas é representado predominantemente pela floresta subcaducifolia tropical, englobando localmente manchas de cerrado. Entretanto, apresenta-se devastada em quase sua totalidade, cedendo lugar à agricultura, que em muitas áreas, foi substituída por pastagens ou capoeiras.

## ***1.5 MATERIAIS E MÉTODOS***

A metodologia de trabalho empregada a fim de atingir os objetivos propostos foi àquela utilizada rotineiramente para estudos dessa natureza e constituiu-se principalmente de pesquisa bibliográfica; trabalhos de campo; estudos laboratoriais, tais como microscopia de luz refletida e transmitida, microscopia eletrônica de varredura, microsonda eletrônica, análises químicas; e trabalhos de escritório.

A **pesquisa bibliográfica** esteve presente em todo o período de desenvolvimento da dissertação de mestrado e foi orientada no intuito de obter informações quanto aos aspectos geológicos regional e local de onde está inserido o depósito. Além disso, buscou-se na literatura internacional, possíveis depósitos com características geológicas, mineralógicas e químicas similares ao minério maciço hidrotermal (MMH). Outra preocupação foi a busca por técnicas mais recentes de estudos empregadas por autores diversos no estudo de para mineralizações de sulfetos de Ni-Cu-Co-PGE.

Os **trabalhos de campo** realizados em três etapas visaram, principalmente, o reconhecimento geológico dos corpos de minério expostos nas galerias de pesquisa, para posterior coleta sistemática de amostras do minério maciço hidrotermal e dos minérios e rochas intimamente associadas e que apresentavam evidências de alteração hidrotermal. A terceira foi dedicada à compilação de informações pertinentes ao tipo de minério maciço hidrotermal (MMH) no acervo da Mineração Serra da Fortaleza S.A..

Para os **trabalhos de laboratório**, as amostras de MMH, minérios e rochas encaixantes coletadas durante os trabalhos de campo foram descritas, fotografadas e selecionadas. Os estudos constituíram-se em petrografia de luz transmitida e refletida, microscopia eletrônica de varredura, microsonda eletrônica e análises químicas.

Nos estudos de **microscopia de luz transmitida e refletida**, as amostras representativas do depósito foram selecionadas, reproduzidas em cerca de 60 lâminas e seções polidas que pudessem ser utilizadas ao mesmo tempo para análises em microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida. Tais estudos possibilitaram a definição das assembléias minerais de sulfetos, óxidos, silicatos e carbonatos, bem

como a caracterização das estruturas e das relações texturais entre as fases principais, acessórios e raros.

Com base nos resultados obtidos nos estudos petrográficos foram selecionadas cerca de 30 lâminas para estudos complementares em **microscopia eletrônica de varredura (MEV)**. Esses estudos foram importantes na caracterização e identificação de minerais do grupo de platina (PGM) e suas relações texturais e estruturais. Outro aspecto importante na utilização desta metodologia foi à confirmação e o aprimoramento dos estudos microscópicos realizados a luz transmitida e refletida. Os estudos de MEV foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Geociências da Universidade de Campinas (UNICAMP), utilizando um equipamento LEO 430i (Cambridge/Laica) com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) CatB (*Oxford microanalysis group*) acoplado.

As assembléias minerais discriminadas pelo emprego das duas técnicas descritas acima foram analisadas complementarmente por **microsonda eletrônica**. Esse trabalho foi executado em duas etapas. Na primeira realizada no Laboratório de Microsonda do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), foi utilizado um aparelho da marca CAMECA SX50 equipada com quatro espectrômetros para medir dispersão em comprimento de onda (*WDS-wavelength dispersive spectrometer*) e um espectrômetro para medir dispersão de energia (*EDS-energy dispersive spectrometer*). Nessa etapa foram utilizadas 16 lâminas e seções polidas metalizadas com uma fina película de carbono no próprio laboratório da UFRGS. Os estudos foram concentrados na determinação química pontual de minerais silicáticos, carbonáticos, óxidos e principalmente da fase sulfetada. A segunda etapa foi realizada através da Universidade de Brasília, no Laboratório de Microsonda do Instituto Federal de Geociências e Recursos Naturais em Hannover, Alemanha (*Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*), onde o material foi analisado pelos pesquisadores Dr. Bernhard Stribny e Dr. Frank Melcher. A microsonda eletrônica utilizada foi uma CAMECA SX100 equipada com cinco espectrômetros WDS (*WDS-wavelength dispersive spectrometer*) combinados com sistema de energia dispersiva (PGT). A calibração foi realizada a partir de metais puros e poucos minerais padronizados. Os estudos foram direcionados para a localização e identificação dos minerais do grupo da

platina (PGM) utilizando duas amostras representativas no minério maciço hidrotermal (MMH).

As **análises químicas** por **difração de raios-x** foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Petrologia e Metalogenia, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, da Universidade Estadual Paulista. O equipamento utilizado foi um Difractômetro Siemens D5000 (Gaspar Jr., 1999). Foram selecionadas cinco amostras, sendo quatro de fases sulfetadas e uma correspondente a fase silicatada. Os espectros gerados foram interpretados com o auxílio do programa DIFFRAC-AT.

Balizados pelas metodologias anteriormente descritas, foram selecionadas 10 amostras representativas das diferentes variedades do minério maciço hidrotermal que foram enviadas para o Laboratório da *Lakefield Geosol* Ltda em Belo Horizonte (MG) para realização de **análises químicas**. O procedimento de preparação física das amostras consistiu em secagem total à temperatura de 180°C (100°C para As, Se e Sb) em seguida britadas até 2 mm. Por quartejamento separou-se uma fração de 250 g que foi pulverizada a 150 *mesh*. Para as análises foram utilizadas uma alíquota desta fração pulverizada no processo de análise.

A determinação dos elementos Ni, Cu e Fe foram realizados por **Digestão Multiácida/Absorção Atômica** e quando acima de 5000ppm para Ni e Cu e 10.000ppm para Fe por Digestão Multiácida/Absorção Atômica AATM e valores reportados em porcentagem. Na preparação química as amostras foram submetidas à digestão multiácida (ácidos fluorídrico, clorídrico e perclórico) para dissolução dos metais a serem analisados. Por esta metodologia o limite de detecção para Ni, Cu e Fe é de 2ppm.

Os elementos As e Se foram analisados pelo **método de geração de hidretos** conjugado com absorção atômica para detectar teores de até 1ppm.

Foram ainda analisados Ag, Ba, Be, Cd, Cr, Li, Mo, Sc, Sr, Zn, Y, Co, Pb, V, Bi, Sn, W, La, Ca, K, Mg, Mn, Na, P e Ti pelo **método ICP/Digestão Multiácida** (HF + HCl + HClO<sub>4</sub>). Os limites de detecção para os elementos são Ag, Ba, Be, Cd, Cr, Li,

Mo, Sc, Sr, Zn e Y (3 ppm) Co, Pb e V (8 ppm) Bi, Sn e W (20 ppm) La (10 ppm) Ca, K, Mg, Mn, Na, P e Ti (0,01%).

Também foram analisados os elementos Ba, S, Sr, Ga, Hf, Nb, Rb, Ta, Th, V e Zr por **Fluorescência de Raios X**, utilizando *pellet* de pó prensado. O limite de detecção para Sr, Ga, Nb, Rb, Th e Zr é 5ppm; Ba, Hf, Ta e V de 10ppm e S 50ppm. Buscando complementar a caracterização química do minério aparentemente ainda não descrito na literatura (ainda não encontramos nenhuma trabalho que descrevem um minério similar ao minério maciço hidrotermal descrito no Depósito de Fortaleza de Minas), realizou-se também análise para os elementos de Terras Raras presentes.

Os **trabalhos de escritório** concentraram-se nas seguintes etapas:

- O tratamento dos dados obtidos em análises petrográficas, análise mineral e química total do minério foi realizado através de tabelas e diagramas com o auxílio dos *softwares* EXCEL2000 e MINPET 2.02 for WINDOWS.

- Os dados obtidos com as análises geoquímicas foram recalculados para 100% sulfeto. Esse método de recálculo é amplamente utilizado pelos pesquisadores que trabalham com depósitos sulfetados e por princípio, considera que todo cobre presente provêm da calcopirita, o níquel da pentlandita, o ferro e o enxofre da calcopirita, pentlandita e pirrotita. O cálculo foi realizado em planilha do EXCEL2000.

- Integração e correlação dos dados obtidos com as informações geológicas existentes na área de estudo e outras mineralizações semelhantes.

- Interpretação dos resultados e elaboração final da dissertação, com o auxílio dos programas WORD2000, CORELDRAW 10.0 e EXCEL2000.

## ***1.6 TRABALHOS ANTERIORES***

As primeiras investigações de cunho geológico na região foram realizados pela Companhia Eletro-Metalúrgica de Ribeirão Preto (SP) entre os anos de 1.922 e 1.925, com a exploração das ocorrências de hematita em formações ferríferas bandadas do Morro do Ferro. Estes trabalhos levaram a descoberta do depósito de níquel laterítico do Morro do Níquel representado por pequenos veios de garnierita hospedados em corpos

serpentiniticos (MORAES, 1935). A partir da década de 60 e 70 iniciaram-se estudos de viabilidade econômica e metalúrgica de níquel silicatado (SANTIVANEZ, 1965; SWENSSON, 1968; GRIFFON e RICHTER, 1976).

Teixeira (1978) e Teixeira e Danni (1979 a e b) definiram o ‘Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro’, reconhecido e interpretado como a raiz de uma seqüência vulcano-sedimentar, do tipo *greenstone belt*.

A década de 80 é marcada por importantes estudos e trabalhos de caráter prospectivo, onde Alecrim e Pinto (1980) detectaram anomalias geoquímicas de Pb, Zn, Cu, Co, Mn e Cr e Carvalho (1983) e Carvalho e Batista (1983) reconhecem anomalias de Ni-Cu-Co em solos e rochas nos arredores de Fortaleza de Minas.

Em 1983, a BP-Mineração, a partir de furos de sondagens em uma zona coberta por gossan e com anomalias geoquímicas e geofísicas, descobre o primeiro depósito de sulfeto de níquel, cobre e cobalto do país, denominado inicialmente como Depósito O’Toole, atualmente conhecido como Depósito de Fortaleza de Minas.

Trabalhos de enfoque regional foram realizados por vários pesquisadores, com destaque para Carvalho et al. (1982), Choudhuri et al. (1982), Schmidt (1983), Morales et al. (1983) que abordaram aspectos petrológicos em detalhe relacionados a Seqüência Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro.

Estudos petrográficos e metamórficos de cunho regional e estrutural do Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio foram apresentados por Zanardo (1992), Zanardo et al. (1996) e Morales (1993).

Desde a sua descoberta, em 1983, o Depósito de Fortaleza de Minas vem sendo investigado em escala regional e local. Merecem destaque os trabalhos realizados por Germani et al. (1985) que confeccionaram o primeiro mapa geológico do depósito a partir do projeto de lavra; Marchetto et al. (1984) e Marchetto (1986, 1990) que estudaram detalhadamente as tipologias de minério, com enfoque aos minerais do grupo da platina (PGM) presentes na ganga silicática e em sulfetos; Brenner et al. (1990) que abordaram em um trabalho clássico os aspectos geológicos, geoquímicos e genéticos tanto o depósito como as rochas encaixantes e Santos (1996) a qual elaborou o primeiro modelo estrutural para a jazida.

## **CAPÍTULO II. ESBOÇO GEOLÓGICO REGIONAL \_\_\_\_\_**

### ***II.1 INTRODUÇÃO***

A área de estudo está situada ao sul da Província Estrutural Tocantins de Almeida (1981), limitada ao norte pelo Cráton de São Francisco, ao sul pela Província Mantiqueira e a oeste pela Bacia do Paraná.

A região está ainda contida no ramo Araxaídes do Geossinclíneo Assíntico Brasileiro de Ebert (1971, 1984).

O depósito de Fortaleza de Minas, situado na cidade homônima no sudoeste do estado de Minas Gerais, corresponde a uma porção da manifestação vulcano-sedimentar arqueana do Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro, implantada no escudo cristalino, representado pelo Complexo Barbacena. Ao sul é limitado pelo domínio de rochas pertencentes ao Complexo Varginha, ao norte está limitado pela seqüência vulcano-sedimentar do Grupo Araxá-Canastra, a nordeste pelos metassedimentos pelíticos e carbonáticos do Grupo Bambuí, e a oeste pelos sedimentos fanerozóicos da Formação Itararé e sills de diabásio mesozóicos da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná (Figura 2).

### ***II.2 DESCRIÇÃO DAS UNIDADES LITO-ESTRUTURAIS***

#### ***II.2.1 COMPLEXO BARBACENA***

Segundo Hasui et al., (1988), o Complexo Barbacena é constituído por granitóides homogêneos parcialmente foliados, biotita e/ou anfibólios gnáisses bandados, facoidal e laminado, e migmatitos essencialmente do tipo estromático, porém também nebulítico, *schileren*, *shollen* e dobrado, com melanossoma gnáissico, anfibolítico e ultramáfico e leucossoma granítico e diorítico. Segundo Carvalho et al. (*no prelo*), o complexo exhibe supracrustais associadas representada essencialmente por rochas meta-ultramáficas e meta-máficas, formações ferríferas bandadas, xistos e quartzitos interpretados como pertencentes a porções de um terreno *greenstone belt*.

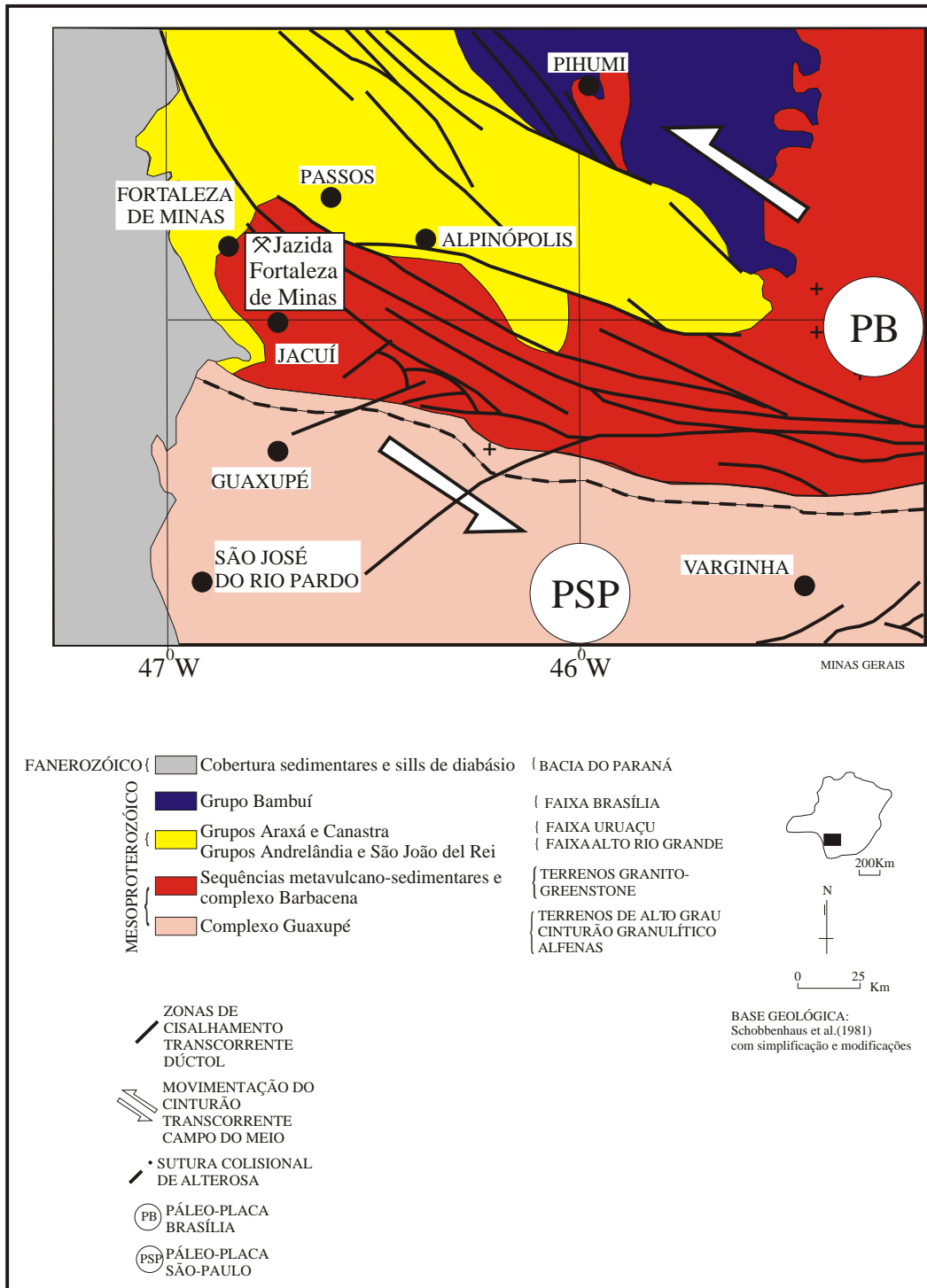


Figura 2 - Mapa lito-estrutural da região de FORTALEZA DE MINAS (Carvalho et al, *no prelo*).

De acordo com Morales et al. (1983), o embasamento cristalino foi afetado por duas fases de dobramentos, sendo a primeira constituída por dobras fechadas a isoclinais do bandamento metamórfico pré-existente, e a segunda fase representada por dobras abertas a fechadas, desenhada pela foliação cataclástica.

A distribuição dos litotipos, segundo Morales et al., (1996), é controlada pelo padrão anastomosado de zonas de cisalhamento, encontrando-se porções lenticulares menos deformadas com feições migmatíticas, separadas por faixas paralela/subparalela onde as estruturas mais antigas foram fortemente distorcidas, originando gnaisses bandados portando grande número de intercalações lenticulares de metabasitos/metaultrabasitos e metassedimentos.

O grau metamórfico registrado para o embasamento, de acordo com Carvalho et al., (1992), é equivalente a fácies anfíbolito alto. Já Zanardo (1992) estima temperatura mínima de 650°C para a região norte desta unidade. Entretanto o maior grau metamórfico situar-se-ia ao sul, onde as condições mínimas de temperatura e pressão estimadas foram de 740°C e 8,7kb, respectivamente. O metamorfismo que afetou essas rochas segundo Carvalho et al. (*no prelo*) foi o de fácies anfíbolito e as rochas apresentam-se parcialmente migmatizadas.

Segundo Hasui et al. (1988) o Complexo Barbacena é considerado como de idade arqueana.

### **II.2.2 COMPLEXO VARGINHA**

O termo “Grupo Varginha” foi usado inicialmente por Ebert (1971), para definir um conjunto de rochas metassedimentares presentes na região de Varginha e que constituía o internídeo do Araxaídes.

O Complexo Varginha exhibe rochas de alto grau, ortoderivadas (gnaisses bandados, gnaisses charnockíticos e enderbíticos, metabasitos) e paraderivadas (gnaisses kinzigíticos, xistos aluminosos, quartzitos, mármore dolomíticos, anfíbolitos, gnaisses aluminosos e rochas calciossilicáticas). Esses litotipos guardam entre si relações de aleitamento e paralelismo, impostas pelas deformações que se processaram sobre essas (HASUI et al., 1990 e ZANARDO, 1992).

Segundo Carvalho (1990) o complexo, exibe um zoneamento litológico com rochas gnáissicas no seu extremo norte, rochas charnockíticas em sua porção central e migmatitos e granitóides diversos ao sul.

O metamorfismo dessas rochas foi o de fácies granulito e elas apresentam registros de superposição de transformações em condições de fácies anfibolito alta (com migmatização, remobilizações quartzo-feldspáticas e quartzosas) a xisto verde (retrometamorfismo) (HASUI et al., 1990 e ZANARDO et al., 1990).

Estas rochas de alto grau representariam o Cinturão Granulítico Alfenas de idade arqueana, retrabalhadas no neoproterozóico (CARVALHO et al., *no prelo*).

Sua estruturação principal é marcada pelo baixo ângulo de mergulho da foliação voltado para SE, exibindo ondulações leves que causam sua inversão (ZANARDO et al., 1990).

### **II.2.3 SEQUÊNCIA METAVULCANO-SEDIMENTAR**

A seqüência metavulcano-sedimentar de Fortaleza de Minas é uma entre várias outras unidades correlatas que integram o Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro localizado no sudoeste do Estado de Minas Gerais (Figura 2).

De maneira geral, estas seqüências constituem entidades alóctones que se encontram embutidas tectonicamente, por falhas ou estruturas sinformais, em um embasamento granítico-migmatítico-gnáissico conhecido como Complexo Barbacena e, sotoposto, discordantemente aos metassedimentos do Grupo Araxá (CARVALHO et al., 1992, 1993, TEIXEIRA e DANNI, 1979 e CARVALHO et al., *no prelo*).

#### **II.2.3.1 CINTURÃO VULCANO-SEDIMENTAR MORRO DO FERRO**

O Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro exibe forma alongada, de comprimento aproximadamente de 200 km e largura da ordem de 50 km e direção NW-SE (BRENNER et al., 1990). É cortado por um sistema linear de zonas de cisalhamento transcorrentes mais jovens, estendendo-se por cerca de 200 km entre as cidades de Fortaleza de Minas e Lavras, e que impõem o padrão de distribuição do Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro.

É constituído na base por derrames de lavas ultrabásicas, possuindo localmente textura *spinifex* fina, intercalações regulares de precipitados químicos como cherts, rochas detríticas, níveis tufogênicos e vulcânicas ácidas retrabalhadas. A porção média compreende lavas básicas, lentes de rochas ultrabásicas, ritmitos e *chert* ferrífero. O topo é constituído por um espesso pacote sedimentar representado por filitos localmente grafitosos e *chert* ferrífero (TEIXEIRA e DANNI, 1979).

Teixeira et al., (1987) subdividiram a porção mais contínua da seqüência, que aflora entre Fortaleza de Minas e Bom Jesus da Penha em três faixas principais: Fortaleza de Minas (que compreende as Unidades Morro do Níquel e Morro do Ferro, suprimindo a Unidade Córrego do Salvador inicialmente proposta por Teixeira e Danni, 1979, Alpinópolis e Bom Jesus da Penha-Jacuí.

No segmento Fortaleza de Minas, a unidade Morro do Níquel, encontra-se diretamente disposta sobre os gnaisses cataclásticos do embasamento numa faixa de direção N40W estendendo-se por cerca de 30 km, e constitui-se essencialmente dos seguintes tipos litológicos: talco-tremolita xistos, tremolita-serpentina-clorita xistos e intercalações de metacherts e metatufos, wack feldspáticos e sericita-quartzo xistos (TEIXEIRA e DANNI, 1979).

Representando a unidade de topo, a Unidade Morro do Ferro corresponde à seqüência aflorante ao longo das elevações do referido morro, é constituída por filitos sericíticos, localmente grafitosos, contendo lentes de metacalcários, muscovita-clorita-cloritóide xisto, talco xistos e anfibolitos (TEIXEIRA e DANNI, 1979).

Para Brenner et al., (1990) a unidade Morro do Níquel em Fortaleza de Minas, onde está inserido o depósito estudado, é caracterizada como uma sucessão de fluxos komatiíticos maciços e diferenciados, apresentando estrutura brechóide e estruturas tipo *pillow* preservadas, intercalados a precipitados químicos e tufos. Segundo os mesmos autores, rochas com actinolita-clorita são as litologias predominantes no cinturão, contendo intercalações de formações ferríferas bandadas fácies óxido e silicato e *metacherts* com grafita-pirrotita-pirita, e ainda metatufos de composição basáltica.

Já a unidade Morro do Ferro, é caracterizada por Brenner et al., (1990) por formações ferríferas fácies óxido, horizontes ricos em manganês, *metacherts* com ou sem grafita e fuchsita, representando sedimentos químicos; sericita-clorita-quartzo xistos, xistos grafitosos e clorita-sericita xistos com cloritóide, representando

sedimentos clásticos; e metaperidotitos talcificados, localmente portadores de textura cumulada e *spinifex*, representando sedimentação de tufos.

Teixeira e Danni (1979) consideram que o metamorfismo na região de Fortaleza de Minas é de fácies xisto verde, zona da clorita. O grau metamórfico estimado para o Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro para Szabó (1989) estaria próximo a temperaturas de 550-650°C e pressões de 3 a 5kb para região de Alpinópolis, enquanto Carvalho (1990) obtém para a mesma região condições por volta de 600°C e 4kba. Zanardo (1992) sugere temperaturas superiores a 600-700°C, e pressões máximas de 5.3kb a 600 °C e 7.9kb a 700°C.

O segmento Fortaleza de Minas para Brenner et al., (1990) foi submetido a metamorfismo de fácies xisto verde alto onde se estima temperatura em torno de 500°C e pressão da ordem de 3kbars ou mais. Fernandes (2002) estudando as formações ferríferas bandadas pertencentes a associações metavulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt* obtém condições metamórficas de fácies anfibolito médio para o segmento Fortaleza de Minas.

A estruturação das faixas pertencentes ao *greenstone*, segundo Brenner et al., (1990), representam restos de um sinclinal erodido e preservado no embasamento. Os autores reconhecem três eventos tectônicos regionais principais, sendo o primeiro, F1, caracterizado por foliação plano axial transposta e por dobras intrafoliais rompidas, a F2 definida por dobras isoclinais com mergulho de 40° NW e com desenvolvimento de uma foliação S subvertical, sendo que S0, S1 e S2 tornam-se subparalelas, e F3, onde S1 e S2 são dobradas por dobras abertas e apertadas, normais e coaxiais com F2, com mergulho de 30-35° NW.

#### **II.2.4 GRUPO ARAXÁ-CANASTRA**

A relação entre os Grupos Araxá e Canastra ainda não é muito clara em função da imbricação tectônica observada nestas seqüências, que são interpretadas equivalentes lateralmente (DARDENNE, 2000).

O Grupo Araxá corresponde a uma seqüência metassedimentar com contribuição vulcânica e ou vulcano-clástica subordinadas, composta por metassedimentos psamo-pelíticos, pelíticos, grauvaquianos, psamíticos e subordinadamente cálcio-silicáticos e

carbonáticos (ZANARDO et al., 1990, DARDENNE 2000 e CARVALHO et al., *no prelo*).

O Grupo Canastra foi definido por Barbosa (1955) e Barbosa et al., (1970), e é representado por uma associação de metassedimentos psamíticos e pelíticos contendo freqüentemente carbonatos, e consistindo essencialmente por filitos e quartzitos.

Heilbron et al., (1987) consideram o Grupo Araxá-Canastra um mesmo grupo, já que possuem a mesma evolução tectono-metamórfica. A mesma denominação foi seguida por Simões et al., (1988), Szabó (1989), Zanardo et al., (1990) e Carvalho (1990). Ainda segundo os mesmos autores reconhecem pelo menos quatro fases de deformações e um gradiente metamórfico invertido, transicional e crescente para oeste.

Para Teixeira e Danni (1978) o conjunto Araxá-Canastra seria uma seqüência metassedimentar contínua e invertida, entretanto, para Heilbron et al., (1987), Simões (1995) e Simões e Valeriano (1990) é considerada em posição normal.

O conjunto sofreu metamorfismo de fácies xisto verde a anfíbolito, e teriam sido deslocadas por zonas de empurrão sobre complexos mais antigos (HEILBRON et al., 1987; SIMÕES et al., 1988; VALERIANO 1992; ZANARDO 1992; MORALES 1993; MORALES et al., 1996; ZANARDO et al., 1996).

Segundo Heilbron et al. (1987) e Trouw e Pankhurst (1993), a idade desses grupos seria mesoproterozóicas e estaria relacionada à inversão da bacia durante o ciclo Uruçuano (1.4 a 1.0 Ga); já para Pimentel et al., (1999) o Grupo Canastra é de idade Meso a Neoproterozóica, e o Grupo Araxá de idade Neoproterozóica.

### **II.2.5 GRUPO BAMBUÍ**

Corresponde a metassedimentos pelíticos e carbonáticos divididos em 6 formações de idade Neoproterozóica podendo conter depósitos associados de Pb-Zn-Ag-CaF<sub>2</sub> ocupando todo lado leste da Faixa Brasília e capeando grandes áreas do Cráton de São Francisco (DARDENNE, 2000).

Para Zanardo (1992) os metassedimentos do Grupo Bambuí que ocorrem associados a rochas ultramáficas e/ou ultrabásicas da seqüência vulcano-sedimentar são mármore finos intercalados a filitos e filonitos, cálcio xistos e rochas calciossilicáticas, filitos e/ou clorita xistos sericíticos, granoquartzitos, quartzo xistos, mica xistos, quartzitos e metagrauvascas.

### ***II.3 ESTRUTURAÇÃO GEOTECTÔNICA***

Os primeiros trabalhos sobre modelos geológicos para o sudoeste do estado de Minas Gerais advêm de Ebert (1956, 1957, 1968, 1971) quando distinguiu as faixas Araxaídes e Paraibídes de idades Assínticas. A partir de então, todos os trabalhos que se sucederam modificaram o modelo, bem como outros foram propostos. Entre eles destacam-se: Almeida e colaboradores (1967, 1968, 1976, 1978, 1979 e 1981); Davino (1979); Wernick et al., (1981); Soares (1988); Haralyi & Hasui (1982); Campos Neto e Figueiredo (1985); Artur e Wernick (1986) e Zanardo (1992).

É de comum acordo entre os diversos pesquisadores que o cenário geológico encontrado atualmente no sudoeste do estado de Minas Gerais deveu-se a um processo de colisão continental envolvendo dois ou mais microcontinentes, afetados posteriormente por sistemas transcorrentes (DAVINO, 1979; ALMEIDA et al., 1980; HARALYI e HASUI, 1982; ARTUR E WERNICK, 1986; SOARES, 1988; SOARES et al.; 1990 e 1991; CAMPOS NETO et al., 1990; CAMPOS NETO, 1991; CAMPOS NETO e FIGUEIREDO, 1992; HASUI et al., 1990 e 1993; EBERT et al., 1991 e 1995; ZANARDO, 1992 e MORALES, 1993, HASUI et al., 1996, entre outros.).

Para Haralyi e Hasui (1982) as rochas cristalinas do sudeste brasileiro estariam organizadas na forma de três blocos tectônicos: Bloco Brasília ao norte, Bloco São Paulo ao sul e Bloco Vitória a leste. Entre os blocos, afetando-os em suas bordas aparecem cinturões de cisalhamento denominados de Cinturão Transcorrente Campo do Meio, entre os blocos Brasília e São Paulo e Cinturão de Cisalhamento Rio Paraíba do Sul ou Cinturão Ribeira, entre os blocos Brasília e Vitória, e São Paulo e Vitória (HASUI et al., 1990 e EBERT et al., 1993 e 1995). Para os autores Haralyi e Hasui (1982) a estruturação seria arqueana, entretanto os dados geocronológicos mais recentes tem apontado sistematicamente estruturação no proterozóico superior.

Segundo Campos Neto et al. (1984) o sudeste de Minas Gerais pode ser entendido por um modelo de Nappes, Nappe Socorro-Guaxupé, representada por terrenos infra-crustais, estruturados na orogênese Brasileira.

Segundo Zanardo et al. (1998), a região sudeste de Minas Gerais e norte de São Paulo, pode ser entendida como dois blocos continentais, com evolução policíclica, sendo que um destes é constituído por rochas arqueanas, grupos Amparo, Barbacena e a Sequência Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro, geralmente recobertas por seqüências

supracrustais alóctones (grupos Araxá, Canastra, Itapira, etc.) e autóctone (Grupo Bambuí). O outro bloco representado pelos complexos Guaxupé e Socorro cavalga o primeiro onde se observa em sua base intensa anatexia.

Tardi-movimento tangencial segundo Zanardo et al., (2000) tem-se a implantação de dois cinturões de cisalhamento, que localmente reativam zonas de cisalhamentos nos terrenos antigos. Um desses cinturões é de natureza sinistrógira, e posiciona-se na sutura entre terrenos arqueanos (Complexo Barbacena) pertencentes a um prolongamento do Cráton de São Francisco e terrenos de alto grau (Complexo Guaxupé). É denominado de Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio (HASUI et al., 1990). O outro Cinturão de Cisalhamento é denominado de Cinturão de Cisalhamento Rio Paraíba do Sul (HASUI et al., 1990; EBERT et al., 1991, 1993, 1995), e é de natureza dextrógira e magnitude bem maior.

## CAPÍTULO III. GEOLOGIA DO DEPÓSITO

---

### III.1 INTRODUÇÃO

Depósitos de sulfeto magmático de Ni-Cu-Co-(PGE) formaram-se através do tempo geológico, mas encontram-se preferencialmente associados com vulcanismo komatiítico de alta temperatura, com alto teores de magnésio no Arqueano, baixo magnésio e vulcanismo ou plutonismo picrítico no Proterozóico e plutonismo picrítico no Fanerozóico, correspondendo a mudanças na história termal e tectônica da Terra (LESHER, 1994).

Em todos os casos, as mineralizações estão hospedadas em rochas cumuladas, tais como dunito, peridotito, troctolito e norito (NALDRETT, 1981; 1989; LESHER, 1989). Essas rochas hospedeiras, interpretadas como canais de lava ou condutos de magma executaram três processos decisivos para a geração de depósitos minerais, sendo eles: (1) contribuição para a maior parte dos elementos calcófilos e algum enxofre dos minérios; (2) fornecimento de calor para a incorporação de enxofre crustal e (3) provisão de um eficiente sistema de sondagem vulcânica/subvulcânica, no qual os sulfetos segregaram.

Os depósitos associados especialmente à rocha de natureza komatiítica em *greenstone belts* arqueanos representam os mais importantes exemplos de mineralizações magmáticas em rochas vulcânicas. Esses depósitos contêm cerca de 25% da fonte mundial de níquel, em depósitos com mais de 0,8wt%Ni, bem como quantidades significantes de cobre, cobalto e elementos do grupo da platina (LESHER, 1989)

Esses depósitos são descritos em terrenos greenstones belts arqueanos do Brasil; províncias de Ontário e Quebec, Canadá; oeste australiano e Zimbábwe; e em cinturões vulcânico-sedimentares proterozóicos da China, Manitova, New Quebec (Ungava), Rússia e Vietnã.

As características geológicas destes depósitos vêm sendo revisadas por diversos autores, entre eles, Groves e Hudson (1981), Marston et al. (1981), Naldrett (1981, 1989) e Leshler (1989), bem como compilados por Leshler e Stone (1996) e Leshler e Keays (no prelo).

### **III.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DEPÓSITOS MAGMÁTICOS DE Ni-Cu-Co-(PGE) ASSOCIADOS A VULCANISMO KOMATIÍTICO**

Leshner e Keays (*no prelo*) classificam os depósitos de Ni-Cu-Co-(PGE) associados a rochas komatiíticas em cinco tipos principais, englobando nove sub-tipos (Tabela 1), segundo sua origem magmática, hidrotermal-metamórfica ou tectônica, discutidos a seguir:

#### **MINERALIZAÇÃO DO TIPO I**

Esse tipo de mineralização compreende os sub-tipos Ia e Ib. O primeiro subtipo, estratiforme, refere-se à concentração de minério acamadado nas porções basais de derrames peridotíticos e/ou plutonismo duníticos de natureza komatiítica, geralmente próximo ao topo de derrames basálticos. Esses minérios correspondem aos geralmente denominados de disseminado, intersticial e maciço.

O sub-tipo Ib, veio de *footwall*, diz respeito aos corpos de minério injetados na forma de veios e *stringers* nas rochas hospedeiras e ocorrem associados ao sub-tipo Ia. Esse sub-tipo é composto por sulfetos maciços de pureza variável, comumente enriquecidos em Cu-PGE, formados em estágio magmático inicial ou tardio, introduzido durante *emplacement* ou via cristalização fracionada da solução sólida monossulfetada (MSS).

Os teores e as dimensões dessas mineralizações variam consideravelmente dentre e entre os maiores distritos. Corpos ou zonas individuais são geralmente menores que 5x10<sup>6</sup>ton, normalmente menores que 2x10<sup>6</sup> e contem entre 2 a 4% de níquel.

#### **MINERALIZAÇÃO DO TIPO II (STRATA-BOUND)**

Corpos de minério classificados como *strata-bound* caracteriza-se por acumulações de minério disseminado no interior de rochas peridotíticas e duníticas de natureza komatiítica e subdivide-se em três sub-tipos discriminados, respectivamente, como IIa, IIb e IIc.

O minério denominado de sub-tipo IIa – *blebby* – apresenta disseminações grosseiras e exibe textura *blebby*. O sub-tipo IIb – intersticial – é caracterizado por disseminações grosseiras com textura *intercumulus*, intersticial ou lobada. E por fim, o

sub-tipo IIc é constituído por disseminações muito finas, com textura *intercumulus* e intersticial.

Os sub-tipos IIa e IIb formaram-se em estágio magmático intermediário, segregados durante a cristalização da rocha cumulada encaixante e o sub-tipo IIc formou-se em estágio magmático tardio e foi modificado metamorficamente.

Esses minérios são geralmente de baixo teor (<1%Ni), mas de grandes tonelagens (>250x10<sup>6</sup>).

### **MINERALIZAÇÃO DO TIPO III (REEF)**

A mineralização do tipo III, de natureza estratiforme, é formada por acumulações de sulfetos próximos ou no contato entre zonas cumuladas inferiores e zonas gabróides superiores em rochas fortemente diferenciadas. É caracterizado pela presença de sulfetos disseminados, raramente intersticiais, gerados em estágio magmático tardio, segregado durante estágios finais da cristalização da rocha hospedeira.

Nesses depósitos a quantidade de sulfeto presente é tipicamente pequena e é normalmente sub-econômica.

### **MINERALIZAÇÃO DO TIPO IV**

Os depósitos do tipo IV tiveram sua origem ligada a processos metamórficos-hidrotermais e são subdivididos em dois sub-tipo, IVa e IVb. A mineralização do tipo IVa ocorrem em metassedimentos ricos em níquel, associados ao minério do tipo I. Exibem textura laminada, bandada e acamadada, sendo encontrada somente adjacente aos minérios do tipo I ou V (GREEN e NALDRETT, 1981; PATERSON et al, 1984; BLEEKER, 1990) e pode ocorrer em vários ambientes metamórficos, desde fácies xisto verde intermediária (Langmuir, Redstone), passando para fácies anfibolito inferior (Kambalda) até anfibolito superior (Thompson). É formado em estágio magmático tardio a sin-metamórfico.

O minério tipo IVb – veios hidrotermais – ocorre em algumas vezes associado com a mineralização do tipo I, na forma de veios que cortam as rochas encaixantes e apresentam textura maciça a disseminada. Ocorre tipicamente associada a grãos de quartzo e carbonato e sua origem está relacionada a mobilizações a partir de fluidos hidrotermais em estágio sin-metamórfico.

Tabela 1 - Classificação de minérios em depósitos magmáticos de Ni-Cu-PGE associados a komatiíticos

(modificado de Lesher e Keays, *no prelo*)

ORIGEM	MAGMÁTICO					HIDROTHERMAL-	METAMÓRFICA	TECTÔNICA	
TIPO	I - BASAL/ <i>FOOTWALL</i>	II - <i>STRATA- BOUND</i>		INTERNO	III - REEF	I V		V	
Subtipo	Ia - estratiforme	Ib - veio ( <i>footwall</i> )	IIa - <i>blebby</i>	IIb - intersticial	IIc - <i>cloud</i>	estratiforme	IV a - metassedimentos	IV b - veio	<i>offset</i>
Distribuição dos sulfetos	na base ou próximo a base de rochas peridotíticas ou duníticas de natureza komatiítica	veios ou <i>stringers</i> em rochas hospedeiras, associados com minério Tipo Ia	disseminações grosseiras, inclusas em rochas peridotíticas ou duníticas de natureza komatiítica	disseminações finas inclusas em rochas peridotíticas ou duníticas de natureza komatiítica	disseminações muito finas, inclusas em rochas peridotíticas ou duníticas de natureza komatiítica	no contato ou próximo entre as zonas cumuladas inferior e a zona de gabróide superior, inclusas em unidades fortemente diferenciadas	camadas em metassedimentos sulfetados associados ao minério Tipo I	veios nas paredes de rochas, associados ao minério Tipo I	Zonas de falhas e cisalhamento em rochas hospedeiras, associadas ao minério Tipo I
Textura dos sulfetos	maciça, intersticial, disseminado, algumas vezes xenólito ou xenomelt-bearing	Maciça	<i>blebby</i>	<i>intercumulus</i> , intersticial ou <i>lobate</i>	<i>intercumulus</i> , intersticial	disseminado, raramente intersticial	acamadado, bandado, laminado	maciço a disseminado, tipicamente associado com quartzo e/ou carbonato	brechado, tipicamente heterolítico; <i>durchbewegung</i>
Teor do Minério	tipicamente moderado, levemente fracionado	variável, comumente enriquecido em Cu-PGE relativamente aos minérios de origem magmática	moderamente alto, relativamente não fracionado	tipicamente alto, relativamente não fracionado	variável (alto a baixo)	tipicamente alto, relativamente fracionado	variável, comumente pobre em Cr, Ir relativo aos minérios magmáticos associados	variável, comumente pobre em Cr, Ir relativo aos minérios magmáticos associados	Variável, comumente pobre em Cr, Pt e Au relativo ao minério magmático
<i>Timing</i> e Paragênese	magmático inicial, segregado antes ou durante o <i>emplacement</i>	magmático inicial a tardio, injetado durante o <i>emplacment</i> inicial ou formado via cristalização fracionada de MSS	magmático intermediário, segregado durante cristalização da rocha hospedeira cumulada	magmático intermediário, segregado durante cristalização da rocha hospedeira cumulada	magmático tardio mas modificado metamorficamente, e, segregado durante cristalização das rochas hospedeiras cumuláticas	magmático tardio, segregado durante estágio final da cristalização da rocha hospedeira	magmático tardio a sin-metamórfico	sin-metamórfico, mobilizado por fluídos hidrotermais	Sin-tectônico, mobilizado de sulfetos maciços a intersticiais
Exemplos	Alexo, Windaria, Kambalda, Katinni, Langmuir	Kambalda, Alexo, Katinni	Damba-Silwane, Otter shoot (Kambalda)	Mt. Keith, Dumont, Perseverance Main	Katinni, Perseverance Main	Delta, Romeo II, Fred's Flow, Boston Creek Unit	Jan shoot (Kambalda), Langmuir, Redstone, Thompson	Kambalda, Langmuir, Donaldson West	Thompson, Nepean, Perseverance 1A, Redross, Redstone, Trojan, Windarra

### **MINERALIZAÇÃO DO TIPO V (OFFSET)**

A última mineralização, denominada de tipo V, ocorre em falhas e zonas cisalhadas na rocha hospedeira, associado ao minério do tipo I. Apresentam textura brechada, tipicamente heterolítica, comumente empobrecida em cromo, platina e ouro em relação aos minérios magmáticos. É formado em estágio sin-tectônico, mobilizado a partir de sulfetos maciços e intersticiais.

### **III.2 GEOLOGIA DO DEPÓSITO**

O Depósito de Fortaleza de Minas, de idade arqueana, está hospedado na Unidade Morro do Níquel da porção noroeste do Segmento Fortaleza de Minas do Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro (Figura 3). Esses terrenos do tipo greenstone afloram no sudoeste do Cráton do São Francisco, bloco de Paramirim, na região sudoeste do Estado de Minas Gerais.

Tais terrenos correspondem a espessos pacotes vulcânicos de natureza komatiítica e toleítica, intercalados com níveis de metassedimentos químicos, interpretados como períodos de quiescência do vulcanismo.

Essas rochas vulcânicas e metassedimentares, contínuas por mais de 80 km de comprimento e espessura máxima de 5 km, são limitadas por zonas de cisalhamento transcorrente. Na região constituem uma seqüência metavulcano-sedimentar de forma alongada, denominado de Cinturão Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro. Esse cinturão é parte integrante do *Greenstone Belt* Morro do Ferro (TEIXEIRA 1978; TEIXEIRA E DANNI, 1979 a e b).

Na região onde se localiza o depósito, Brenner et al. (1990) reconheceram uma sucessão estratigráfica constituída de três ciclos de derrames principais, designados respectivamente como, inferior, intermediário e superior (Figura 4).

As unidades inferior e superior são semelhantes. Da base para o topo são constituídas de derrames basálticos de natureza komatiítica, lentes komatiíticas subordinadas com raros níveis de textura *spinifex* preservados, intercalações de derrames basálticos toleíticos e tufos basálticos ricos em sulfetos em íntima associação com *metacherts* grafitosos sulfetados. O topo dessas unidades é sempre marcado pela presença de formações ferríferas bandadas principalmente da fácies óxido e silicática (BIFs).

A unidade intermediária, que contém o depósito, consiste de quatro ciclos vulcânicos ultramáficos diferenciados, capeados por formações ferríferas bandadas, do qual podem ser interpretados como produtos de cristalização fracionada a partir de um magma parental komatiítico com 28,9%wt de MgO, com o acúmulo de cristais de olivina, clinopiroxênio e plagioclásio. Todos os derrames iniciam-se com uma unidade serpentínica de natureza komatiítica, seguidos de clinopiroxenitos, com altos teores de Ca e baixos de Al e horizontes de texturas ortocumuláticas. Os piroxenitos gradam transicionalmente para metabasaltos (anfíbolitos) completando o ciclo e por fim são recobertos pelas formações ferríferas bandadas, com espessura variável de poucos centímetros até 20 metros.

O ciclo superior do derrame intermediário, informalmente denominado como ciclo mineralizado O'Toole, é mais uniforme e contínuo que os demais e hospeda na sua porção basal o depósito de sulfeto maciço de Fortaleza de Minas. O corpo de minério, no *footwall*, faz contato basal com a formação ferrífera do ciclo anterior e é recoberto sucessivamente por serpentinitos maciços (olivina peridotito) com espessura média de 13 m, clinopiroxenito com espessura de até 15 m, anfíbolitos (metabasaltos) que representam a unidade mais espessa do ciclo com espessura aproximada de 20 m e por último são recobertos por formações ferríferas bandadas com espessura máxima de 12 m.

Os pormenorizados estudos visando a modelagem estrutural do depósito de Fortaleza de Minas, realizados por Santos (1996), complementando as idéias de Brenner et al. (1990), e corroborados por Carvalho (1998) e Carvalho et al. (*no prelo*), mostram que além do controle estratigráfico, o corpo de minério, de forma tabular, estende-se paralelamente a uma zona de cisalhamento transcorrente sinixtrógira, dúctil-rúptil e de orientação geral N50W/80SW por mais de 1700m de extensão (Figura 5), com espessura média de 5 metros e profundidades superiores a 700m (Figura 6). As reservas de minério são consideradas como  $8 \times 10^8$  ton, com teores médios de 2,2% de Ni, 0,4% de Cu, 0,05% de Co e 1,2ppm de platinóides (BRENNER et al, 1990).

Santos (1996) concluiu que vários fatores contribuíram para a formação da jazida, entre os quais cabe ressaltar o ambiente e a litologia originais favoráveis à existência de sulfeto primário; a implantação da zona de cisalhamento transcorrente rúptil-dúctil; o caráter transtensional dessa zona de cisalhamento, a qual gerou o embaciamento acompanhado de cisalhamento e abertura concomitantes ao longo de

planos e zonas de cisalhamento preferenciais (N75W, N30W, N50W, e de extensão), e a presença de quatro direções preferenciais que funcionaram como condutos de percolação de fluídos e de remobilização e concentração do minério a pequenas distâncias (praticamente *in situ*).

### III.3 PRINCIPAIS TIPOS DE MINÉRIO

Quatro tipos texturais principais de minérios são reconhecidos no Depósito de Fortaleza de Minas, diferenciados entre si pela quantidade de sulfetos, teores, ganga e características texturais e/ou estruturais, referidos como de formação ferrífera, brechóide, intersticial e disseminado, respectivamente do *footwall* (lapa) para o *hanging wall* (capa):

O **minério brechóide (BR)** ocorre em contato com um espesso e contínuo horizonte de formação ferrífera no *footwall* da mina. Esse minério corresponde a uma brecha com matriz de sulfeto maciço com fragmentos líticos de proporções e tamanhos variados de formação ferrífera, talco xisto e serpentinito.

A composição mineralógica da matriz varia de 60 a 70% de sulfetos, 10 a 15% de óxidos e 10 a 20% de silicatos (serpentina, clorita, tremolita), constituindo o minério mais rico do depósito.

O aumento nas dimensões e tamanhos dos fragmentos líticos (brechas) no minério maciço, geralmente coincide com uma atenuação na deformação cisalhante, o que caracteriza o surgimento da textura brechóide grossa. Por outro lado, as zonas com maiores taxas de deformação cisalhante levam ao surgimento de textura brechóide fina, devido a cominuição desses fragmentos. Esse processo é que determina a ampla variação percentual dos teores de níquel no minério brechóide variável entre 2 até 8%.

O minério BR individualiza-se na forma de corpos lenticulares, de dimensões variadas que se distribuem irregularmente ao longo de toda a jazida. Face à sua maior proporção de sulfeto e, portanto maior ductibilidade, este sofreu maior remobilização, fazendo contatos transicionais e tectônicos com os demais tipos de minério. Estratigraficamente o minério brechóide está situado na porção basal do corpo mineralizado, sobreposto à formação ferrífera.

O **minério intersticial (IN)** é caracterizado por uma matriz de minerais silicáticos (antigorita) (>60%) envoltos intersticialmente por sulfetos e óxidos, num arranjo semelhante à textura *intercumulus* de origem magmática. Geralmente é constituído por cerca de 30 a 45% de sulfetos e 10% de óxidos. Esse minério mostra-se menos deformado em relação ao minério brechóide (mais dúctil) e disseminado (mais rúptil) devida a maior proporção de opacos e silicatos.

Concentra-se em duas ou mais zonas, forma corpos lenticulares em contato tectônico com os tipos brechóide e disseminado. Repousa sobre o tipo brechóide e apenas localmente pelo adelgaçamento ou interrupção do brechóide pode ocorrer em contato direto com a formação ferrífera na lapa.

O **minério disseminado (DS)** é formado por uma matriz de serpentina com finas disseminações de sulfetos intercrescidos (pirrotita, pentlandita e calcopirita) à serpentina, magnetita granular e clorita reliquiar na porção superior do corpo mineralizado. É constituído por aproximadamente 85% de ganga silicatada (serpentina, tremolita, clorita e talco), 5 a 10% de sulfetos e 8 a 10% de magnetita. Esse tipo é mais freqüente na porção central da galeria e estratigraficamente localiza-se sobre o intersticial.

O **minério** designado de **formação ferrífera bandada (SC)** corresponde às concentrações sulfetadas em camadas, fissuras e falhas presentes nos horizontes de formação ferrífera ( fácies silicatada, óxido e subordinamente sulfeto) que faz contato com o minério brechóide no *footwall*.

Sua ocorrência é mais freqüente nas extensões laterais da jazida e são representadas por remobilizações do corpo de minério original para as encaixantes metassedimentares (BIFs) que apresentam altos teores de  $\text{SiO}_2$  e baixos de  $\text{MgO}$ . Apresenta entre 65 a 90% de minerais silicatados (cumingtonita, grunerita, actinolita e quartzo), 5 a 15% de sulfetos e 5 a 20% de magnetita.

#### ***III.4 ASSOCIAÇÃO MINERAL METAMÓRFICA DAS ENCAIXANTES***

As rochas hospedeiras dos corpos mineralizados do Depósito de Fortaleza de Minas são representadas por produtos metamórficos de rochas ígneas ultramáficas (minérios disseminado e intersticial, serpentinito e talco xisto) e de formações ferríferas bandadas (BIF), além de partes de zonas de cisalhamento ricas em talco. As associações mineralis descritas nessas rochas são aquelas comumente observadas em litologias ultramáficas e de formações ferríferas que foram afetadas por processos metamórficos regionais em fácies anfíbolito e retrometamorfismo em fácies xisto verde.

A associação de rochas ricas de Fe (BIF) com rochas ultramáficas resultou na formação de várias fases ferro-magnesianas, refletindo na presença de duas séries de anfibólios, representadas pelas soluções sólidas cummingtonita-grunerita e tremolita-

actinolita-ferroactinolita. São também partes integrantes da assembléia silicática as fases hidratadas como talco, serpentina e clorita. A adição de CO<sub>2</sub> no sistema permitiu a cristalização de carbonatos, principalmente de magnesita e dolomita. Outros minerais como cromita, magnetita e quartzo constituem a assembléia mineralógica das rochas encaixantes.

A serpentina, o mineral silicático dominante, surgiu a partir da hidratação da olivina (forsterita) e/ou piroxênio enstatita, em condições metamórficas de baixo grau, podendo permanecer estável durante o metamorfismo regional de fácies anfibolito. Pode substituir pseudomorficamente cristais de olivina, preservando as feições texturais originais da rocha e do minério.

O talco é mais comumente desenvolvido durante a alteração hidrotermal de rochas ultramáficas e/ou durante o retrometamorfismo regional na passagem de fácies anfibolito para fácies xisto verde atuante em rochas dominadas por olivina (forsterita) e piroxênio magnésiano. Esse mineral está presente no depósito na forma de talco xisto individualizado, bem como, em quantidades significantes em zonas de cisalhamento proeminentes. Subordinadamente é encontrado em quantidades variáveis entre os minérios de sulfeto, principalmente o do tipo brechado.

### ***III.5 EVOLUÇÃO TECTONO-METAMÓRFICA DO MINÉRIO***

A assembléia de minerais de minério no Depósito de Fortaleza de Minas é relativamente simples, constituindo na ordem de importância de pirrotita, pentlandita e calcopirita e magnetita como o principal óxido. A assembléia é convincente com uma origem relacionada a processos de fracionamento a partir de lavas ultramáficas, conforme discutido por Carvalho et al. (1992; *no prelo*). Além disso, as relações texturais e as fases sulfetadas, de comum acordo com modelos genéticos modernos, como o clássico, conhecido como bola de bilhar (NALDRETT e CAMPBELL, 1982; LESHER et al., 1984; LESHER e STONE, 1996) demonstram que eles representam produtos solidificados a partir de uma solução sólida monossulfetada (MSS) modificados por processos deformacionais e metamórficos posteriores a sua formação. Esses processos tectono-metamórficos estão presentes nos corpos de minério e em suas rochas hospedeiras na forma de zonas de cisalhamento, milonitização, recristalização e modificações texturais, revelam a história evolutiva do depósito.

Carvalho et al. (1992) entendem que os corpos de minério sulfetados descritos nos segmento vulcano-sedimentar de Alpinópolis apresentam um comportamento evolutivo similar ao apresentado pelo depósito de sulfeto maciço de Fortaleza de Minas, considerando que ambas as origens possam ser explicadas através de estágios evolutivos, discutidos a seguir:

### ***ESTÁGIO 1 – ORIGEM MAGMÁTICA DO DEPÓSITO NO ARQUEANO***

Depósitos magmáticos de sulfeto de Ni-Cu-Co-(PGE) são resultados da segregação e concentração de gotas de sulfetos a partir de um magma máfico ou ultramáfico e do particionamento de elementos calcófilos do fundido silicático saturado em enxofre antes, durante ou após *emplacement*, a temperaturas superiores a 900°C. Os minerais são colocados por concentração nesse líquido devido principalmente ao ajuste gravitacional dos sulfetos mais densos.

Estudos de equilíbrio de fases em sistemas Cu-Fe-Ni-S e Fe-O-S demonstraram que fases sulfetadas formadas primeiramente, acompanhadas pela formação de magnetita, são fases pirrotíticas e cupríferas, comumente referidas como Solução Sólida Monossulfetada (MSS).

A medida em que o magma cristaliza-se e resfria-se, inicia-se a precipitação de minerais ferro-magnesianos, tais como olivina, ortopiroxênio, cromita, entre outros. Desta forma a composição do líquido inicial é modificada até a cristalização de todo magma. A tendência é ocorrer empobrecimento de ferro e magnésio e enriquecimento de elementos calcófilos, tais como níquel, cobre, cobalto e elementos do grupo da platina (NALDRETT, 1981).

A magnetita é normalmente o primeiro mineral a se cristalizar a temperaturas entre 1010 a 1040°C dependendo da composição total do sistema e das fugacidades de O<sub>2</sub> e S<sub>2</sub>. A cristalização da magnetita empobrece o líquido sulfetado em Fe<sup>+3</sup> e a composição do líquido residual migra para um ponto eutético, onde é iniciada a co-precipitação da fase sulfetada.

O líquido sulfetado rico em níquel cristalizará de forma simples, gerando uma fase sulfetada homogênea de alta temperatura, a MSS, que mantém todo o níquel, cobre e cobalto em solução sólida.

Durante o resfriamento, os limites composicionais das fases são significativamente reduzidos, exsoluções de calcopirita, pentlandita e pirita (a depender da composição do líquido) ocorrem. A fase primária principal, a MSS, sofre considerável recristalização e mudança composicional, como cobre e níquel exsolvido na forma de calcopirita e pentlandita, respectivamente.

A capacidade da MSS em reter cobre é reduzida a 1% a 500°C, portanto grande parte da calcopirita precipita nessa temperatura (até superior), cristalizando-se na forma de agregados policristalinos anedrais intersticiais a MSS.

Níquel, em contraste, pode permanecer dissolvido dentro da MSS em grandes quantidades a temperaturas abaixo de 200°C. A exsolução de níquel na forma de pentlandita (a qual possui estabilidade termal máxima de 610°C) é controlada pela composição da MSS.

Quando a temperatura decresce tal que a composição do minério seja semelhante a MSS, a pentlandita é exsolvida. Se isto ocorrer em temperaturas altas o bastante, taxas de difusão são suficientemente rápidas para permitir a segregação de pentlandita em vênulas policristalinas situadas entre os grãos de MSS, principalmente em junções triplíceis de agregados policristalinos de pirrotita.

A difusão de níquel a partir da MSS forma lamelas de exsoluções de pentlandita cristalograficamente orientadas com o decréscimo da temperatura. Abaixo de 100-200°C, as taxas de difusão são aparentemente insuficientes para exsolver pentlandita como grãos nos limites da MSS, e as lamelas orientadas conhecidas como *flames* estão contidas dentro da MSS e finalmente quase todo o níquel retido é expelido (pirrotita nesses minérios costumam conter menos que 0.5 wt% de níquel).

Enquanto que pentlandita formada no início cresceu em pontos dentro do cristal, as tardias na forma de lamelas, comumente cristalizaram-se ao longo de pequenas fraturas ou em outras imperfeições que forneceram lugares mais adequados para a nucleação.

Uma idade arqueana (2.7Ga) é atribuída a jazida e suas encaixantes baseada em datação recente de U/Pb. Neste estágio foram gerados os tipos de minério maciço, intersticial e disseminado, constituídos principalmente de pirrotita, pentlandita, calcopirita e magnetita, consonante com o Modelo Bola de Bilhar proposto por Naldrett (1973).

## ***ESTÁGIO 2 – INTENSO METAMORFISMO E DEFORMAÇÃO NO TRANSAMAZÔNICO***

Após a formação da jazida no Arqueano, a área foi afetada por intensos processos deformacionais e metamórficos progressivos regionais que resultaram na geração da foliação  $S_1$ , muitas vezes preservadas no interior dos corpos de sulfetos, e atingiram condições de fácies anfibolito com temperaturas superiores a  $750^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Este evento possivelmente está relacionado ao cavalgamento dúctil-rúptil ocorrido no início do processo colisional.

Nas rochas ultramáficas, a olivina permaneceu estável e os piroxênios foram parcialmente convertidos provavelmente para hornblendas. Nas formações ferríferas foram formadas cummingtonita, hornblenda e Fe-actinolita.

Após o dobramento regional e do ápice do metamorfismo o depósito foi afetado por metamorfismo retrógrado em fácies xisto verde, atestado pela associação paragenética de clorita, tremolita e serpentina. Esse evento foi o responsável pela geração da foliação milonítica de transposição  $S_2$ - $C_2$ , que corresponde à foliação principal da área. Durante esse evento, os corpos sulfetados sofreram intensa deformação, recristalização, estiramento e brechação, assumindo a configuração atual do depósito.

Nas rochas ultramáficas as olivinas são convertidas para serpentina e/ou talco e os piroxênios e hornblendas para actinolita-tremolita e clorita. Nos sedimentos as paragêneses mostram-se estáveis. Algumas das falhas profundas podem ter sido ativadas durante esse período.

Esse evento é interpretado como de idade Transamazônica (2.0Ga) (FERNANDES, 2002) conforme isócrona K/Ar obtida em formações ferríferas na jazida.

## ***ESTÁGIO 3- ÚLTIMO EVENTO TECTONO-METAMÓRFICO NO ARQUEANO***

Durante o Brasiliano (0.6Ga), grandes falhamentos transcorrentes ocorreram no embasamento, moveram-se em caráter sinixtrógiro, provavelmente durante os empurrões dos sedimentos do Grupo Araxá-Canastra sobre o embasamento associado ao metamorfismo progressivo regional em fácies xisto verde acompanhado de alteração

hidrotermal e que, em algumas áreas, atingiu fácies granulito e anatexia. Tal metamorfismo não conseguiu recalibrar a idade radiométrica das formações ferríferas (2.0Ga) e promoveram a alteração dos serpentinitos para carbonato-talco xistos em zonas cisalhadas.

Esse evento provoca o surgimento de falhas de direção NE, dobrando coaxialmente a foliação anterior, gerando uma nova foliação, dada principalmente por crenulações e *kink bands* ( $S_3$ ).

Ao final desse último evento tectono-metamórfico que atuou na região, foram geradas soluções hidrotermais de natureza diversas que afetaram o corpo mineralizado bem como as rochas hospedeiras do minério, gerando um novo tipo de minério, aqui designado de Minério Maciço Hidrotermal (MMH).

Esse minério (MMH) ocorre como veios e/ou brechas em falhas transversais tardias que cortam a hospedeira (capa) não sendo observado na lapa. Apresenta características tardi a pós-tectônicas e associa-se a processos hidrotermais ligados a carbonato e talco em zonas brechadas e cisalhadas.

O metamorfismo progressivo das rochas hospedeiras magnesianas associado ao depósito sulfetado de Ni-Cu-Co desenvolveu uma grande variedade mineralógica. Cada assembléia mineral estável reflete as condições de temperatura, pressão e pressão parcial de  $CO_2$  das quais pode-se inferir as condições que a mineralização foi submetida, estabelecendo o equilíbrio que era mantido. A natureza da assembléia mineralógica do Depósito de Fortaleza de Minas demonstra que esse equilíbrio nem sempre foi mantido, conforme atesta a presença de evidências de processo metamórfico regressivo.

Pode-se concluir que o Depósito de Fortaleza de Minas, de origem arqueana, foi intensamente deformado, onde os tipos de minério brechóide, intersticial e disseminado representam o minério original que foi reformado durante a evolução regional tectono-metamórfica ocorrida no Proterozóico. Já o minério de formação ferrífera e o minério maciço hidrotermal representam remobilizações posteriores do minério original (magmático), ocorridas durante o último evento tectono-metamórfico de idade brasileira que atingiu a região.

## CAPÍTULO IV. CORPOS DE MINÉRIO MACIÇO HIDROTERMAIS

---

### *IV.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA*

Face às evidências de alteração hidrotermal presentes na assembléia de minerais sulfetados e nas encaixantes do minério maciço hidrotermal, faz-se a seguir uma síntese dos principais conceitos que embasam a teoria de formação de depósitos minerais relacionados à atuação de sistemas hidrotermais.

O termo “sistemas hidrotermais” é atribuído a um conjunto de caracteres (material rochoso, fluídos e fonte de calor) e processos, que se encontram organizados o suficiente para provocar redistribuição de massa (materiais) e energia no sistema rochoso, através da circulação de fluídos aquecidos que percolam fissuras, fraturas, falhas e outros espaços abertos no material rochoso. Processos de substituição de minerais e/ou geração de novas associações de minerais implementados durante a atuação desses processos que podem ainda, provocar modificações mineralógicas e químicas no seu ambiente de atuação, incluindo a alteração hidrotermal das paredes.

Os fluídos hidrotermais são soluções eletrolíticas, onde a água representa o constituinte principal acompanhada de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e S. Em menores quantidades ocorrem CO, HCL, HF,  $\text{H}_2$ , N, Cl, F, B sob a forma de ânions e complexos aniônicos, além de compostos como cloretos de Na, K, Mg e Ca,  $\text{NH}_4$ , metais (Fe, Pb, Cu, Zn, S, Mo, Ni, Co, Mn), fluoretos, teluretos, arsenetos e  $\text{SO}_2$ .

A temperatura desses fluidos aquecidos, designados como soluções hidrotermais, variam desde  $30^\circ\text{C}$  até por volta de  $700^\circ\text{C}$ . Quando responsáveis pela formação de concentrações minerais hidrotermais, estudos de inclusões fluídas, isótopos e outros geotermômetros mostram que esses fluidos apresentam predominantemente temperaturas entre  $200^\circ\text{C}$  e  $400^\circ\text{C}$ , atuando sobre pressões de 1 a 3kb. A salinidade dessas soluções varia de aproximadamente 3 a 50% em peso de sólidos dissolvidos, que geralmente são mais elevadas que a água do mar, conforme dados de inclusões fluídas.

Idealmente os fatores essenciais para a formação de concentrações hidrotermais são: (1) soluções mineralizantes aquecidas disponíveis capazes de dissolver e transportar elementos químicos; (2) aberturas disponíveis nas rochas através das quais as soluções possam canalizar-se; (3) lugares disponíveis para a deposição do conteúdo

mineral; (4) fonte de calor capaz de manter o aquecimento das soluções por um longo tempo; (5) estoque metálico nas litologias que são percoladas pelas soluções; (6) gradiente de temperatura para permitir a geração de fluidos convectivos às soluções hidrotermais; (7) reações químicas que resultem em deposição; (8) metalotectos que promovam a deposição dos elementos químicos presentes na solução e (9) concentrações suficientes de mineral depositado para constituir em depósito econômico.

Estudos de águas hidrotermais em minas, túneis, furos de sondagens e *hot springs*, revelaram que as soluções hidrotermais com metais dissolvidos podem originar a partir de: (1) fluido residual rico em água, a partir da cristalização do magma; (2) água meteórica (água pluvial); (3) água oceânica aquecida a grandes profundidades ou próximos a corpos intrusivos; (4) água do mar aprisionada em sedimentos quando da sua formação (água conata); (4) material volátil expelido das rochas durante metamorfismo. Muitos depósitos foram gerados pela mistura de duas ou mais fontes de água. Como fonte de calor pode-se citar qualquer feição geológica capaz de produzir anomalias térmicas positivas em determinado local.

O transporte dos metais como íons simples em soluções aquosas, no intervalo de pH neutro a levemente ácido, condições comumente atribuídas à maioria dos depósitos, tem sido considerado bastante improvável devido à baixíssima solubilidade de sulfetos em soluções aquosas (BARNES, 1979). Assim, vários formadores de complexos solúveis têm sido propostos como meios alternativos de transporte de metais e sulfetos metálicos. Os ligantes mais prováveis e importantes na formação de depósitos são  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{OH}^-$ , em temperaturas mais elevadas  $\text{NH}_3$  e  $\text{F}^-$  e mais baixas  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{SCN}^-$  e ligantes orgânicos. De importância local têm ainda sido proposto outros ligantes formadores de complexos de Se, Te, As, Sb,  $\text{PO}_4^{2-}$  e Bi.

Se uma solução for muito rica em enxofre, tais como  $[\text{Zn}(\text{HS})_3^-]$  e  $[\text{HgS}(\text{H}_2\text{S}_2)]$ , poderá formar e carrear uma quantidade significativa de metais em solução. Já complexos clorídricos (soluções ricas em cloro), tais como  $\text{ZnCl}_2$  e  $\text{CuCl}_3^{2-}$ , formados abaixo de certas condições são capazes de transportar metais em pequenas concentrações de íons sulfetados dissolvidos.

Em especial, os metais do grupo da platina, como platina e paládio são transportados como complexos cloretos, hidróxidos e dissulfetos, dependendo do pH,  $f\text{O}_2$ , temperatura e concentração dos ligantes em soluções. Resultados experimentais de Mountain e Wood (1987) indicam que os complexos de cloro são importantes somente

em condições de alta oxidação, acidez e alcalinidade no intervalo de 25-300°C, mas devem se tornar mais importantes a temperaturas mais altas. Os complexos de OH predominam sobre os de cloro em condições de pH neutro a levemente básico, e os dissulfetos, em condições semelhantes de pH, alta atividade de enxofre e temperatura no intervalo de 250-400°C.

Uma solução hidrotermal, antes de atingir o estágio de deposição, poderá ter percorrido dezenas ou centenas de quilômetros. Durante esse trajeto, ela reage com as rochas encaixantes extraindo ou depositando materiais. A partir da observação de sistemas hidrotermais modernos concluiu-se que as soluções hidrotermais fluem por razões diversas, citando-se aqui, entre outras: (1) quando há diferença no equilíbrio hidrostático entre a entrada e saída de água no sistema hidrotermal; (2) quando a pressão litostática de uma coluna de rocha compactada reduz a porosidade e expulsa o conteúdo fluído para cima; (3) quando a pressão osmótica desenvolvida por litologias que se comportam como membranas naturais, tais como xistos, pode produzir a força necessária para dirigir águas para bacias sedimentares; (4) a existência de diferenças de densidades induzidas por fontes aquecidas locais tais como intrusão de rochas ígneas, fazendo com que as águas tenham um maior volume específico e por conseqüência menor densidade; (5) fluxos muito salinos e, portanto muito densos afundam provocando ascensão (convecção) de fluídos menos salinos, (6) fluxo ascendente também pode ocorrer quando liberados no final do processo de resfriamento de magmas, (7) fluxos ocorrem quando reações de desidratação liberam soluções como conseqüência do metamorfismo (SKINNER, 1997).

O movimento de soluções hidrotermais da fonte para o local de deposição é fortemente condicionado pelas aberturas presentes nas rochas, que necessariamente precisam estar conectadas. Vários tipos de aberturas em rochas podem servir como receptadores de mineralizações ou permitir o movimento de soluções ou de seus constituintes através das rochas, como fissuras, fraturas, veios, falhas, bem como espaços porosos, zonas de cisalhamento e rochas alteradas. As rochas alteradas são propícias à substituição hidrotermal podendo formar concentrações minerais mais significativas do que aquelas que ocorrem por preenchimento de espaços abertos.

Segundo Barnes (1997) a formação de depósitos hidrotermais é influenciada por quatro fatores principais como: (1) mudança de temperatura; (2) mudança de pressão;

(3) reações químicas entre a solução e as rochas encaixantes e (4) reações químicas quando um fluido hidrotermal mistura-se com uma solução de diferente composição.

(1) Mudanças de temperatura podem causar precipitação de três maneiras: (a) influenciando na solubilidade de óxidos e sulfetos; (b) afetando na formação e estabilidade de complexos iônicos transportadores de metais; e (c) influenciando as constantes de hidrólise de ligantes, tais como  $Cl^-$ , envolvidos na formação de complexos.

Os efeitos da temperatura na solubilidade são bastante complexos, mas atualmente é possível estimar a soma dos diferentes efeitos e, portanto, prever a mudança na solubilidade de dado mineral, devido ao aumento ou queda da temperatura. Em muitos casos, não em todos, o declínio da temperatura causará uma redução da solubilidade e assim uma solução poderá atingir a saturação e conseqüentemente ocorre a precipitação de minerais de minério. Para formar um depósito mineral, a queda de temperatura deve ocorrer em uma área localizada.

Muitos caminhos têm sido sugeridos, incluindo reações endotérmicas entre soluções e minerais. Quase todos os efeitos, exceto três, parecem ser muito pequenos para conduzir a queda da temperatura.

O primeiro efeito, e provavelmente o mais importante na queda da temperatura, é a mistura de solução quente ascendente com massa de água fria próxima a superfície, tanto em ambientes terrestres como marinhos. O segundo efeito de resfriamento é devido a descompressão adiabática, conhecido como *throttling*. Uma rápida queda da temperatura local ocorrerá quando a pressão do fluido aproximar-se da superfície mudando de litostática para hidrostática. O terceiro refere-se a queda de temperatura devido a perda de calor das rochas encaixantes. O mecanismo tem-se mostrado efetivo na precipitação de espécies minerais abundantes na solução, tal como quartzo; e menos efetivo para concentrações minerais menos abundantes, tais como sulfetos, devido a perda de calor ocorrer a grandes distâncias, onde a mineralização é distribuída esparsamente.

(2) Mudanças de pressão pode causar alterações da solubilidade, mas o efeito não se mostra efetivo se não há separação de uma fase de vapor. Mudanças grandes de pressão, na ordem de 1000bars, são necessárias para causar uma precipitação significativa, e há poucas circunstâncias que tal mudança aconteça em uma região localizada.

Um efeito isotermal controlado pela pressão e de importância significativa na causa da precipitação mineral é o *boiling*. Esse mecanismo apresenta dois importantes efeitos: aumenta diretamente a concentração da solução e, mais importante ainda é a remoção de constituintes voláteis, deixando a solução mais alcalina e menos capaz de transportar os metais.

(3) Reações químicas entre a solução e as rochas nos canais são significativas e de fundamental importância para a precipitação de soluções hidrotermais. Essas reações têm sido extensivamente estudadas e existem aparentemente três diferentes tipos de reações importantes: (1) Reações que produzem íons  $H^+$  em solução para reagir com as paredes. Predominantemente o quimismo das soluções hidrotermais é levemente ácido, e extrair os íons de  $H^+$  da solução tenderia a reduzir a estabilidade dos complexos transportadores e permitir a precipitação dos minerais sulfetados. Os tipos mais comuns de reações que consomem íons hidrogênicos são (a) soluções de carbonatos e (b) hidrólises de feldspatos e minerais máficos para formar micas e argilas. (2) Reações de trocas entre as paredes e soluções hidrotermais provocam em ambos a adição de novos constituintes. A adição de enxofre reduzido causa precipitação de sulfetos. (3) Mudança no estado de oxidação da solução por conta das reações com as paredes das rochas, provocam mudanças de valências em certos metais ou na estabilidade de certos complexos iônicos. Dois importantes processos onde o estado de oxidação pode ser influenciado são a redução devido a serpentinização e a adição de matéria carbonática. Os efeitos de compostos carbonáticos são particularmente importantes, pois eles não somente influenciam o estado químico dos metais em solução como também causam a redução de  $(SO_4)^{2-}$  em solução para formar  $H_2S$ . Esse último processo tem o mesmo efeito que adicionar enxofre reduzido de uma fonte externa.

(4) Mudanças químicas a partir da mistura de soluções hidrotermais de diferentes composições são muito comuns na causa de precipitação de minério. Os efeitos são, contudo difíceis de serem demonstrados, como por exemplo, quando uma solução misturada pode ser assumida como tal, até porque é impossível separar os efeitos termais dos químicos. Uma mistura pode adicionar um componente precipitante, como  $H_2S$ , a solução ou pode mudar a acidez e a concentração de tal maneira que reduza a estabilidade dos complexos iônicos e conduzir a precipitação.

As alterações hidrotermais representam o resultado da alteração de rochas ou minerais com soluções aquosas, mais ou menos enriquecidas em sais com fases sólidas

pré-existentes. Reações químicas de sistemas abertos, como é o caso, resultam do equilíbrio químico parcial a total entre as rochas encaixantes e o fluido hidrotermal para formar um depósito hidrotermal.

Os fatores determinantes na intensidade e nos tipos de alterações hidrotermais estão relacionadas à natureza das rochas fontes, composição do fluido hidrotermal, condições de pressão e temperatura, mudança composicional do fluido hidrotermal e presença de certos constituintes tal como a presença de  $H_2S$  que pode tornar a solução fortemente ácida. A variação destes fatores pode resultar em significativas variações nos tipos de alteração hidrotermal. Os tipos de alteração hidrotermal mais frequentes são carbonatação, silicificação, sericitização, cloritização, argílica e propilítica.

Algumas assembléias minerais de alteração e a composição das soluções sólidas podem conter as condições de pressão e temperatura da alteração bem como revelar as condições de pH e redox do fluido hidrotermal.

Relações estreitas entre a alteração hidrotermal e os minérios primários podem existir se fases de alterações posteriores modificarem suas propriedades, tais como configuração espacial, mineralogia, porosidade e permeabilidade entre outros. Nesse sentido pode ocorrer a total dispersão da concentração, ou ainda, gerar um depósito totalmente novo ou **reformado**.

Em muitos depósitos minerais hidrotermais, mudanças na mineralogia e textura das rochas encaixantes são observadas e funcionam como guias e indicadores de soluções associadas à formação de depósitos minerais e podem ser úteis para interpretações de condições químicas e físicas da deposição mineral. A assembléia de minerais hidrotermais fornece importantes informações sobre as idades relativas dos vários estágios de hidrotermalismo que formaram o depósito, além das condições químicas e físicas em que o minério foi depositado.

O reconhecimento e aplicação dos vários tipos de alteração hidrotermal ou alteração das paredes das rochas constituem uma importante ferramenta de exploração, já que os halos de alteração são muito mais expressivos que os pequenos alvos dos depósitos escondidos de minério.

## **IV.2. GEOLOGIA DOS CORPOS DE MINÉRIO MACIÇO HIDROTERMAIS (MMH) NO DEPÓSITO DE SULFETO MACIÇO DE FORTALEZA DE MINAS.**

### **IV.2.1 INTRODUÇÃO**

Durante os trabalhos de mapeamento geológico de detalhe (1:500) conduzidos pelo geólogo da Mineração Serra da Fortaleza Thomas L. Brenner observou-se pela primeira vez nas paredes laterais da cava, onde o minério já havia sido extraído, a presença de um novo tipo de minério.

Em relações de campo, observou-se que a formação desse minério esteve ligada a processos de substituição de três tipos principais - talco xisto, serpentinito e minério maciço brechóide. A mineralização foi remobilizada para sistemas de falhas, fissuras e fraturas secundárias tardias, de direção N-S e NE-SW, perpendicularmente a orientação da zona de cisalhamento (N50W/80SW), a qual é encaixante do corpo de minério principal. Os corpos estudados mantêm íntima relação de contato com o corpo de minério principal *no hanging wall*, não sendo observado no *footwall*.

Os corpos de minério maciço hidrotermal apresentam pequenas dimensões, de ocorrência restrita. Distingue-se dos demais pelo posicionamento espacial, assembléia mineral, teor, quimismo, textura e estrutura.

### **IV.2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MINÉRIO MACIÇO HIDROTERMAL**

O minério maciço hidrotermal é constituído por uma matriz oxi-sulfetada maciça, dominada por pirrotita, pentlandita, calcopirita, pirita, violarita e magnetita, contendo minerais de carbonato, talco, clorita e fragmentos líticos silicáticos.

Nas proximidades do contato entre esse tipo de minério e suas encaixantes são observadas feições típicas de alteração hidrotermal de parede do tipo talco-carbonato-clorita-sulfeto e de preenchimento de vênulas, veios, fissura, fraturas e foliações pretéritas das rochas encaixantes. Essas feições, observadas no sentido das encaixantes proximais para o centro do corpo de minério hidrotermal, nota-se que:

(1) As rochas encaixantes proximais são principalmente serpentinito e talco xistos estéreis, mostrando processos de brechação e de alteração hidrotermal do tipo

carbonatação caracterizada pela deposição de carbonatos (ankerita-dolomita) em fraturas e vênulas. Essas fraturas, por sua vez, são preenchidas nos seus planos axiais interbrechas por uma fase tardia de sulfetos (pirita e pirrotita) totalmente isentos de deformação (Figura 7).

(2) Quando hospedado em talco-xisto, o processo de substituição dessa encaixante é mais efetivo e intenso, gerando a variedade mais rica em níquel e minerais do grupo da platina do tipo de minério designado como minério maciço hidrotermal (Figura 8).

(3) A formação do minério (MMH) em rochas serpentínicas permite observar no contato entre o serpentinito hospedeiro e o corpo minério maciço hidrotermal, típicas auréolas de alteração de parede a partir de um fluido rico em  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{SiO}_2$ , Mg, Ca e metais como ferro, cobre, níquel gerando um zoneamento mineralógico caracterizado por:

- (a) Faixas centimétricas de carbonatos com menores quantidades de sulfetos com limites ligeiramente sinuosos nas encaixantes e no minério (Figura 9). No serpentinito é nítido o avanço da frente hidrotermal de alteração carbonática através de fraturas e da foliação pretérita (Figura 10 e 11);
- (b) Faixas centimétricas dominadas por minerais isentos de deformação, tais como, calcopirita, carbonato, talco e pirrotita nas rochas encaixantes serpentinizadas (Figura 7);
- (c) Localmente observam-se concentrações maciças de calcopirita (Figura 12), ou alternância entre bandas maciças de calcopirita e bandas ricas em pirrotitas e pentlandita com matriz carbonática (Figura 13);
- (d) Veios carbonáticos tardios que cortam todo o conjunto e são interpretados como a fase final do estágio hidrotermal (Figuras 10 e 11);
- (e) Nas rochas serpentínicas o avanço das frentes de alteração hidrotermal é ora registrado pelo preenchimento de vênula por calcopirita/pirrotita (Figura 9) caracterizadas por ligeiras deformações tanto dos sulfetos como dos carbonatos; ora por carbonatos e subordinamente sulfeto praticamente sem deformações.

(4) No corpo de minério os processos hidrotermais ocorrem de modo pervasivo e foram capazes de dissolver (reformatar) o minério maciço brechóide, depositando novas associações minerais que caracterizam a nova tipologia de minério (Figura 13). O processo de carbonatação pode também ser bastante intenso e praticamente digere e substitui as rochas serpentínicas hospedeiras no contato com o corpo de minério (Figuras 14 e 15). Localmente observa-se a ocorrência de sulfetação posterior que se hospeda em matriz carbonática (Figura 15). Nas porções mais internas do corpo o processo é mais efetivo ao longo dos planos de fraturas, fissuras e foliações geradas durante o final do último evento tectono-metamórfico Neo Proterozóico que atingiu o depósito e posteriormente gerou as soluções hidrotermais. Ao longo dessas feições são observados cristais centimétricos de pentlanditas (Figura 16) que localmente são venulados concordantemente por veios tardios.

Os processos hidrotermais, por sua vez, provocam uma diminuição drástica nas proporções, dimensões e até ao desaparecimento total dos fragmentos líticos do minério maciço brechóide. Também é responsável pelo incremento nos teores do minério novo, comparativamente ao tipo brechóide de 6% para até 14% de níquel, além de aumento bastante significativo na quantidade de minerais do grupo da platina, pelo menos dez vezes mais do que o encontrado no minério brechóide tradicional, manifestados através de grandes cristais individuais. A diminuição da quantidade de fragmentos líticos, seguido pelo aumento na quantidade e no tamanho de cristais individuais de pentlanditas, bem como as exsoluções de pentlanditas em pirrotitas, confere ao minério maciço hidrotermal uma coloração mais clara em relação ao minério maciço brechóide tradicional.



Figura 7 - Serpentinito encaixante do minério maciço hidrotermal exibindo fraturas preenchidas por carbonatos. Nas posições axiais (centro) dessas fraturas preenchidas por massas carbonáticas ocorrem finos veios sulfetados.



Figura 8 - Minério maciço hidrotermal formado por substituição intensa de talco-xisto. Pode ser observado ainda restos preservados do talco-xisto hospedeiro.

## **CAPÍTULO V. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO MINÉRIO MACIÇO HIDROTHERMAL**

---

### ***V.1 AS ROCHAS ENCAIXANTES***

As rochas hospedeiras do minério maciço hidrotermal (MMH) são constituídas principalmente por serpentinitos e talco-xistos, cujas descrições encontram-se sumarizadas a seguir.

#### ***V.1.1 SERPENTINITO***

As rochas serpentínicas envolvidas com o MMH podem ser agrupadas em dois conjuntos principais, ou seja, serpentinitos maciço e manchado, caracterizados pela maior ou menor intensidade de processos de talcificação e carbonatação.

O serpentinito maciço apresenta coloração cinza escuro, granulação muito fina e estrutura comumente homogênea. Microscopicamente consiste de agregados de finos cristais de serpentina, formando uma textura placóide entrelaçada (textura em feltro), tipificando a variedade antigorita. Junto à serpentina ocorrem pequenos cristais de clorita, carbonato, talco, sulfetos (predominantemente pirrotita) e óxidos (magnetita principalmente). As proporções modais desses minerais são bastante variáveis, onde a serpentina perfaz de 72,0 a 90,0%, carbonato de 0 a 13,0%, clorita de 0 a 3,5%, talco de 0 a 9,0%, sulfeto de 0,1 a 4,0% e magnetita de 6,0 a 16,0%.

O aspecto manchado desse serpentinito é devido a porções formadas por agregados de carbonato submilimétricos a milimétricos de formas arredondadas e irregulares orientados segundo a foliação principal com opacos associados. Os minerais presentes são clorita, talco, serpentina, opacos (magnetita), sulfetos (predominantemente pirrotita). Venulações carbonáticas são comuns, sendo normalmente discordantes da foliação. Algumas venulações apresentam texturas de intercrescimento entre sulfeto e carbonato. As proporções modais variam na serpentina de 50,0 a 85%, carbonato de 9,0 a 38%, clorita de 0 a 8,0%, talco de 0 a 21,0%, sulfeto de 0,5 a 4,0% e magnetita de 4,5 a 15,0%.

A proporção modal média dos serpentinitos é de 69,0% antigorita, 12,5% carbonatos, 7,5% talco, 8,8% magnetita, 1,0% clorita e 1,4% sulfeto.

### **V.1.2 TALCO-XISTO**

São rochas que de modo geral, estão fortemente foliadas, compostas por uma matriz filossilicática de talco e clorita que contornam agregados carbonáticos e de opacos (magnetita e sulfetos). Como no caso anterior, as rochas talco xisto relacionados aos corpos de minério do tipo MMH podem ser subdivididos em três variedades distintas devido suas diferenças texturais e/ou proporções modais, ou seja, carbonato-clorita-talco xisto; clorita-carbonato-talco xisto e carbonato-talco xisto.

Os carbonato-clorita-talco xistos mostram-se menos foliados que os demais e localmente podem apresentar-se maciços. Possuem uma matriz cinza escura de granulação fina, com porções milimétricas a centimétricas mais esverdeadas (porções mais ricas em clorita) e menos freqüente com porções cinza esbranquiçadas (mais ricas em carbonatos). Microscopicamente essas rochas são constituídas por uma matriz de talco e clorita de granulação fina que contornam agregados de clorita, de carbonatos e cristais de magnetita. As proporções modais variam de 41,0 a 74% de talco, 6,1 a 26,5% de carbonato, 10,5 a 23,0% de clorita, 0 a 2,0% de sulfeto e 5,0 a 8,5% de magnetita.

As rochas classificadas como clorita-carbonato-talco xisto são sempre foliadas, de granulação fina e coloração cinza. Apresenta-se homogêneo sendo comuns faixas carbonáticas (branco acinzentadas) milimétricas a centimétricas ao longo da foliação. O talco, mineral predominante, na maioria das vezes ocorre sozinho compondo faixas contínuas orientadas, que contornam agregados ou cristais de carbonatos e opacos (magnetita e pirrotita) e menos freqüentemente estas faixas envolvem cristais de clorita. As proporções modais variam de a 50,0 a 53,0% de talco, 31,5 a 34,5% de carbonato, 4,1 a 10,0% de clorita, 1,0 a 2,0% de sulfeto e 5,0 a 8,0% de magnetita.

E por último as rochas denominadas como carbonato-talco xisto milonitizados possui coloração acinzentada, granulação muito fina, sendo possível distinguir porções milimétricas de coloração mais escura (cinza escuro) que normalmente envolvem zonas mais claras (cinza esbranquiçado). Os milonitos são constituídos por uma massa extremamente fina de talco e de pequenas proporções de clorita (< 7,0%) que contornam grãos ou agregados de carbonatos e cristais de magnetita. Os opacos presentes são a magnetita e em pequenas proporções sulfetos (pirrotita). As proporções modais variam de 45,0 a 61% de talco, 28,0 a 44,0% de carbonato, 2,0 a 7,0% de clorita, 0 a 1,5% de sulfeto e 4,0 a 7,0% de magnetita.

A proporção modal média estimada é de 55% talco, 27% carbonato, 9% clorita, 7% magnetita e 0,8% sulfetos.

## ***V.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO MINÉRIO MACIÇO HIDROTHERMAL***

### ***V.2.1 PRINCIPAIS MINERAIS DE MINÉRIO***

Os principais minerais sulfetados presentes no minério maciço hidrotermal são por ordem de abundância pirrotita, pentlandita, calcopirita e pirita, sendo a magnetita o principal óxido presente.

A pirrotita representa a matriz (Figura 17) para os demais sulfetos e geralmente está presente na forma de cristais anedrais policristalinos, de granulação grossa com limites poligonais de coloração rosa. Algumas vezes estes contatos tendem a serem levemente curvos correspondendo a junções tríplexes (Figura 18) que atestam a presença de recristalização e crescimento secundário tendo destruído qualquer microtextura primária ou deformacional. É fortemente anisotrópico, pouco pleocroíco, exibe birrefletância marcada pelo resultado da refletividade dos grãos individuais a depender de suas orientações. Esses efeitos também servem para mostrar a posição dos grãos individuais e de seus limites. Está comumente intercrescida e/ou intimamente associada com a pentlandita e localmente com calcopirita (Figura 19) e magnetita.

A pentlandita exibe coloração branca a creme claro e esta presente na forma de agregados de granulação grosseira intercrescido entre os limites dos grãos de pirrotita; exsoluções de borda (Figura 18); na forma de cristais poligonais (Figura 20) os quais exibem proeminente clivagem romboédrica e também na forma de grandes cristais neoformados (Figuras 21) que se destacam na massa pirrotítica, claramente observado em amostras de mão. A pentlandita não raramente ocorre como uma fase sub-sólido, formada pela exsolução da  $M_{\text{S}}$  na forma de finas lamelas (Figuras 18 e 22) em cristais de pirrotita, orientados segundo o plano (0001) e são interpretadas como fases minerais geradas a temperaturas relativamente baixas, em torno de 210°C. É isotrópica, apresenta fundo luminoso e reflectividade maior que a pirrotita.

A calcopirita ocorre como cristais anedrais, algumas vezes geminados, podendo formar localmente agregados policristalinos, intercrescidos com as fases sulfetadas e silicáticas. Exibe coloração amarela-latão e leve anisotropia. Localmente pode se concentrar maciçamente como atestam figuras 23 e 24. Também é comum a presença de calcopiritas ocupando plano de foliação no serpentinito (Figura 25), em fraturas e fissuras de fragmentos líticos (Figura 26) e de magnetita fraturada (Figura 27) e junto a veios carbonáticos.

A pirita presente nas amostras do MMH ocorre no preenchimento de fraturas, veios (Figura 28, 29 e 30) e vênulas (Figuras 31 e 24) os quais cortam todo o minério bem como os cristais romboédricos de carbonatos. Também está presente no contato entre as rochas encaixantes e o MMH (Figura 24). É um mineral tardio, possivelmente formado durante o metamorfismo retrógrado devido à perda de enxofre dos cristais de pirrotita e aumento da fugacidade de  $S_2$ . Apresenta coloração amarela clara, isotropia e dureza alta.

A violarita presente nas amostras do minério maciço hidrotermal está comumente relacionada a alteração hidrotermal dos cristais de pentlandita e pirrotita. A passagem de pentlandita para violarita inicia-se ao longo dos planos de clivagem e fratura existentes na pentlandita granular (Figura 32). Esses planos se unem e formam cristais de violarita orientados paralelamente às direções cristalográficas octaédricas da pentlandita (Figura 33). Em um estágio mais avançado o processo é efetivo e ocorre a completa transformação de pentlandita para violarita (Figura 34), podendo localmente restar alguns grãos. Essa reação libera  $Fe^{2+}$  e  $Ni^{2+}$  em solução. O processo de violaritização a partir de cristais de pirrotita dá-se quando esses grãos estão em contato ou próximos a pentlandita violaritizada. Tal processo tem início nos contatos entre os grãos como também a partir de exsoluções de pentlandita em pirrotita (Figuras 32, 35 e 36). A violaritização da pirrotita resulta de sua reação com íons de  $Ni^{2+}$  em solução, liberados durante a alteração da pentlandita. A passagem de pirrotita para violarita cessa quando toda pentlandita tiver sido consumida, liberando  $Fe^{2+}$  em solução em solução.

A magnetita é o óxido predominante. Geralmente forma cristais subedrais e agregados granulares irregulares. Localmente cristais subedrais a anedrais de textura esquelética. Comumente apresentam-se quebrados, com as bordas corroídas, exibem fraturas preenchidas por fases sulfetadas e inclusões de sulfetos (pirrotita, pentlandita e calcopirita) com as faces arredondadas (Figura 37). Ocorrem associados a fases

sulfetadas e silicáticas e também como massas de magnetita neoformadas no contato entre a rocha encaixante e o MMH (Figura 38 e 39). São comumente observadas vênulas de carbonatos contornando cristais de magnetita (Figura 40). É isotrópica, de cor cinza com ligeiro tom acastanhado.

## **V.2.2 PRINCIPAIS MINERAIS ACESSÓRIOS**

Cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>, esfalerita e ilmenita são minerais acessórios mais comuns, aparecendo sempre em proporções inferiores a 1% na grande maioria das amostras.

A esfalerita apresenta-se como cristais muito finos, geralmente inclusos e/ou associados à calcopirita (Figura 23). Apresenta reflexões internas marron-amarelado, bem característico desse mineral.

A ilmenita presente ocorre na forma de cristais subedrais a anedrais e lamelas de exsolução em magnetitas.

### **V.2.2.1 MINERAIS DA SÉRIE COBALTITA-GERSDORFFITA**

O minério de Fortaleza de Minas contém significativas quantidades significativas de Co. Uma parte considerável deste elemento está presente na forma de diminutos grãos de minerais da série solução sólida cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>, sendo os minerais acessórios mais comuns. Ocorrem comumente no interior de cristais de pirrotita (Figuras 17, 22 e 41) e eventualmente em pentlandita e calcopirita (Figura 42) ou nos contatos entre calcopiritas e pirrotitas (Figuras 19 e 43).

À luz refletida estes minerais exibem coloração branco creme de aspecto limpo, clivagem perfeita e reflectância alta. É levemente pleocróica nos limites dos grãos. Exibem principalmente formas euedrais e subordinadamente subedrais, com hábito comumente cúbico (Figura 44).

Estudos complementares recentes de análises químicas realizadas com o auxílio de microsonda eletrônica mostraram que os minerais dessa série com frequência apresentam-se zonados. De maneira geral esse zoneamento é irregular e complexo, marcado pela alternância de zonas enriquecidas em cobalto (Ni-cobaltita) e zonas ricas em níquel (Co-gersdorffita) e uma zona intermediária rica com proporções semelhantes

de cobalto e níquel. Perfis químicos realizados em alguns grãos mostra a existência de uma borda irregular niquelífera, seguida por uma zona intermediária rica em cobalto e um núcleo rico em níquel portador de zonas cobaltíferas isoladas (Figura 52). Em outros, a borda é enriquecida em cobalto, enquanto que o núcleo é niquelífero e portador de zonas isoladas ricas em cobalto (Figura 53); variedades com bordas irregulares niquelíferas e núcleos cobaltíferos (Figura 54); além de grãos onde o zoneamento é bastante complexo, marcado pela borda direita espessa rica em cobalto enquanto que a borda esquerda é delgada e niquelífera, com um núcleo também niquelífero e portador de ilhas isoladas ricas em cobalto (Figura 55).

O zoneamento irregular observado nesses minerais pode refletir os efeitos dos fluídos que transportaram e precipitaram proporções diferentes de níquel, cobre e ferro em diferentes tempos; sugerindo que não houve mudanças graduais (evoluidamente) na cristalização progressiva. Assim, o zoneamento deu-se pela variação dos metais de transição (Ni-Co-Fe) bem como pelo decréscimo da temperatura.

Os minerais da série cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> são os principais hospedeiros dos minerais do grupo da platina (PGM) observados em amostras do minério maciço hidrotermal do depósito de Fortaleza de Minas.

As considerações sobre a variação química destes minerais serão feitas no capítulo VI referente à química mineral dos principais minerais presentes no minério maciço hidrotermal.

### ***V.2.3 CARBONATOS E QUARTZO***

No minério maciço hidrotermal é freqüente e importante a presença de fases tardias como carbonatos (calcita, dolomita, siderita, ankerita, segundo análises de difração de raios X e de microsonda eletrônica) e quartzo. A análise microscópica dos carbonatos presentes permite distinguir três tipos de ocorrências, as quais sugerem três fases distintas de carbonatação.

Por essa óptica a primeira fase é marcada pela geração de grandes cristais de carbonato exibindo hábito romboédrico proeminente, com contatos bem definidos. Essa fase, possivelmente, foi formada em equilíbrio com a fase sulfetada principal, pois não apresentam evidências de reações entre si.

Em uma segunda fase, os carbonatos presentes ocorrem na forma de veios de espessura variável de 100 a 300 $\mu$ m. Esses veios interceptam as rochas encaixantes (Figura 45), o corpo de minério principal (Figura 46) e os cristais romboédricos de carbonato. Além disso, aproveitam os planos de clivagem da pentlandita (Figura 47 e 48) e fraturas da calcopirita (Figura 46). É também bastante comum o bordejamento desses veios por vênulas preenchidas por pirita.

A terceira fase de carbonatação, de menor expressão, é caracterizada pela presença de vênulas tardias de espessura milimétrica, que cortam os veios e fraturas preenchidas por carbonatos da segunda fase, preenchem os planos de clivagem de pentlandita (Figura 49), cortam a massa sulfetada (Figura 50) e bordejam grãos de magnetita (Figura 40).

Veios preenchidos por quartzo presente nas amostras do minério maciço hidrotermal são de ocorrência restrita e ocorreram simultaneamente com a segunda fase de carbonatação (Figura 51). Os contatos quartzo/carbonatos são bem definidos, abruptos, retos e sem qualquer evidência de reação.

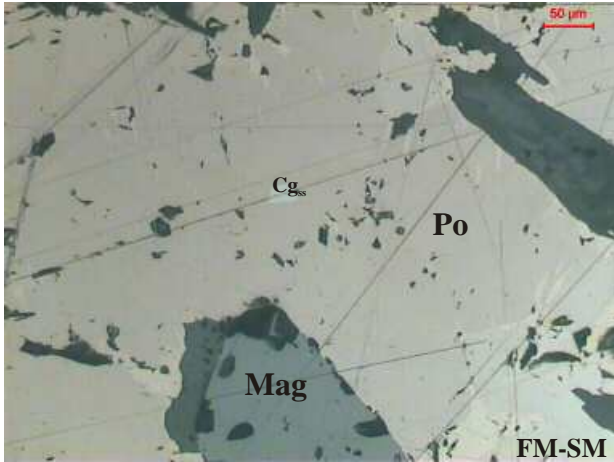


Figura 17 - Apresenta grandes cristais de pirrotita (Po) com inclusões de cristal euédrico de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (Cg<sub>ss</sub>). Observar exsoluções de pentlandita (Pn) em pirrotita (Po). Cristal de magnetita (Mag) ocorre associado a massa sulfetada.

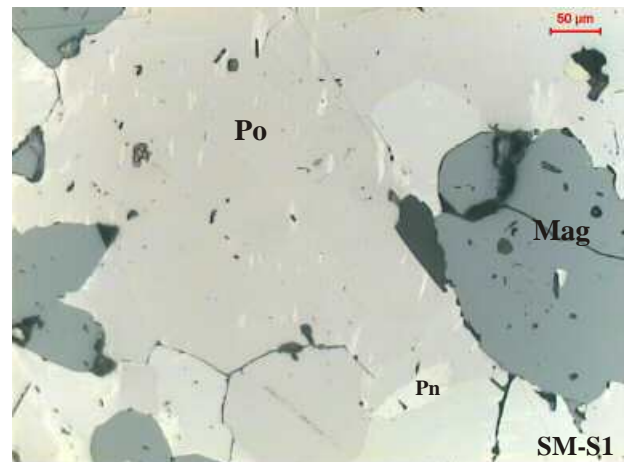


Figura 18 - Ilustra cristais poligonais de pirrotita (Po) com contatos levemente curvos, definindo uma junção tríplice. Pode-se também observar finas lamelas de exsolução de pentlandita (Pn) orientadas em pirrotita (Po).

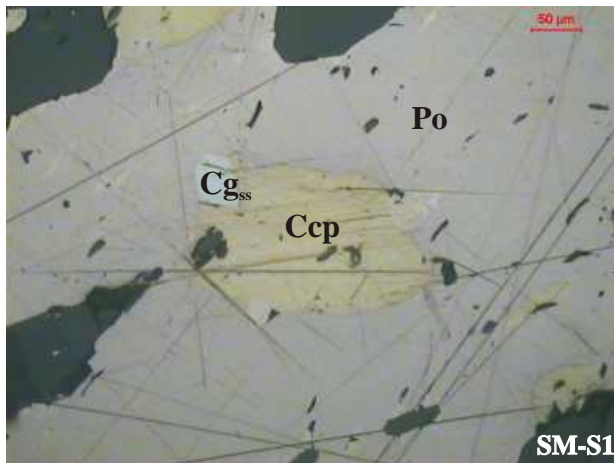


Figura 19 - Ilustra cristal de pirrotita (Po) intercrecido e intimamente associado com calcopirita (Ccp). Observar cristal subédrico de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (Cg<sub>ss</sub>) associado com a calcopirita (Ccp) em contato com pirrotita (Po).

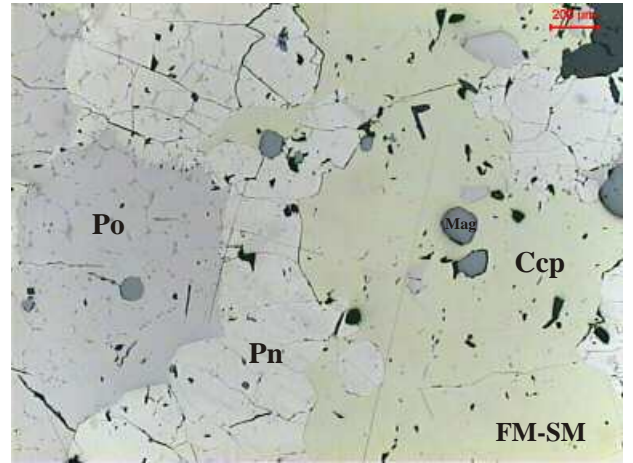


Figura 20 - Mostra grande massa calcopirítica associada a pentlandita (Pn) granular. Cristais de pirrotita (Po) presente no lado esquerdo.

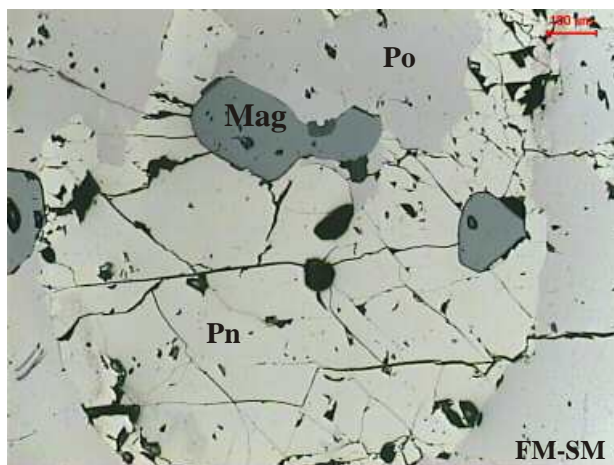


Figura 21 - Apresenta grande cristal de pentlandita (Pn) neoformada associado a pirrotita (Po). A magnetita (Mag) ocorre associada.

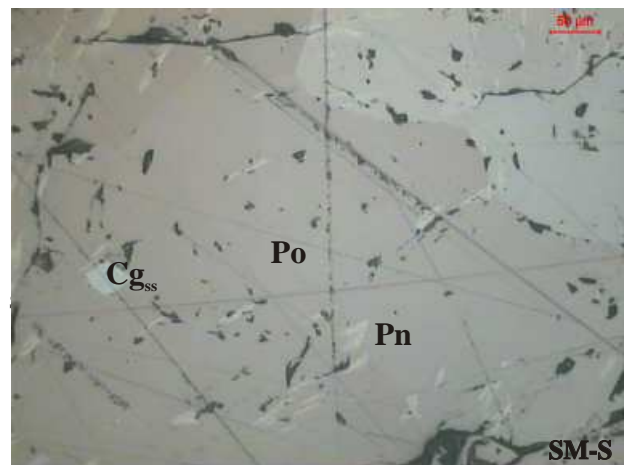


Figura 22 - Ilustra lamelas de exsolução de pentlandita (Pn) orientadas em pirrotita (Po). Cristal subeudral de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (Cg<sub>ss</sub>) ocorre incluso em pirrotita (Po).

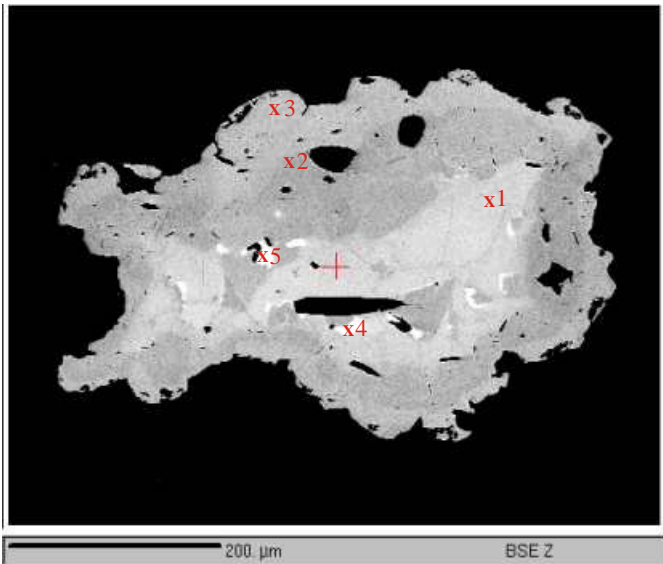


Figura 52 - Imagem de cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> exibindo zonamento. As regiões mais claras correspondem a zonas mais ricas em níquel, enquanto que as mais escuras são enriquecidas em cobalto. Os números em vermelho representam pontos analisados em microsonda eletrônica.

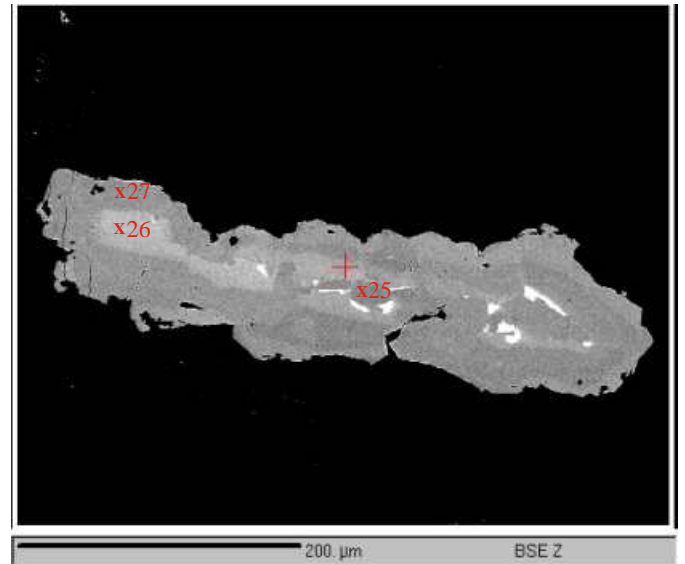


Figura 53 - Ilustra cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> zonado. Observar a borda espessa cobaltífera e um núcleo irregular e delgado enriquecido em níquel.

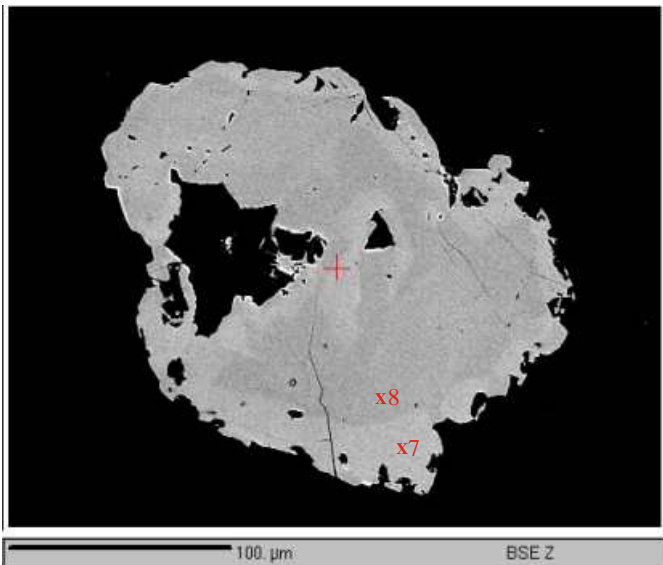


Figura 54 - Mostra grão de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> apresentando zonamento irregular, onde a borda é níquelífera e o núcleo mais espesso é cobaltífero. Observar zonas nucleares enriquecidas em níquel.

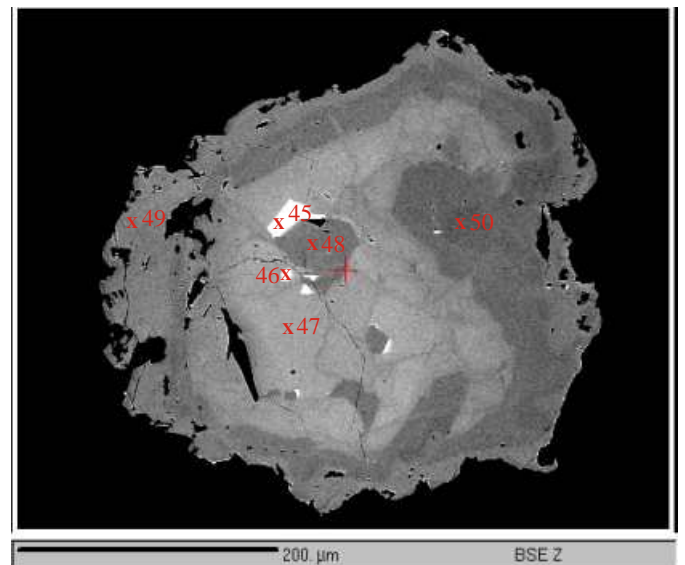


Figura 55 - Apresenta cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> mostrando zonamento complexo. Notar que a borda à direita é mais espessa e cobaltífera, enquanto que a da esquerda mostra-se delgada e níquelífera. O núcleo é enriquecido em níquel, exibindo regiões isoladas ricas em cobalto.

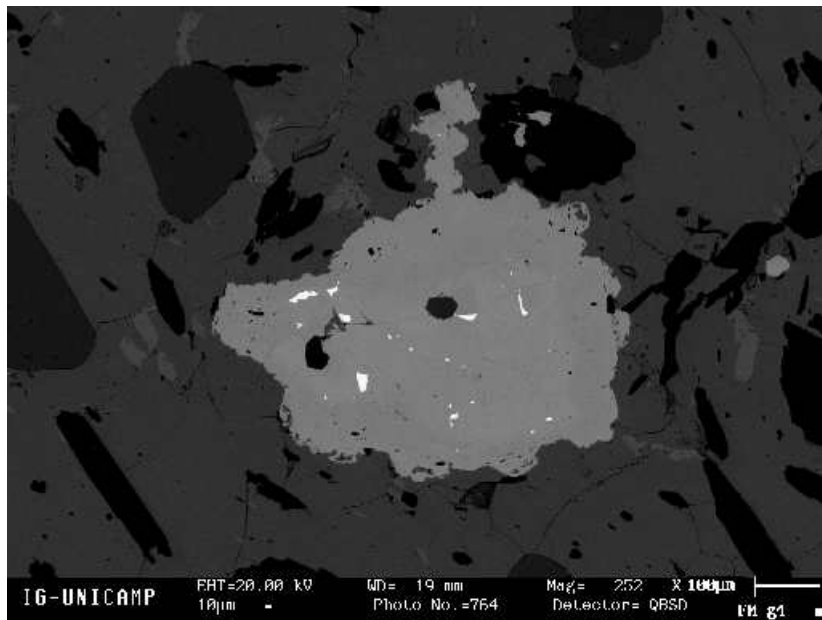


Figura 56 - Cristais de Pd-melonita inclusos em cristal de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>.

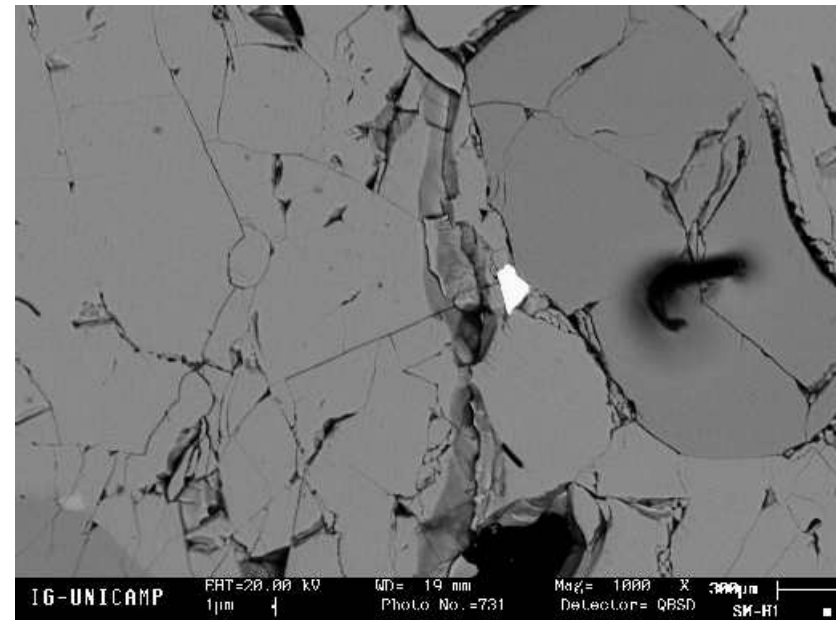


Figura 57 - Cristal de Pd-melonita associado a pirrotita e pentlandita.

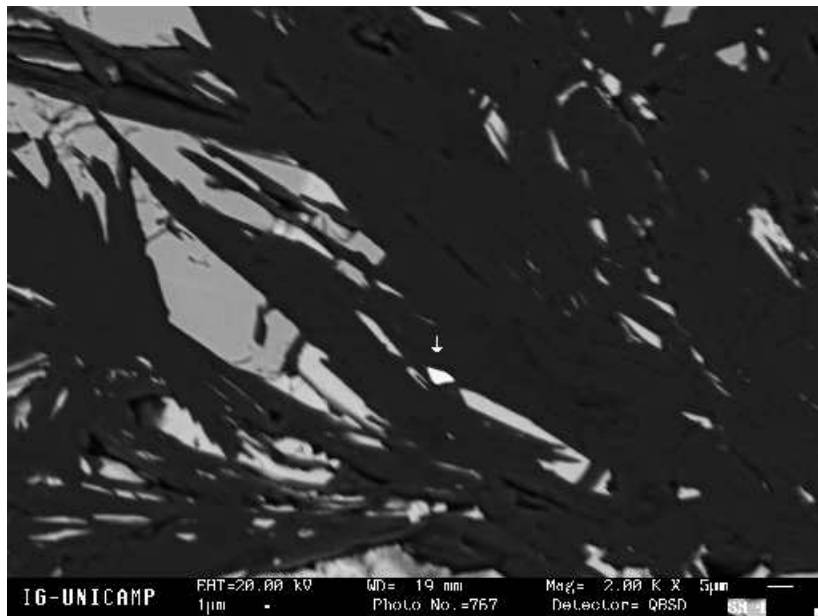


Figura 58 - Cristal de Pd- Melonita disperso na massa serpentínica.



Figura 59 - Pequeno cristal de michenerita disperso em talco.

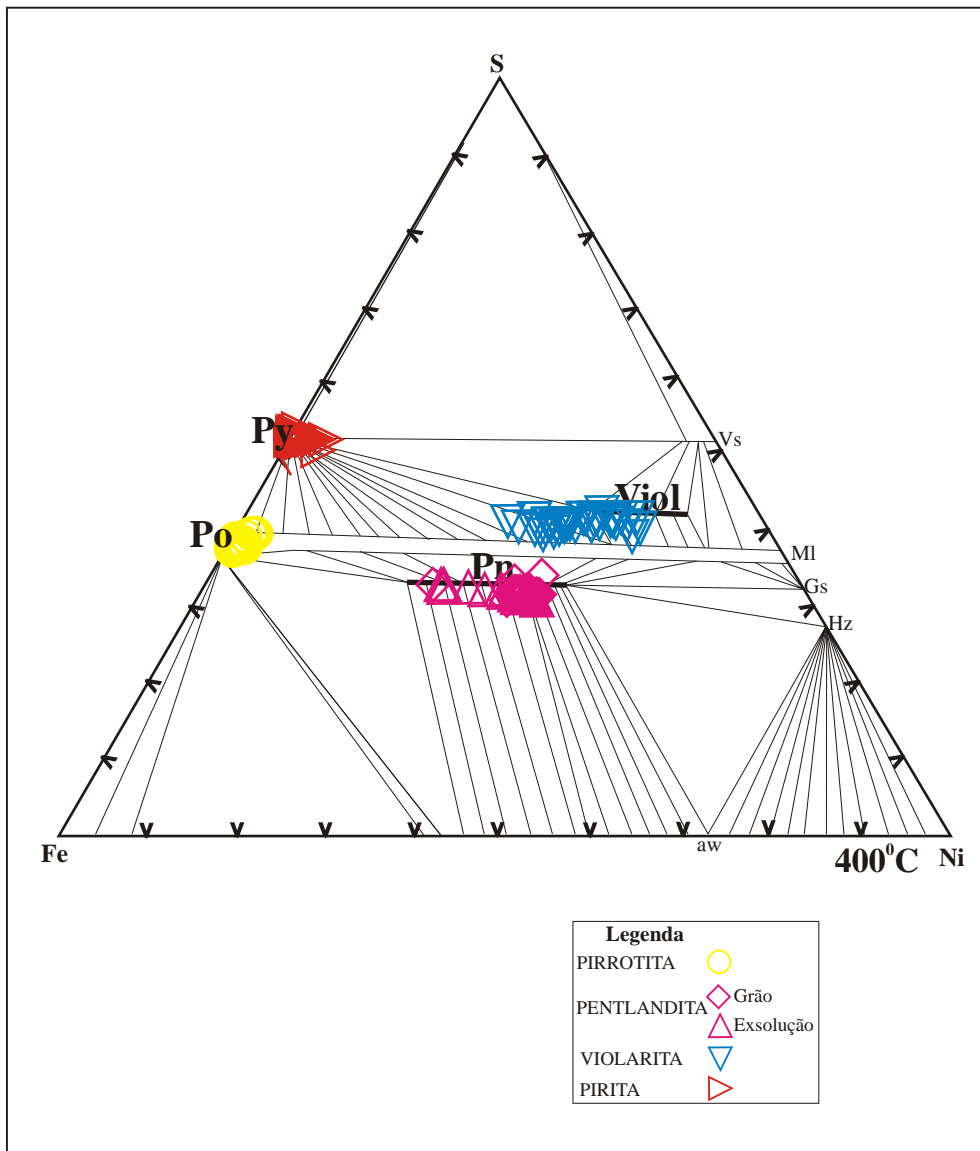


Figura 72 - Seção isotérmica do sistema Fe-Ni-S a 400°C. A fase violarita (Vio), pentlandita (Pn) e godleversikita (Gs) já estão presentes. Dados analíticos obtidos em microsonda eletrônica da fase sulfetada de níquel - pirrotita, pentlandita, violarita e pirita - do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG).

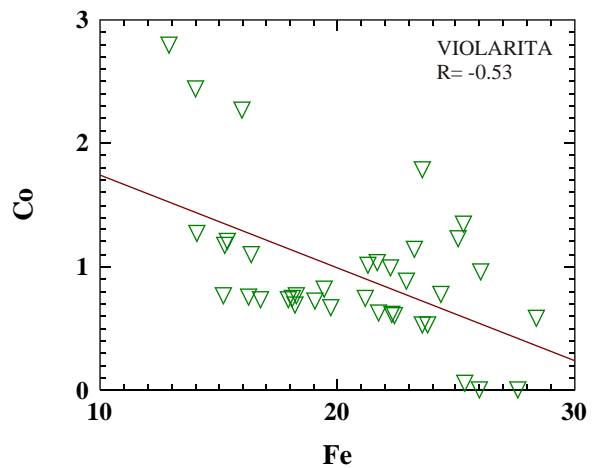
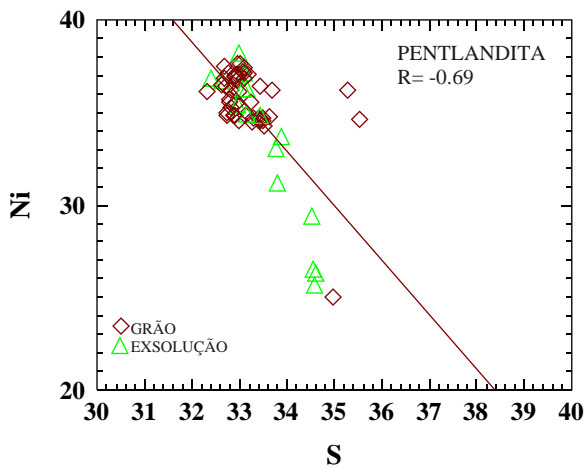
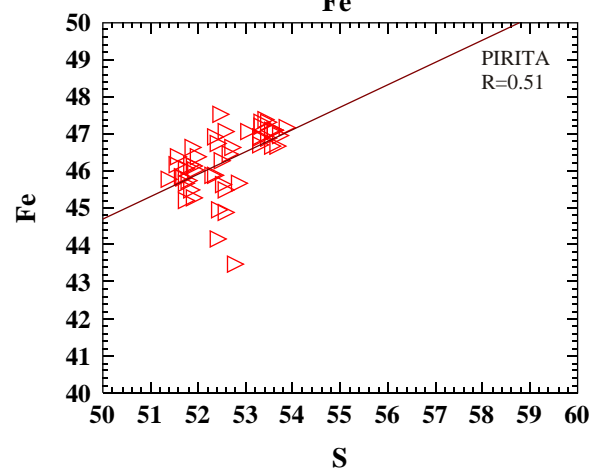
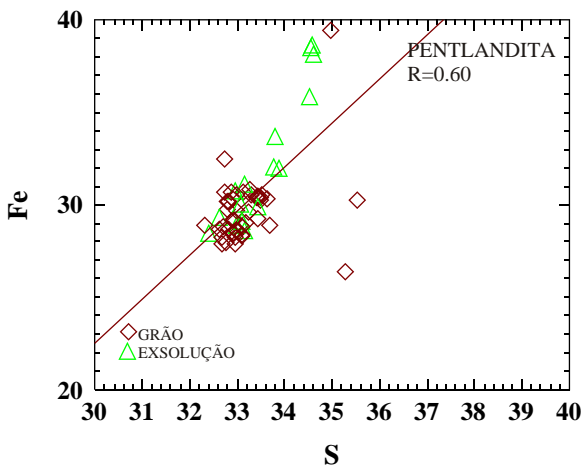
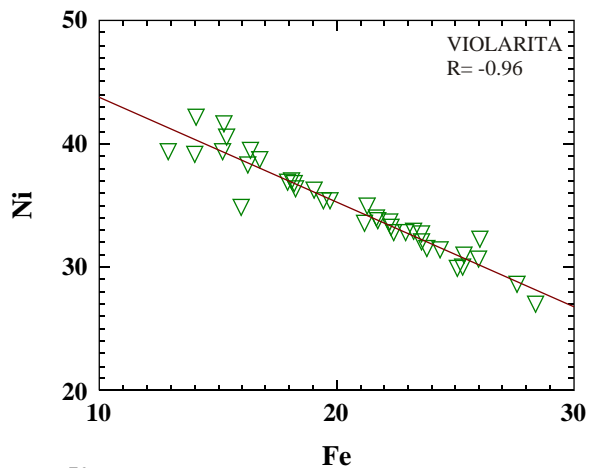
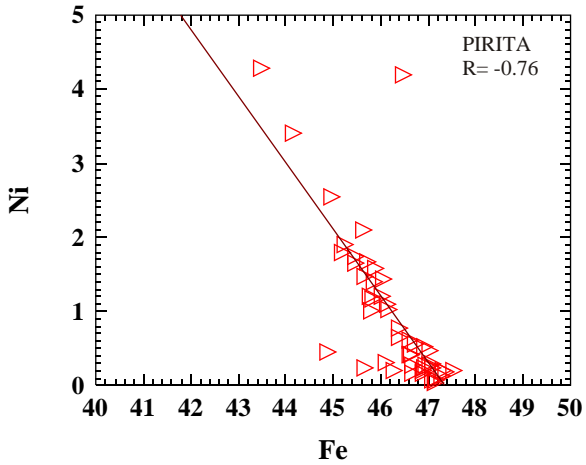
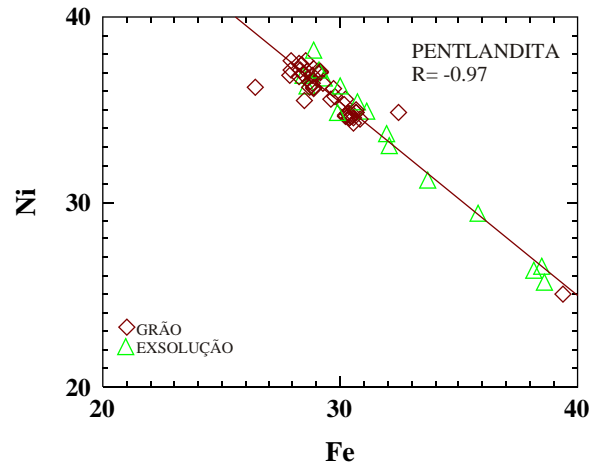
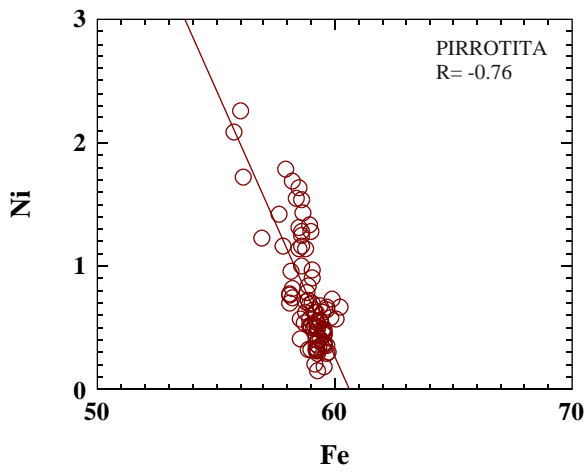


Figura 73 - Diagramas binários mostrando os coeficientes de correlação dos elementos químicos presentes nos principais minerais sulfetados de minério do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG).

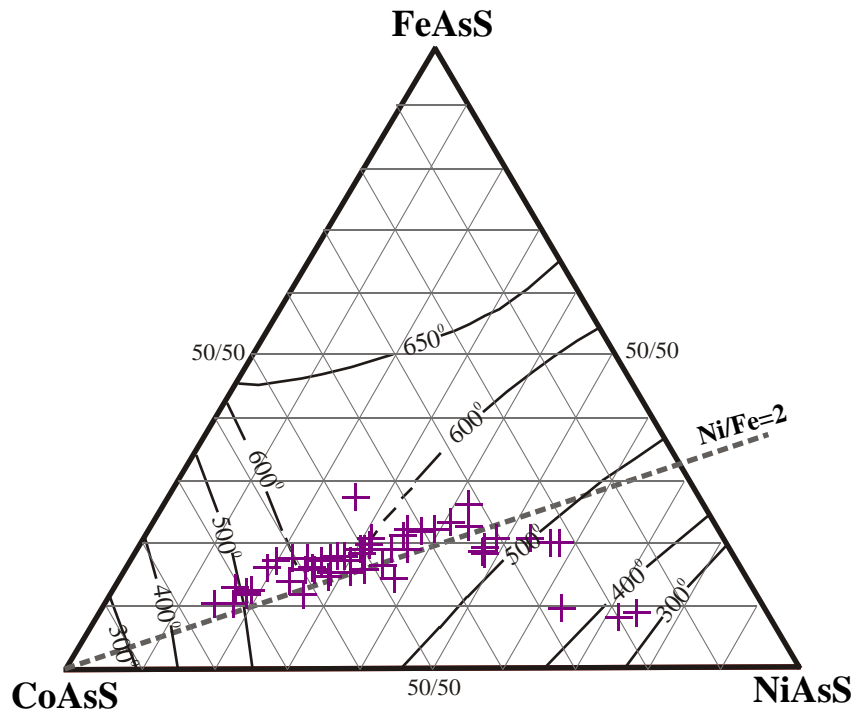


Figura 76 - Dados analíticos de minerais da série cobaltita-gersdorffita presentes no minério maciço hidrotermal, obtidos em microsonda eletrônica, plotados no sistema CoAsS-FeAsS-NiAsS (modificado de Klemm, 1965).

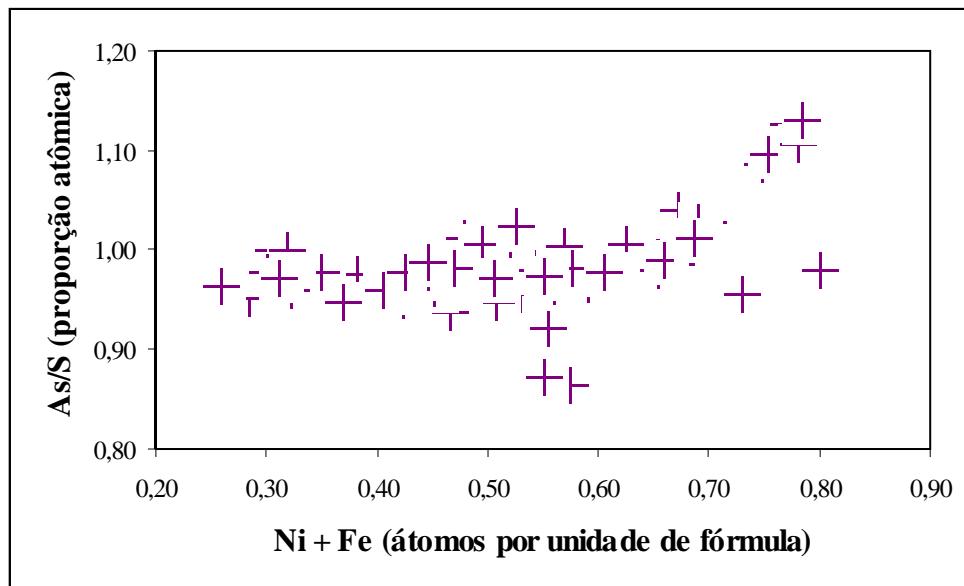
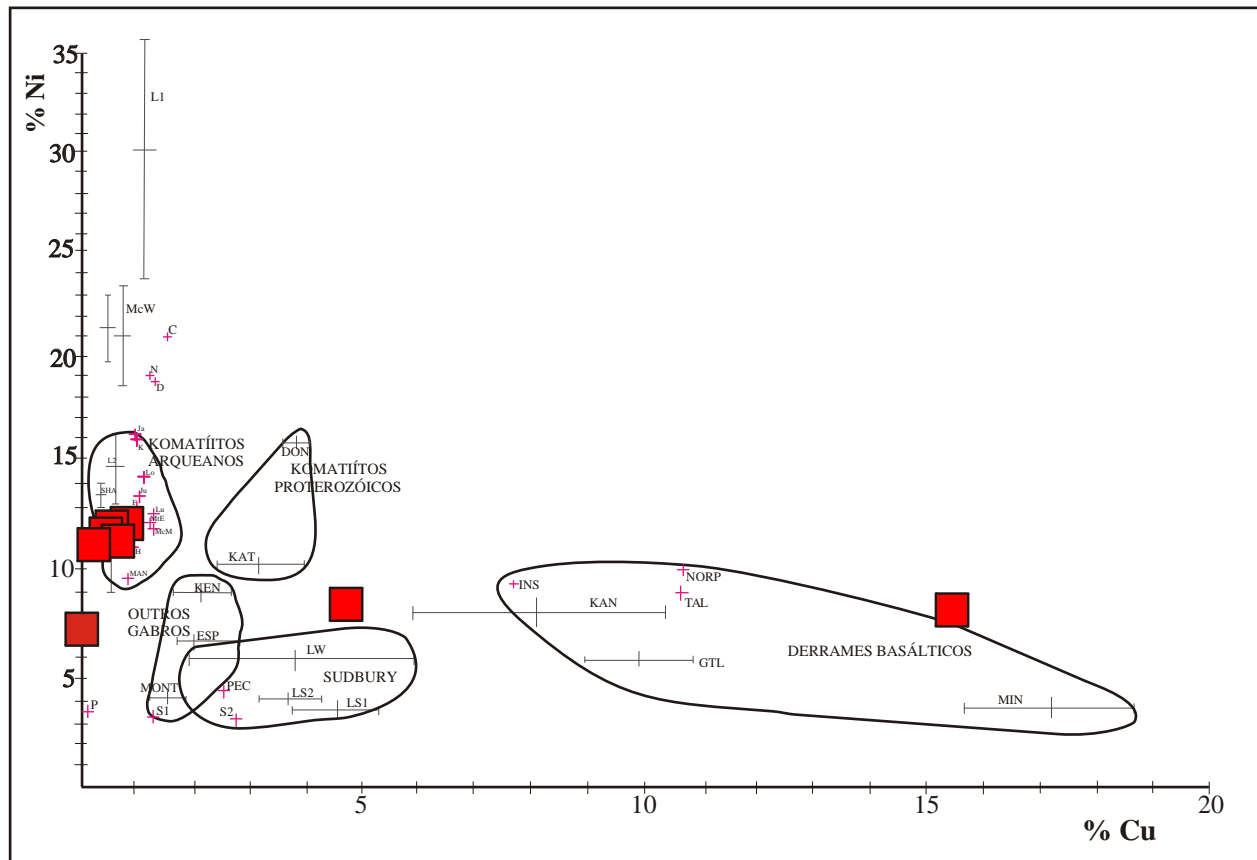


Figura 77 - Relação entre As/S e (Ni+Fe) em minerais da série cobaltita-gersdorffita presente no minério maciço hidrotermal.



(Modificado de Naldrett, 1981)

Legenda	
<b>Depósito de Fortaleza de Minas</b>	
<span style="color: red;">■</span>	MMH
<b>Komatiitos Arqueanos</b>	
Lu	- LUNNON
H	- HUNT
Ju	- JUAN
F	- FISHER
McM	- McMAHON
K	- KEN
D	- DURKIN
Ja	- JAN
C	- CARNILYA
N	- NEPEAN
MtE	- Mt. EDWARD
L1	- LANGMUIR #1
L2	- LANGMUIR #2
EP	- EPOCH
SHA	- SHANGANI
TR	- TROJAN
McW	- McWATTERS
Lo	- LONG
<b>Outros Komatiitos</b>	
P	- PIPE
KAT	- KATNIQ
DON	- DONALDSON WEST
MAN	- MANIBRIDGE
<b>Outros Gabros</b>	
PEC	- PECHENGA
ESP	- ESPEDALEN
MONT	- MONTCALM
KEN	- KENBRIDGE
KAN	- KANICHEE
<b>Sudbury</b>	
S1	- STRATHCONA
S2	- STRATHCONA
LS1	- LITTLE STOBIE #1
LS2	- LITTLE STOBIE #2
LW	- LEVACK WEST
<b>Derrames Basálticos</b>	
INS	- INSIZWA
TAL	- TALNAKH
NORP	- NORIL/SK PICRITE
GTL	- GREAT LAKES
MIN	- MINNAMAX

Figura 79 - Conteúdo de Níquel (Ni % wt) e Cobre (Cu % wt) da fase sulfetada de vários depósitos níquelíferos.

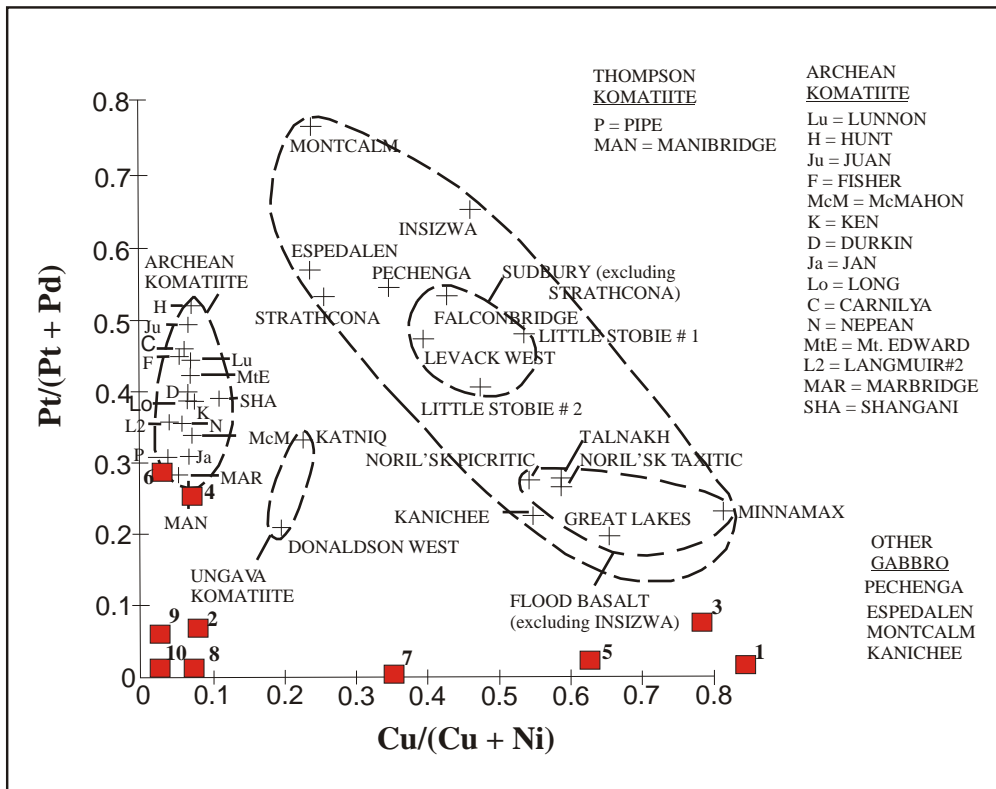


Figura 80 - Razões de Pt/(Pt+Pd) versus Cu/(Cu+Ni) para depósitos de sulfeto de níquel. Os quadrados vermelhos representam amostras do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas.

#### **V.2.4 MINERAIS RAROS**

Os minerais considerados raros identificados no minério maciço hidrotermal pertencem principalmente ao grupo da platina.

Além desses foi ainda observado a presença de vivianita, é um fosfato de ferro hidratado. É caracterizado pela cor azul e pleocroísmo quando exposta a luz solar. Ocorre na forma de cristais prismáticos estriados longitudinalmente, preenchendo planos de clivagem e fraturas de cristais de clorita. É um mineral de origem hidrotermal de baixa temperatura, formado pela passagem de fluido.

As análises de difração de raios X (Anexo I) revelaram minerais de origem hidrotermal da série linnaeita-polydymita e siegenita.

##### **V.2.4.1 MINERAIS DO GRUPO DA PLATINA (PGM)**

Elementos do grupo da platina (PGE) presentes em minérios sulfetados de Ni-Cu-Co em depósitos do mundo inteiro, geralmente apresentam-se como diminutos minerais (PGM) amplamente dispersos no minério.

A localização, documentação e identificação correta destes minerais é um processo difícil e demorado, pois as fases minerais geralmente não são observáveis em microscópios convencionais, além do que comumente ocorrem em teores inferiores a 1ppm. Dificuldades adicionais são relativas às propriedades ópticas dos PGM que são muito semelhantes tornando necessário o emprego de técnicas e equipamentos sofisticados como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microsonda eletrônica.

Um estudo sistemático de lâminas e seções polidas do minério investigado foi realizado a fim de identificar os PGMs presentes no minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas.

Marchetto (1990) identificou no minério maciço brechóide (principal fonte do MMH) a presença de koluskita-melonita seguida por irarsita (idealmente IrAsS) e sperrylita (idealmente PtAs<sub>2</sub>) como os PGMs mais abundantes e outras fases menos comuns como OsAs<sub>2</sub>, OsAsS, OsRhAsS, RuTeAs, OsRuAs, OsAs<sub>5</sub> e um mineral complexo Os-Re-As-Te-Fe-Y-Rh. O estudo da autora concluiu que esses minerais ocorrem como inclusão em cristais de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> e subordinadamente em pirrotita, pentlandita, magnetitas e na ganga silicática.

No presente trabalho identificou-se no minério maciço hidrotermal a presença de vários PGEs na forma de sulfoarsenos, arsenetos, teluretos e bismutoteluretos principalmente de Pd, Ir e Pt e subordinamente de Ru, Rh e Os.

Embasados nos trabalhos de Cabri (1981) e Daltry e Wilson (1997), os minerais do grupo da platina (PGM) identificados e analisados foram classificados como: seis minerais reconhecidos na literatura, sendo: irarsita ( $\text{IrAsS}$ ), merenskyite (idealmente  $\text{PdTe}_2$ ), sperrylita ( $\text{PtAs}_2$ ), michenerita (idealmente  $\text{PdBiTe}$ ), Pd-melonita (idealmente  $\text{NiTe}_2$ ) e froodite (idealmente  $\text{PdBi}_2$ ) e; seis fases minerais: Ir-Rh-As-S, Ru-Te-As, Os-Ru-As, Rh-As-S, Pd-Bi, Pd-Bi-Te.

Os dados analíticos podem ser encontrados no Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos minerais e fases do grupo da platina presentes no minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (dados analíticos obtidos em microscopia eletrônica de varredura).

Elemento	MINERAIS					FASES DESCONHECIDAS					
	Pd-Melonita e Merenskyite	Michenerita	Irarsita	Sperrylita	Froodite	Ir-Rh-As-S	Rh-As-S	Ru-Te-As	Os-Ru-As	Pd-Te-Bi	Te-Bi
Pd	3,77-20,02	22,17-24,78	n.d.	n.d.	17,13-19,07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16,25-20,86	n.d.
Pt	n.d.	n.d.	n.d.	44,33-54,85	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ir	n.d.	n.d.	38,95-60,76	n.d.	n.d.	8,34-36,72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Rh	n.d.	n.d.	0,00-7,28	0,00-0,92	n.d.	4,55-16,94	9,02-28,66	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ru	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	23,52-28,78	6,71-16,55	n.d.	n.d.
Os	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,00-9,51	0,00-2,66	26,87-39,98	n.d.	n.d.
Zr	n.d.	n.d.	n.d.	0,00-7,08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sb	n.d.	n.d.	n.d.	0,00-0,31	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Te	13,06-75,68	25,01-31,17	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	31,39-37,50	n.d.	49,27-68,72	12,49-23,47
Bi	0,84-19,40	41,85-49,16	n.d.	n.d.	75,11-78,98	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	15,93-26,16	46,53-85,49
As	0,00-9,26	n.d.	26,42-35,57	41,96-45,70	n.d.	32,65-47,74	44,05-49,51	23,04-27,54	45,11-53,02	n.d.	n.d.
S	n.d.	n.d.	8,78-12,38	n.d.	n.d.	11,38-16,55	15,03-17,73	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	0,02-17,53	n.d.	0,00-3,71	0,00-1,77	n.d.	1,53-8,39	3,39-10,12	n.d.	0,00-3,46	0,00-2,31	n.d.
Co	0,00-5,98	n.d.	0,00-3,41	n.d.	n.d.	1,87-7,39	4,56-11,28	0,00-1,49	0,00-5,62	n.d.	n.d.
Fe	0,17-3,78	1,28-1,92	0,00-6,50	0,00-4,10	0,99-1,95	2,01-4,90	2,51-3,85	2,45-6,86	2,55-7,02	0,00-0,50	0,00-1,26
Cu	0,00-1,31	0,00-1,95	0,00-1,52	n.d.	n.d.	0,00-1,31	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

n.d. = não detectado

#### V.2.4.1.1 PALÁDIO (Pd)

O paládio é o elemento do grupo da platina (PGE) mais abundante no minério maciço hidrotermal. Confirmado também por análises química do minério (rocha total) na qual foi detectado até 40g/ton desse elemento. Esta presente na forma de minerais como Pd-melonita; merenskyite, michenerita e froodita e fases minerais como Pd-Bi e Pd-Bi-Te.

As variações composicionais nas Pd-fases estão baseadas no mecanismo de substituição envolvendo Pd e Ni – Bi e Te. Este tipo de substituição foi observado no Complexo Duluth onde, uma fase sulfetada de Bi e Ni (parkeita) foi transformada para a fase Pd-Bi-Ni-Te com uma substituição envolvendo principalmente Pd e Ni como resultado da atuação de processos hidrotermais (MOGESSIE et al., 1991). Esta relação pode ser similar para substituição de Pt-Ni por Pd e Sb por Bi nas fases michenerita-merenskyite em Sudbury (CABRI e LAFLAMME, 1976).

A presença de quantidades variáveis de Pd em melonita (idealmente  $NiTe_2$ ) e Ni em merenskyite ( $PdTe_2$ ) evidencia a presença de uma possível solução sólida entre estes minerais e um mineral intermediário poderia ser expresso como  $(Pd,Ni)(Te,Bi)_2$  e que provavelmente hospeda todo o volume de Pd deste minério. Observações similares foram realizadas em *Sudbury* (CABRI e LAFLAMME, 1976), *Ivrea Verbano*, Itália (GARUTI e RINALDI, 1986) e *Abu Swayel*, Egito (HELMY et al., 1995).

Estes minerais apresentam-se principalmente como inclusões em cristais de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (Figura 56), subordinamente em fases sulfetadas (pirrotita e calcopirita) (Figura 57) e silicáticas (serpentina e talco) (Figuras 58 e 59). Ocorrem também na borda de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> e no contato entre pirrotita e serpentina. São cristais de coloração branca, isotrópicos a levemente anisotrópicos, com alta refletância e granulometria fina até cristais de 30µm. Apresenta-se na forma de cristais anedrais a raramente subedrais e foram observados alguns grãos com bordas corroídas.

#### V.2.4.1.2 PLATINA (Pt)

A sperrylita (idealmente  $PtAs_2$ ) é até o presente o único mineral de platina identificado nas amostras do minério maciço hidrotermal. É isotrópico, de coloração branca e refletância muito alta. Os cristais apresentam-se na forma de grãos de arestas arredondadas a angulosas inclusos ou substituindo (Figura 60) cristais de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> e magnetita, preferencialmente no contato entre sulfetos e serpentina e

também são observados cristais com até 50µm de diâmetro (Figura 50) e exibindo bordas corroídas (Figura 61).

#### **V.2.4.1.3 IRÍDIO (*Ir*)**

O principal mineral de Ir entre PGMs identificados é a irarsita (idealmente IrAsS). É isotrópico com alta refletância e coloração branca azulada. Todos os grãos observados e analisados encontram-se inclusos em minerais da série cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> na forma de cristais subédricos e anédricos de hábito arredondado (Figura 62) a ovóide (Figura 63). Os altos teores de Fe, Co e Ni (até 6,50wt%, 2,95wt% e 3,15wt% respectivamente) e teores um pouco mais elevados de As do que normalmente apresenta uma irarsita (até 34,38wt%) podem ter sido derivados da contaminação do mineral hospedeiro de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>.

A fase mineral Ir-Rh-As-S na forma de cristais de tamanhos diminutos, de hábito arredondado inclusos em cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> é interpretada aqui como modificações a partir de uma irarsita anterior aonde, parte do Ir foi substituído por Rh e houve um enriquecimento em As. Essa fase localmente pode exibir cristais zonados como mostram as figuras 64 e 65. Neles a composição do centro é de 27,51-33,52wt% de Ir, 9,54-10,80wt% de Rh e 34,96-40,26wt% de As. Na fase circundante mais externa não foi detectada a presença de Ir e, o conteúdo de Rh é de 10,96-13,12wt% e As de 44,05-49,51wt%. Ambos os grãos estão inclusos em cristais de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>.

#### **V.2.4.1.4 ÔSMIO (*Os*) e RUTÊNIO (*Ru*)**

A principal fase mineral destes elementos é a Os-Ru-As, onde o hábito losangular é comum (Figura 66). No minério maciço hidrotermal, observa-se que se encontram inclusos em cristais de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> (Figura 67), pirrotita (Figura 68) e diminutos grãos em serpentina (Figura 69). O conteúdo varia em 26,87-39,98wt% de Os, 6,71-16,55 wt% de Ru e 45,11-53,02wt% de As.

Outra fase menos freqüente, mas também presente no minério maciço hidrotermal, é a Ru-Te-As em diminutos grãos dispersos em serpentina (Figuras 70 e 71).

## CAPÍTULO VI. QUÍMICA MINERAL

---

### VI.1 INTRODUÇÃO

A presente abordagem foi realizada no intuito de caracterizar quimicamente a mineralogia do minério maciço hidrotermal. Foram analisados os minerais de minério sulfetados principais - pirrotita, pentlandita, calcopirita, pirita e violarita; acessórios - minerais da série cobaltita-gersdorffita e esfalerita; e magnetita como o principal óxido que constituem o minério maciço hidrotermal.

Os dados analíticos obtidos através de trabalhos em microsonda eletrônica permitiram a caracterização dos teores dos principais elementos químicos nesses minerais. Os resultados analíticos obtidos encontram-se tabelados (Apêndice I) e também plotados em diagramas ternários e binários que se encontram descritos a seguir.

### VI.2 PRINCIPAIS MINERAIS DE MINÉRIO

Na maioria dos depósitos de sulfetos de Ni-Cu-Co-(PGE) associados a vulcanismo komatiítico, a pirrotita ( $Fe_{1-x}S$ ) geralmente corresponde ao mineral de minério dominante atuando como “matriz” para os demais minerais, perfazendo até 80% do total do volume da rocha. Nesses depósitos a pirrotita é niquelífera e são reconhecidas duas variedades estruturais distintas de pirrotita, hexagonal e monoclinica, respectivamente de alta e baixa temperatura.

A pentlandita ( $(Ni,Fe)_9S_8$ ), representa o principal mineral de minério de níquel desses depósitos e tem a sua formação atribuída a procesos de exsolução a partir da solução sólida monossulfetada (MSS) ou por cristalização fracionada direta do líquido magmático. Inicialmente em condições de energia de ativação muito alta (temperaturas iguais ou inferiores à  $610^{\circ}C$ ), pode-se formar pentlandita granular à custa da redução do campo da MSS com o decréscimo da temperatura. A temperaturas mais baixas, esse mesmo processo de exsolução originará a textura de flames de pentlandita em pirrotita maciça.

A calcopirita ( $CuFeS_2$ ) comumente também ocorre em depósitos de sulfetos de Ni-Cu-Co-(PGE) associados a rochas de natureza komatiítica e representa a principal

fonte de cobre. Ocorre associada principalmente a pirrotita hexagonal e monoclínica, pentlandita, pirita, violarita e magnetita e mais subordinadamente a minerais do grupo da platina (PGM).

A violarita  $((\text{Fe,Ni})_3\text{S}_4)$  tem sua origem associada a processos de alteração hidrotermal e supergênica a partir de cristais de pentlandita e menos comum em pirrotita. A pirita  $(\text{FeS}_2)$  também ocorre nesses tipos de depósitos e apresenta-se com altos teores de níquel em sua estrutura, sendo comumente denominada de pirita niquelífera..

### **VI.2.1 SISTEMA FE-NI-S**

O sistema ternário Fe-Ni-S é uma ferramenta importante para o entendimento de certos depósitos de segregação magmática, sendo menos relevante em relação a minérios hidrotermais. Contudo, o principal mineral sulfetado de níquel, a pentlandita  $((\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8)$ , ocorre em algumas associações hidrotermais como o caso do minério maciço hidrotermal do Depósito de Fortaleza de Minas, e sua relação com os monossulfetos ilustram alguns princípios importantes do comportamento dos minerais sulfetados.

As relações de fases no sistema ternário Fe-Ni-S podem ser estudadas nas seções isotérmicas a temperaturas compatíveis com a formação dos minérios. Assim, os dados obtidos em microsonda eletrônica para os principais minerais sulfetados de níquel presentes em amostras do minério maciço foram plotados no diagrama de equilíbrio de fases do sistema Fe-Ni-S a temperatura de  $400^\circ\text{C}$  (Figura 72), correspondente à temperatura média de metamorfismo em fácies xisto verde onde possivelmente o minério estudado teve sua geração iniciada.

No sistema ternário Fe-Ni-S (Figura 72) pode ser observado a presença de pentlandita que passa ser estável a temperaturas inferiores a  $610^\circ\text{C}$ , bem como as mss ricas em enxofre (pirrotita) coexistem com a pirita niquelífera, e a violaria estável a temperatura inferior a  $461^\circ\text{C}$ .

Como discutido anteriormente, pentlandita pode formar-se abaixo de  $610^{\circ}\text{C}$  por exsolução da MSS a depender da sua composição total. Nos interstícios entre grãos e ao longo dos limites da MSS, a nucleação heterogênea permitirá a formação de pentlandita granular. Resfriamento lento a partir de altas temperaturas também gerará esta textura de pentlandita. A temperaturas mais baixas a nucleação homogênea pode permitir *flames* orientadas de pentlandita dentro da hospedeira em regiões livres a partir de qualquer limite de grão, fraturas e defeitos.

### **VI.2.2 COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO**

Esta parte do estudo pretende elucidar as relações dos coeficientes de correlação dos principais elementos presentes nas estruturas dos principais minerais de minério de níquel. Com os dados analíticos obtidos em microsonda eletrônica foram calculados os coeficientes de correlação, que resultaram em algumas relações significativas.

Como era de se esperar, as correlações fortemente negativas envolvem ferro (Fe) e níquel (Ni) nos minerais de minério pirrotita ( $R = -0.76$ ), pentlandita ( $R = -0.97$ ), pirita ( $R = -0.76$ ) e violarita ( $R = -0.96$ ) (Figura 73). Isso se deve principalmente a substituição mútua de ferro e níquel no sistema, claramente observado nos dados analíticos (Apêndice I) de pentlandita e violarita que exibem altos teores de níquel.

Boas correlações positivas de Fe-S em pentlandita ( $R = 0.60$ ) e pirita ( $R = 0.51$ ) e boas correlações negativas de Ni-S em pentlandita ( $R = -0.69$ ) e de Fe-Co em violarita ( $R = -0.53$ ) devem ser enfatizadas (Figura 73).

### VI.3 MAGNETITA – O PRINCIPAL ÓXIDO

A magnetita representa o principal óxido presente nas amostras estudadas do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas.

Como pode ser observado no diagrama ternário  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{FeO}$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Figura 74) as amostras de magnetita analisadas em microsonda eletrônica tendem a se enriquecerem em cromo, como atestam os dados analíticos (Apêndice I).

Os grãos mostram-se zonados ou não e exibem fortes coeficientes de correlação negativa entre  $\text{MnO}$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $R = -0.88$ ) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $R = -0.99$ ) e positiva entre  $\text{MnO}$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $R = 0.90$ ) e boas correlações positivas de  $\text{MnO}$ - $\text{TiO}_2$  ( $R = 0.63$ ) e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  ( $R = 0.63$ ) e negativa entre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  ( $R = -0.73$ ) (Figura 75).

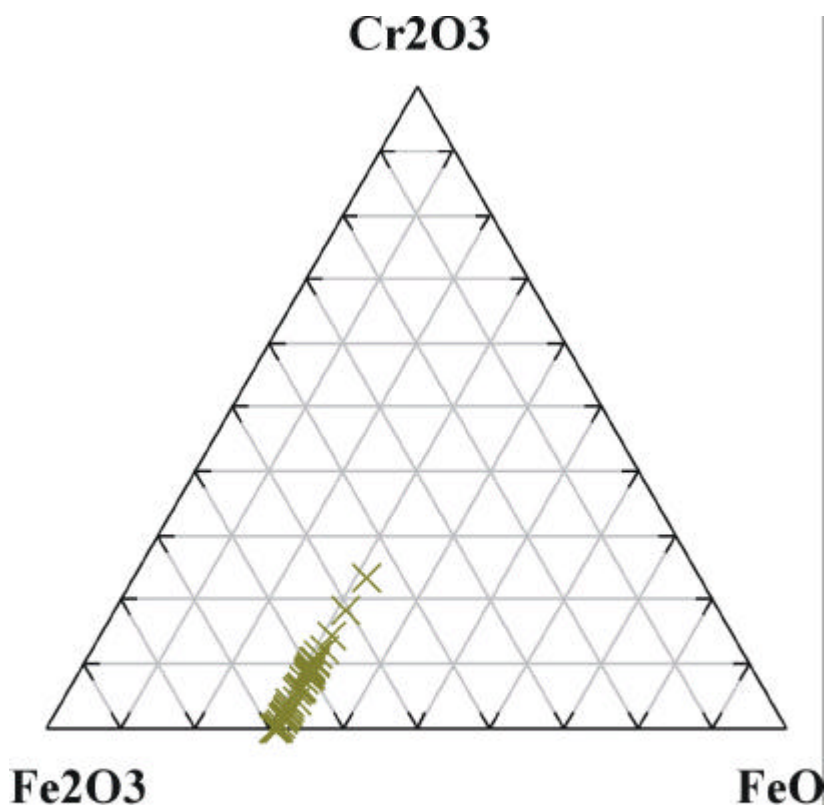


Figura 74 - Diagrama ternário  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{FeO}$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$  referente a composição química de magnetita presente no minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas (MG).

## **VI.4 MINERAIS DA SÉRIE COBALTITA-GERSDORFFITA**

Os minerais da série cobaltita-gersdorffita foram analisados em microsonda eletrônica e os dados obtidos foram estudados a partir da elaboração de diagramas ternários e cálculos dos coeficientes de correlação, com a finalidade de caracterizar e compreender o comportamento dos principais elementos químicos.

### **VI.4.1 SISTEMA COASS-NIASS-FEASS**

Estudos experimentais realizados por Klemm (1965) demonstraram que ocorrem soluções sólidas de sulfoarsenatos de metais de transição envolvendo cobaltita (idealmente  $\text{CoAsS}$ ), gersdorffita (idealmente  $\text{NiAsS}$ ) e arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) e Beziat et al. (1996) comprovaram a existência destas soluções em sistemas naturais.

Os dados analíticos obtidos (Apêndice I) foram plotados no diagrama ternário proposto por Klemm (1965) e a grande maioria das amostras presentes no MMH do Depósito de Fortaleza de Minas posicionam-se na linha Ni/Fe igual a 2, onde presupõe a existência de uma solução sólida entre  $\text{CoAsS}$  e  $\text{Ni}_{0.66}\text{Co}_{0.33}\text{AsS}$ , com Ni-Fe no lugar de Ni, além de uma temperatura de formação entre  $500^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$  e alguns cristais de mais baixa temperatura mais enriquecidos em níquel que os demais (Figura 76).

A partir da análise do diagrama binário (Ni+Fe)-As/S (Figura 77) pode-se concluir que o grau de substituição de As por S aumenta com o acréscimo do conteúdo de (Ni+Fe) em concordância com os resultados experimentais de Maurel e Picot (1974). A predominância de S sobre As deve ser mais dominante no membro cobaltita. Em contraste, um aumento em gersdorffita (+Fe) conduz um aumento na razão As:S. Maurel e Picot (1974) também observaram que cobaltita facilmente incorpora excesso de S sobre As, mas não excesso de As sobre S.

Os cálculos dos coeficientes de correlação apontaram uma forte correlação negativa entre Co-Ni ( $R = -0.95$ ) o que evidencia substituições mútuas entre os elementos; além de boas correlações negativas entre As-S ( $R = -0.72$ ) e Ni-S ( $R = -0.59$ ) e positiva entre Co-S ( $R = 0.59$ ) (Figura 78).

## CAPÍTULO VII. GEOQUÍMICA

---

### VII.1 INTRODUÇÃO

Em depósitos de sulfeto maciço vulcanogênico em terrenos granito-*greenstone* associados a rochas de natureza komatiíticas, ferro (Fe), níquel (Ni) e cobre (Cu), menores quantidades de cobalto (Co), traços de elementos do grupo da platina (PGE) e ouro (Au) são os mais importantes constituintes metálicos presentes nas mineralizações observadas, refletindo numa mineralogia sulfetada bastante simples, constituída principalmente por pirrotita níquelífera, pentlandita, calcopirita e menos freqüente pirita níquelífera.

Magnetita está presente em quantidades variáveis, sendo o principal óxido. Em alguns casos, quando primária reflete a quantia de oxigênio incorporado pelo minério no magma, embora este pode ser perdido durante a cristalização do mesmo (Naldrett, 1969). Em outros casos, o minério pode vir a sofrer processos de oxidação após a sua cristalização, com o desenvolvimento de magnetita secundária.

A grande maioria de depósitos arqueanos associados a rochas komatiíticas contém entre 10 a 16 wt% de níquel, 0,5 a 1,5 wt% de cobre e 0,22 a 0,34 wt% de cobalto.

Com a finalidade de analisar o comportamento e a mobilidade geoquímica dos principais elementos metálicos, como níquel, cobre, cobalto, paládio e platina e outros elementos, tais como, cromo, selênio e arsênio julgados importantes para a compreensão e interpretação dos processos geológicos e metalogenéticos que atuaram na geração do minério maciço hidrotermal, amostras representativas desse minério foram analisadas quimicamente.

Os resultados obtidos foram recalculados para 100% sulfeto para permitir a utilização de diagramas freqüentemente utilizados na literatura, bem como, a comparação com outros depósitos sulfetados similares.

Nesse sentido, os valores analíticos obtidos em amostras do minério maciço hidrotermal foram organizados em tabela (Tabela 3), a partir da qual foram elaborados diagramas para melhor visualização e discussão dos resultados.

Tabela 3 - Dados geoquímicos de amostras do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas normalizados para 100% sulfetos.

Amostra	Número	S%	Co%	Ni%	Cu%	Zn%	Pb%	Fe%	Cr%	Pd ppm	Pt ppm	As ppm	Se ppm
SM-CP	1	36,14	0,06	1,47	22,28	0,08	0,03	24,16	0,11	1,59	0,00	323,16	50,20
SM-10A	2	36,95	0,18	12,38	0,90	0,05	0,01	45,47	0,04	1,55	0,15	64,57	73,99
SM-II	3	31,91	0,14	6,96	51,64	0,47	0,07	81,52	0,02	1,35	0,16	5,80	156,66
SM	4	37,01	0,13	12,24	0,63	0,04	0,01	61,20	0,03	2,91	0,88	64,49	128,97
SM-4AB	5	35,89	0,17	8,49	15,25	0,23	0,03	57,33	0,12	2,57	0,11	11,58	40,54
SM-pnt	6	37,08	0,15	11,87	0,50	0,05	0,01	54,83	0,02	2,23	0,92	37,98	99,70
SM-C	7	37,06	0,13	8,74	4,79	0,08	0,01	71,83	0,00	1,44	0,00	18,74	174,88
SM-10B	8	37,12	0,15	11,45	0,73	0,04	0,01	39,96	0,05	2,15	0,00	39,28	70,71
FM-G	9	37,81	0,12	7,28	0,18	0,06	0,01	82,18	0,12	1,63	0,08	109,27	45,53
SM-T	10	37,18	0,18	11,33	0,29	0,04	0,00	28,33	0,00	16,42	0,18	6,54	53,40

### VII.1.1 DIAGRAMA COBRE VERSUS NÍQUEL

A figura 79 ilustra a relação do conteúdo de cobre (Cu) e níquel (Ni) da fase sulfetada em depósitos significativos de minérios de Ni-Cu. Como podem ser observados, certos depósitos ocupam campos específicos, como aqueles relacionados a vulcanismo komatiítico arqueano e proterozóico, *Sudbury*, derrames basálticos entre outros.

Essa correlação entre a razão de níquel e cobre e o tipo e magma correspondente, apontada na figura 79, vêm sendo aplicada por quase uma década (WILSON e ANDERSON, 1959), embora certas anomalias ocorram decorrentes da atuação de processos pós-magmáticos – metamórficos, hidrotermais e supergênicos.

As amostras do MMH forma plotadas nesse diagrama (Figura 79) e a grande maioria caiu no campo pertencente aos depósitos arqueanos associados a derrames de natureza komatiítica. As amostras SM-4A-B e SM-C por serem representativas de concentrações maciças de calcopirita, conseqüentemente apresentam teores elevados de cobre, mostrando-se dispersas no diagrama.

A amostra FM-G representa a variedade do MMH menos afetada pelos processos hidrotermais e assim exhibe menor conteúdo de níquel que as demais e quantidades mínimas de cobre.

### VII.1.2 DIAGRAMA $Cu/(Cu+Ni)$ VERSUS $Pt/(Pt+Pd)$

A figura 80 apresenta as razões de  $Cu/(Cu+Ni)$  versus  $Pt/(Pt+Pd)$  para depósitos de sulfetos de Ni-Cu descritos no mundo. Uma covariação negativa das razões  $Pt/(Pt+Pd)$  e  $Cu/(Cu+Ni)$  existe em depósitos de sulfeto de Ni-Cu associado a magmas toleíticos. Depósitos associados com komatiítos são uma exceção a esta regra.

As amostras do minério maciço hidrotermal plotadas no diagrama (Figura 80) refletem que o minério é altamente enriquecido em paládio em relação à platina. Isto também é confirmado pela grande variedade de minerais e fase de paládio presente nas amostras estudadas bem como valor pontual de 40g/ton de paládio encontrados em análises químicas da Mineração Serra da Fortaleza (comunicação verbal).

Os pontos 1, 3, 5 e 7 representam amostras do minério maciço hidrotermal ricas em cobre caracterizada pela presença de calcopirita maciça. Já os pontos 4 e 6 representam amostras com teores anômalos de platina em relação as demais amostras do minério maciço hidrotermal analisadas quimicamente.

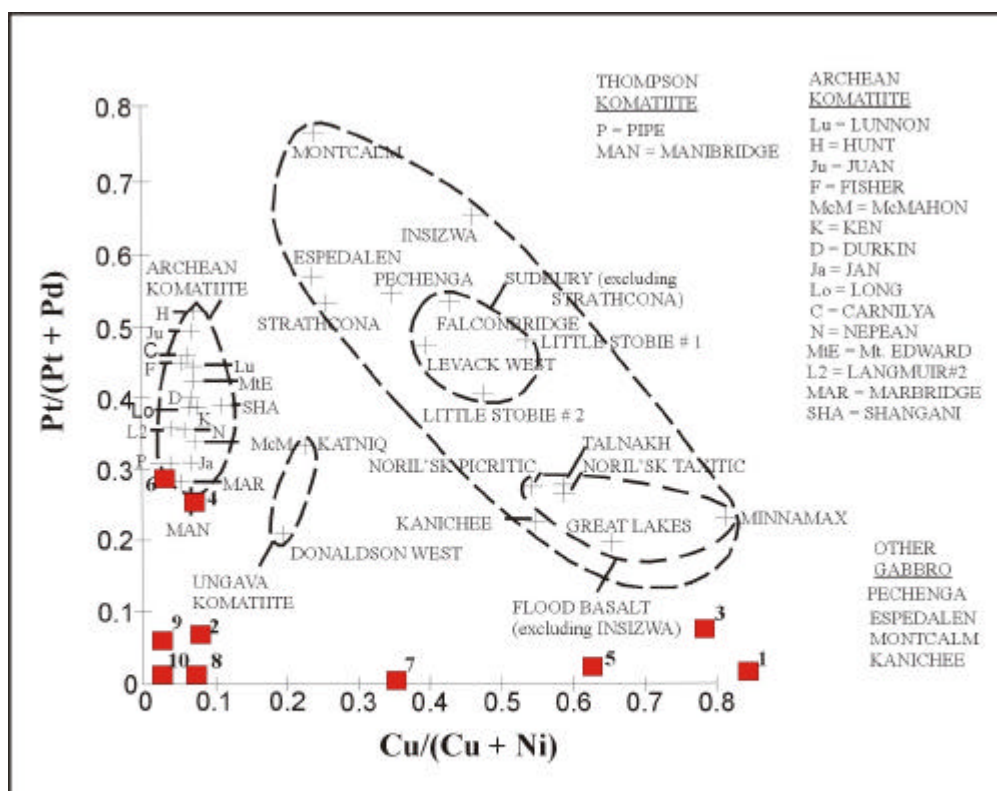


Figura 80 - Razões de  $Pt/(Pt+Pd)$  versus  $Cu/(Cu+Ni)$  para depósitos de sulfeto de níquel. Os quadrados vermelhos representam amostras do minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas.

## CAPÍTULO VIII. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS \_\_\_\_\_

O minério maciço hidrotermal, objeto de estudo da presente dissertação, está associado a zonas de falhas distensivas tardias, de direção N-S e NE-SW, de regime dúctil-rúptil que cortam a hospedeira (capa) da jazida. Essas falhas são perpendiculares a orientação da zona de cisalhamento (N50W/80SW) a qual é a encaixante do corpo de minério principal.

Esse minério apresenta características tardi a pós-tectônica e está associado a processos hidrotermais em zonas brechadas. É interpretado como produto de remobilização dos minérios maciço brechóide e subordinamente do tipo intersticial e ainda não foi observado no *footwall* da jazida.

O MMH é constituído por uma associação óxido-sulfetada maciça dominada por pirrotita, pentlandita, calcopirita, pentlandita, pirita, violarita, e magnetita. Os minerais acessórios presentes são representados pela série cobaltita-gersdorffita, esfalerita e ilmenita, além de minerais da série linnaeita-polidimita, siegenita e carbonatos (dolomita, calcita, ankerita e siderita). Minerais raros como os minerais do grupo da platina e vivianita também estão presentes na associação mineralógica da tipologia de minério estudada. Os minerais silicáticos presentes em amostras do minério maciço hidrotermal são representados principalmente por talco, clorita, anfibólios, material filossilicático bastante fino e quartzo.

Em relações de campo são observadas típicas feições de alteração hidrotermal do tipo carbonato-quartzo-sulfeto próximo e no contato entre o minério maciço hidrotermal e as rochas encaixantes. Essas alterações observadas em campo também são vistas em análises microscópicas e sugerem a ocorrência de três fases principais.

O primeiro e mais significativo estágio foi responsável pela precipitação de grandes cristais romboédricos de carbonatos, cristais centimétricos de pentlandita e da fase sulfetada principal. Esses minerais mostram-se em equilíbrio geoquímico e não apresentam evidências de reações entre si.

A segunda fase é caracterizada pela presença de veios e fraturas tardias preenchidas por pirita, carbonatos e quartzo, os quais cortam toda a massa sulfetada principal, os cristais romboédricos de carbonatos e as fases silicáticas presentes. Os veios de quartzo são de ocorrência restrita e são limitados pelos veios carbonáticos. O preenchimento desses veios ocorreu simultaneamente e o aporte de SiO<sub>2</sub> foi menos

expressivo que o conteúdo de  $\text{CO}_3^{-2}$ , devido sua ocorrência limitada a alguns veios e/ou fraturas.

A terceira fase, de menor expressão, é marcada pela ocorrência de vênulas milimétricas preenchidas por carbonatos que cortam os veios principais de carbonato, a massa sulfetada bem como circundam cristais de magnetita e também por vênulas de pirita que cortam a massa sulfetada.

A violarita presente na amostras do minério maciço hidrotermal é produto da alteração hidrotermal de cristais principalmente de pentlandita e subordinamente de pirrotita. O processo de violaritização em pentlandita inicia-se ao longo dos planos de clivagem e fraturas bem como no contato grão-a-grão, enquanto que, a passagem de pirrotita para violarita é menos comum e ocorre quando esta se encontra em contato ou próxima a grãos de pentlandita violaritzada ou a partir de exsoluções de pentlandita em pirrotita. O processo de violaritização de pirrotita cessa quando toda a pentlandita tiver sido consumida.

Minerais da série cobaltita-gersdorffita apresentam-se zonados ou não e são os principais hospedeiros dos minerais e fases do grupo da platina. Geralmente exibem zonamento complexo marcado pela alternância de zonas enriquecidas em níquel e ferro com zonas ricas em cobalto.

Siegenita e minerais da série linneita foram identificados através de difração de raios X, interpretados como formados em condições hidrotermais de baixa temperatura.

Outro mineral identificado e de ocorrência rara, foi um fosfato de ferro hidratado, denominado vivianita. Foi observado substituindo cristais de clorita, principalmente pelos planos de clivagem e ocupam comumente os núcleos desses minerais. Vivianita é um mineral de ocorrência rara e sua origem é atribuída a passagem de fluido, rico em fósforo a baixas temperaturas.

A ocorrência de minerais do grupo da platina (PGM) em amostras do MMH está dispersa por todo minério, associados a fases silicáticas, inclusos em grãos de magnetita, bem como no contato entre o minério e as rochas encaixantes. Esses contatos geralmente são marcados pela ocorrência de veios preenchidos por pirita e/ou carbonatos.

A presença de irarsita e da fase Ir-Rh-As-S está restrita a inclusões em minerais da série cobaltita-gersdorffita; os bismuto-teluretos de paládio (merenskyita-michenerita-melonita-froodite) ocorrem tanto associados a fases hidratadas como talco e

serpentina como inclusos em cristais de cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub> e associados à massa sulfetada; cristais de tamanhos significativos (até 50µm) de sperrylita, um sulfoarseneto de platina, foram identificados associados no contato entre o MMH e as rochas encaixantes, com a presença de veios de carbonatos e pirita, outro grão de tamanho diminuto foi observado incluso em cristal subeudral de magnetita e outros em minerais da série cobaltita-gersdorffita; a fase Os-Ru-Te também ocorre de maneiras diversas tanto inclusos em cobaltita-gersdorffita<sub>ss</sub>, associados à serpentina e a fase sulfetada, já todos os grãos da fase Ru-Te-As estão dispersos na massa serpentínica.

Segundo Marchetto (1990) os PGMs presentes nas demais tipologias de minério do Depósito de Fortaleza de Minas ocorrem como pequenas inclusões em cristais de cobaltita-gersdorffita. Essa evidência textural sugere que os PGMs formaram primeiro, conferindo-lhe uma origem magmática. Já para os PGMs estudados no minério maciço hidrotermal, com exceção dos sulfarsenetos de irídio e ródio, os minerais não ocorrem associados somente a uma paragênese. Assim, as relações texturais observadas não sugerem uma origem magmática para todos os PGMs..

A cristalização de PGM diretamente de magmas silicáticos máfico-ultramáficos (NALDRETT, 1989) é amplamente aceita. A associação de PGE com minerais sulfetados tem levado a concluir que ocorrências de PGE economicamente significantes requerem a segregação de sulfetos, onde eles preferencialmente particionam (NALDRETT, 1989, BRUGMANN et al., 1989).

Contudo, vários estudos (BALLHAUS e STUMPFL, 1986; BOUDREAU, 1988; MATHEZ, 1989; KINLOCH e PEYERL, 1990; MOGESSIE et al., 1991) sugerem que voláteis e fluídos são indispensáveis para o transporte e deposição de PGE. Leshner (2000) reporta que a grande maioria dos depósitos magmáticos de sulfetos de Fe-Ni-Cu (PGE) em rochas ígneas máficas e ultramáficas foi modificada por processos hidrotermais, deformacionais e metamórficos.

Além disso, algumas mineralizações (por exemplo: veios de Kambalda: LESHER e KEAYS, 1984; Stillwater J-M-Reef: BOUDREAU et al., 1986 e BOUDREAU, 1987; Sudbury footwall ore: FARROW e WATKINSON, 1996) estão associados a fases hidratadas e/ou halogênicas e são interpretadas como terem sido formadas ou modificadas por fluídos hidrotermais.

Pt-bismutoteluretos, bismutetos e teluretos são considerados serem remobilizados a temperaturas relativamente baixas e transportados em condições de

metamorfismo de baixo grau (CABRI, 1981). As altas concentrações de paládio e baixa de platina sugerem que platina foi fracionada de paládio e perdida ou que paládio foi introduzido no sistema (DILLON-LEITCH et al., 1986).

Algumas fases minerais de paládio, de baixa temperatura, associadas com minerais silicáticos foram descritos em *Rathbun Lake*, Ontário por Rowell e Edgar (1986) e Edgar et al. (1989). Eles sugerem uma origem hidrotermal para a formação de PGM e com suas composições controladas pelo pH, fugacidade de oxigênio e temperatura dos fluídos hidrotermais. Malvicini e Brogioni (1992) sugerem que a mineralização sulfetada primária associada às rochas máfica-ultramáficas Las Aguilas foi remobilizada por fluídos hidrotermais relacionados ao metamorfismo Ordoviciano.

Além disso, bismuto-teluretos de paládio são característicos de deposição hidrotermal de baixa temperatura, presentes em depósitos como New Rambler (MC CALLUM et al., 1976), Bucko Lake (GOOD e NALDRETT, 1993), Sudbury (FARROW e WATKINSON, 1992) e Abu Sawel (HELMY et al., 1995).

Assim alguns dos PGMs estudados em amostras do minério maciço hidrotermal não estão inclusos em fases sulfetadas primárias e são encontrados associados a fases silicáticas hidratadas, veios de pirita e carbonatos. A grande maioria desses minerais é bismuto-teluretos de paládio de ampla variação composicional e fases de Ru-Te-As.

A ocorrência freqüente de PGMs inclusos e/ou associados a arsenetos e sulfoarsentos foi investigada por Gervilla et al. (1994, 1996, 1997 e 1998) em diferentes contextos de formação de minério. Seus estudos demonstraram que durante os primeiros estágios de cristalização fracionada da MSS, é produzido um líquido enriquecido em arsênio, o qual atua como coletor de metais nobres como platina e paládio e pequenas quantidades de prata, bismuto, telúrio, estanho e antimônio, deixando os sulfetos de Ni-Cu empobrecidos nesses metais. O resultado desse processo e remobilizações posteriores explicariam a alta concentração de PGMs associados e/ou inclusos em minerais da série cobaltita-gersdorffita identificados no minério maciço hidrotermal da Jazida de Fortaleza de Minas.

Hudson e Donaldson (1984), estudando as ocorrências de PGE em Kambalda, observaram que esses elementos ocorrem em zonas de reação, veios sulfetados mobilizados e veios hidrotermais. Tais evidências sugerem que a mobilização pós-magmática de PGE foi um importante controle na distribuição de PGM (Keays et al., 1981). Assim, a interação de fluídos hidrotermais ricos em telúrio, arsênio e antimônio

com mineralizações sulfetadas maciças e intersticiais tem sido interpretada como um importante mecanismo para liberação de PGE de sulfetos e cristalização subsequente de PGE-teluretos, arsenetos e antimonetos (Hudson e Donaldson, 1984).

Mountain e Wood (1988) indicaram que elementos tais como telúrio e bismuto restringem significativamente a mobilidade de paládio e bismuto e Paktunc et al. (1990) documentaram que a disponibilidade de bismuto e telúrio efetivamente controla a extensão de soluções de PGE em hospedeiros sulfetados, os quais a pentlandita é a mais significativa.

É, portanto sugerido que a mineralização de PGE e a formação de fases Pd-Bi-Te é resultado da remobilização, redistribuição e recristalização local de minerais de sulfeto de Ni-Cu-Co-(PGE) num processo hidrotermal tardio que não permitiu a dispersão dos PGE a grandes distâncias em Fortaleza de Minas.

Segundo a classificação apresentada por Leshner e Keay (*no prelo*) o minério maciço hidrotermal apresenta características do sub-tipo IV veio hidrotermal metamórfico tipicamente associado a grãos de quartzo e carbonatos relacionado a mobilizações a partir de fluidos hidrotermais em estágio sin-metamórfico. Esses veios cortam as rochas encaixantes e estão associados a mineralizações do tipo I.

Os teores reportados para o MMH são extremamente mais elevados quando comparadas às demais tipologias de minério presentes no depósito. Os mais expressivos são os altos teores de níquel (8 a 14%), paládio (valores pontuais de até 40g/ton) e concentrações locais de cobre. Isto reflete diretamente nas observações macro e microscópicas como a presença de grandes cristais de pentlandita neofromados bem como a presença significativa de violaria e pirita niquelífera, a presença significativa de minerais e fases de paládio e concentrações maciças de calcopirita, respectivamente.

As soluções hidrotermais que interagiram com os minérios maciço brechóide e intersticial e as rochas encaixantes tornaram-se progressivamente enriquecidas em voláteis, arsênio, telúrio, bismuto, enxofre que por suas altas afinidades com PGE permitiu a cristalização de minerais do grupo da platina, além da remobilização de níquel e cobre das rochas encaixantes e dos minérios pretéritos. As presenças de pirita e magnetita hidrotermal atestam que em um certo momento houve aumento da fugacidade de oxigênio e enxofre, bem como a pressão de gás carbônico foi alta para a precipitação de carbonatos.

Essas considerações permitem sugerir que o Depósito de Fortaleza de Minas após a sua origem ligada a processos magmáticos no Arqueano foi afetado por deformações decorrentes de processos colisionais que atingiram fácies anfíbolito e metamorfismo retrogrado em fácies xisto verde durante o Proterozóico Inferior.

Posteriormente ocorreu a implantação do Cinturão Transcorrente Campo do Meio, de idade tardi-transamazônica. O corpo de minério principal está encaixado em uma das zonas de cisalhamento transcorrente, dúctil-rúptil, com direção geral N50W/80SW, atribuída a esta fase.

Durante o Neo-Proterozóico, o depósito é submetido a um novo evento tectônico-metamórfico menos intenso e temperaturas mais amenas que atingiram fácies xisto verde, acompanhado de alteração hidrotermal do tipo carbonato-talco-quartzo-sulfeto em zonas brechadas e cisalhadas. Este evento deu origem a zonas de falhas distensivas, de direção NE-SW e N-S, que hospedam os corpos de minério maciço hidrotermal e são resultantes da reativação da zona de cisalhamento principal. A geração do minério maciço hidrotermal é sugerida estar associada ao evento deformacional ocorrido no Brasileiro.

## CAPÍTULO IX. REFERÊNCIAS

---

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., 1980, Camboriú. *Anais...* Camboriú: SBG, 1980. v.1, p.57-67.

ALMEIDA, F.F.M. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. *Boletim DNPM. Divisão de Geologia e Mineralogia*, Rio de Janeiro, n. 241, 1967.

ALMEIDA, F.F.M. Evolução Tectônica do Centro-Oeste Brasileiro no Proterozóico Superior: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v.40, supl., p.285-293, 1968.

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco: Salvador (Brasil), núcleo Bahia, *Sociedade Brasileira de Geologia*, p. 13-65, 1979.

ALMEIDA, F.F.M. et al. Informações geofísicas sobre o oeste mineiro e seu significado geotectônico. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 52, p.49-60, 1980.

ALMEIDA, F. F. M. de O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1981, Salvador, *Anais...* Salvador: SBG, 1981. p. 1-10.

ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. de. O Pré-Cambriano Superior da América do Sul. *Boletim de Geociências-USP*, v.7, p.45-80, 1976.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; DAVINO, A. et al. Informações Geofísicas sobre o oeste mineiro e seu significado geotectônico. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v.52, n.1, p.49-60, 1978.

ARTUR, A.C; WERNICK, E. -1986- Interpretação geotectônica de alguns aspectos do embasamento cristalino do Estado de São Paulo e áreas adjacentes no Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986, Goiânia. *Anais...* Goiânia: SBG, 1986. v.3, p.1285-1295.

BALLHAUS, C.G.; STUMPFL, E.F. Sulphide and platinum mineralization in the Merensky Reef: evidence from hydrous silicate e fluid inclusions. *Contributions to Mineralogical Petrology*, Áustria, v.94, p.193-204, 1986.

BARBOSA, O.; BRAUN, O.P.G.; DYER, R.C.; CUNHA, C.A.B.R. Geologia do Triângulo Mineiro (Projeto Chaminés). *Boletim DNPM*. Divisão de Fomento da Produção Mineral, Rio de Janeiro, nº 136, p.1-140, 1970.

BARNES, H.L (Ed.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2<sup>a</sup>rd ed. Local: John Wiley & Sons, 1979.

BARNES, H.L (Ed.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3<sup>a</sup>rd ed. Local: John Wiley & Sons, 1997.

BARNES, S.J.; HILL, R.E.T.; PERRING, C.S. The classification and volcanological setting of komatiite-hosted nickel sulphide deposits. In: WILLIAMS, P.R.; HALDANE, J.A. (Ed.). *Crustal evolution, metallogeny and exploration of the Eastern Goldfields*. Canberra: Australian Geological Survey Organization, 1993. p.153-168.

BÉZIAT, D.; MONCHOUX, P.; TOLLON, F. Cobaltite-Gersdorffite Solid Solution as a Primary Magmatic Phase in Spessartite, Lacaune Area, Montagne Noire, France. *Canadian Mineralogist*, Montreal, v. 34, p. 503-12, 1996.

BLEEKER, W. *Evolution of the Thompson Nickel Belt and its Nickel Deposits, Manitoba*. 1990. 400f. Tese (Doutorado em Geociências) – University of New Brunswick, Fredericton, 1990.

BOUDREAU, A.E. Investigations of the Still water Complex. IV. The role of volatiles in the petrogenesis of the J-M Reef, Minneapolis Adit section. *Canadian Mineralogist*, Montreal, v. 26, p.193-208, 1988.

BOUDREAU, A.E.; MATHEZ, E.A.; McCALLUM, I.S. Halogen Geochemistry of the Stillwater and Busheveld Complexes: Evidence for Transport of the Platinum-Group Elements by Cl-Rich Fluids. *Journal of Petrology*, Oxford, v. 27, n. 4 , p. 967-986, 1986.

BRENNER, T.L.; TEIXEIRA, N.A.; OLIVEIRA, J.A.L. et al. The O'Toole Nickel Deposit, Morro do Ferro Greenstone Belt, Brazil. *Economic Geology*, Lancaster, v. 85, n. 5, p. 904-20, 1990.

BRÜGMANN, G.E.; NALDRETT, A.J.; MACDONALD, A.J. Magma mixing and constitution zone refining in the Lac des Iles Complex, Ontario; genesis of platinum-group element mineralization. *Economic Geology*, Lancaster, v. 84, p.1557-1573, 1989.

CABRI, L.J. *Platinum-Group Elements: Mineralogy, Geology, Recovery*. CIM Special Volume 23 & The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1981.

CABRI, L.J.; LAFLAMME, J.H.G. The mineralogy of the platinum-group elements from some copper – nickel deposits of the Sudbury area, Ontario. *Economic Geology*, Lancaster, v. 71, n. 7, p. 1159-1195, 1976.

CAMPOS NETO, M.C. *A Porção ocidental da faixa Alto Rio Grande - ensaio de Evolução tectônica*. 1991. 210f. Tese (Doutoramento em Geociências) –Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

CAMPOS NETO, M.C.; FIGUEIREDO, M.C.H. *Geologia das Folhas de São José do Rio Pardo e Guaranésia (porção paulista) 1:50.000*. SICCT PRÓ-MINÉRIO/USP-IG, 1985. 123p.

CAMPOS NETO, M. C.; FIGUEIREDO, M. C. H. A orogênese Rio Doce. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos...* São Paulo: SBG, 1992. v.1, p. 276-277.

CAMPOS NETO, M.C.; BASEI, M.A.S.; ALVES, F.R. et al. A nappe de cavalgamento Socorro (SP-MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. v.4, p.1809-22.

CAMPOS NETO, M.C.; PERROTA, M.M.; PELLOGLIA, A.U.G. et al. A porção ocidental da Faixa Alto Rio Grande (SP-MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG, 1990. v. 6, p.2615-2630.

CARVALHO, S.G. *Geologia e potencial de mineralização dos arredores de Fortaleza de Minas*. 1983. 137f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

CARVALHO, S. G. *Geologia, petrologia e metalogenia da seqüência vulcano sedimentar Alpinópolis (MG)*. 1990. 216f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

CARVALHO, S.G. *Pesquisa geológica e metalogenética em áreas pré-cambrianas no sudoeste do estado de Minas Gerais e leste do estado de São Paulo*. 1998. Tese (Livro-Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

CARVALHO, S.G.; BATISTA, J.J. Prospecção geoquímica de solo no Cinturão Vulcano-Sedimentar “Morro do Ferro”, Fortaleza de Minas, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2., 1983, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1983. v. 1 , p. 248-58.

CARVALHO, S.G.; CHOUDHURI, A.; OLIVEIRA, M.A.F. et al. Paragênese e possível origem dos xistos básicos e ultrabásicos de Fortaleza de Minas e arredores. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., 1982, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG, 1982. v.2, p. 641-47.

CARVALHO, S.G.; SOARES, P.C.; BARBOUR, A.P. Mineralizações nos terrenos greenstone de Alpinópolis e Fortaleza de Minas. *Geociências*, São Paulo, v.11, n.1, p.19-47, 1992.

CARVALHO, S.G.; SOARES, P.C.; ANTONIO, M.C. et al. Geologia da seqüência vulcanossedimentar de Alpinópolis (MG). *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, v.23, n.1, p.38-51, 1993.

CARVALHO, S.G.; HASUI, Y.; BRENNER, T.L. et al. Tectonics and mineralization of the Fortaleza de Minas Ni-Cu-Co deposit, Minas Gerais, Brazil. No prelo.

CHOUDHURI, A.; SZABÓ, G.J.A.; EBERT, H.D. Feições estruturais e texturais dos derrames ultramáficos a norte e nordeste de Petúnia, sul de Minas Gerais. *Ciências*, n.7, p.18-20, 1982.

DALTRY, V.D.C; WILSON, A.H. Review of platinum-group mineralogy: compositions and elemental associations of the PG-minerals and unidentified PGE-phases. *Mineralogy and Petrology*, Áustria, v.60, n.3/4, p.185-229, 1997.

DARDENE, M.A. The Brasília Fold Belt. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAS FILHO, A.; CAMPOS, D.A. (Ed), *Tectonic Evolution Of South America*. Rio de Janeiro: SBG, 2000. p. 231-263. 31<sup>ST</sup> International Geological Congress

DAVINO, A. O Baixo Gravimétrico da Região de Caldas Novas, GO. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2, 1979, Rio Claro, *Atas...* Rio Claro: SBG.v.1, p.87-100.

DILLON-LEITCH, H.C.H.; WATKINSON, D.H.; COATS, C.J.A. Distribution of platinum-group elements in the Donaldson West Deposit, Cape Smith Belt, Québec. *Economic Geology*, Lancaster, v. 81, n. 6, p. 1147-1158, 1986.

EBERT, H. 1956. A tectônica do sul do estado de Minas Gerais e regiões adjacentes. *Relat. Na. Dir. Div. Geol. Min.* p. 97-137.

EBERT, H. 1957. A tectônica do sul do Estado de Minas Gerais. DNPM., *Relat. An. Div. Geol. Min.* 97-107, p. 136-137.

EBERT, H. Ocorrência da fácies granulítica no sul de Minas Gerais e em áreas adjacentes em dependência da estrutura orogênica: hipóteses sobre sua origem. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v.40, supl., p. 215-29, 1968.

EBERT, H. *Os Paraibídes entre São João Del Rei, Minas Gerais e Itapira, São Paulo, e a bifurcação entre Paraibídes e Araxáides*. SBG-SP. *Bol. Esp.*, n.1, p.177-178, 1971.

EBERT, H. *Os Paraibides entre São João Del Rey e Itapira e a bifurcação entre Paraibides e Araxáides*. Rio Claro: SBG - Núcleo SP/Pró-Minério, 1984, p.72-103. (Publicação 12/84).

EBERT, H.D.; HASUI, Y.; COSTA, J.B.S. O caráter transpressivo do Cinturão Transcorrente Rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3., 1991, Rio Claro. *Boletim...* Rio Claro: SBG; UNESP, 1991. p.139-141.

EBERT, H.D.; HASUI, Y.; SARTORATO, G. et al. Arcabouço estrutural e tectônica transpressiva das faixas móveis das bordas sul e sudeste do Cráton do São Francisco e da sintaxe de Gruaxupé. In. SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 4., 1993, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1993. p.166-171.

EBERT, H.D.; NEVES, M.A.; HASUI, Y. et al. Compartimentação crustal e evolução cinemática da Província Mantiqueira através da modelagem física. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5., 1995, Gramado. *Resumos Expandidos...* Gramado: SBG, 1995, p.26-28.

EDGAR, A.D.; CHARBONNEAU, H.E.; MACHARDY, D.C. Pd-bismuthtellurite minerals at Rathbun Lake, Ontario: significance to post-magmatic evolution of pge deposits. *N. Jahrb Mineral. Monstsh*, p.461-475, 1989.

FARROW, C.E.G; WATKINSON, D.H. Alteration and the role of fluid in Ni, Cu and platinum-group element deposition, Sudbury Igneous Complex contact, Onaping-Levack area, Ontario. *Mineralogy and Petrology*, Áustria, v.46, p.67-83, 1992.

FERNANDES, N.H. *Origem e Evolução das Formações Ferríferas Bandadas no sudoeste do Estado de Minas Gerais*. 2002. 184f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

GARUTI, G.; RINALDI, R. Mineralogy of melonite-group and other tellurides from Ivrea-Verbano basic complex, western Italian Alps. *Economic Geology*, Lancaster, v. 81, n. 5, p.1213-17, 1986.

GERMANI, D.J.; MUNEMASSA, Y.A. Lavra de jazida de níquel sulfetado denominado O'Toole, de Fortaleza de Minas (MG). In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 1., 1985, Brasília. *Anais...* Brasília: IBM, 1985. v. 1, p.64-81.

GERVILHA, F.; MAKOVICKY, M.; MAKOVICKY, V. et al. The system Pd-Ni-As at 790<sup>0</sup>C e 450<sup>0</sup>C. *Economic Geology*, Lancaster, v.59, p.1630-1639, 1994.

GERVILLA, F.; LEBLANC, M; TORRES-RUIZ, J. et al. Immiscibility between arsenide and sulfide melts: a mechanism for the concentration of noble metals. *Canadian Mineralogist*, Montreal, v.34. p. 485-502, 1996.

GERVILLA, F.; SANCHEZ-ANGUITA, A.; ACEVEDO, R.D. et al. Platinum-group element sulpharsenides and Pd bismuthtellurides in the metamorphosed Ni-Cu deposit at Las Aguilas (province of San Luis, Argentina). *Mineralogical Magazine*, v.61, p.861-77, 1997.

GERVILLA, F.; PAPUNEN, H.; KOJONEN, K. et al. Platinum, palladium and gold rich arsenide ores from the kylmakoski Ni-Cu deposit (Vammala Nickel Belt, SW Finland), *Mineralogy and Petrology*, Áustria, v.74, p.163-85, 1998.

GOOD, D.J.; NALDRETT, A.J. Geology and distribution of platinum-group elements, bucko Lake intrusin, Thompson belt, Manitoba. *Canadian Mineralogist*, Montreal, v.31, p.45-60, 1993.

GRIFFON, J.C.; RICHTER, H. Geologia, mineração e tratamento do minério de níquel do Morro do Níquel. MG. *Geologia e Metalurgia*, São Paulo, n. 40, p.387-405, 1976. 6º. Simpósio Brasileiro de Mineração.

GREEN, A.H.; NALDRETT, A.J. The Langmuir volcanic peridotite-associated nickel sulphide deposits: Canadian equivalents of the Western Australian occurrences. *Economic Geology*, Lancaster, v.76, p.1503-1523, 1981.

GROVES, D.I.; HUDSON, D.R. The nature and origin of Archaean strata-bound volcanic-associated nickel-iron-copper sulfide deposits. In: WOLF, K.H. (Ed.), *Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposit*. Amsterdam: Elsevier, 1981. v.9, p.305-410.

HARALYI, L.E.; HASUI, Y. The gravimetric information and the Archean Proterozoic structural framework of Eastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.12, n.1, p.160-166, 1982.

HASUI, Y.; EBERT, H.D.; COSTA, J.B.S. Estruturação da extremidade oriental da chamada Cunha de Guaxupé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOCIÊNCIAS, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG, 1990. v. 5, p.2296-308.

HASUI, Y.; HARALYI, N.L.E; COSTA, J.B.S. A megaestruturação pré-cambriana do território brasileiro com base em dados geofísicos e geológicos. *Geociências*, São Paulo, v.12, n.1, p.7-31, 1993.

HASUI, Y.; RODRIGUES, E.P.; QUADE, H. et al. 1988. *Processo de cisalhamento dúctil: modelo de transformações em rochas pré-cambrianas antigas do leste de São Paulo*. São Paulo: Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado de São Paulo, 1988. (Relatório IPT, 25908). Não Publicado.

HASUI, Y.; MALAGUTTI FILHO, W.; EBERT, H.D. et al. Gravimetria e compartimentação crustal do sul de Minas Gerais. *Geociências*, Rio Claro, v.15, p.199-217, 1996.

HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M.; ZIMBRES E. et al. O contato basal do Grupo Canastra entre Itaú de Minas e Carmo do Rio Claro, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 4., 1987, Belo Horizonte. *Boletim...* Belo Horizonte: SBG, 1987. v.7, p.179-98.

HELMY, H.M.; STUMPFL, E.F.; KAMEL, O.A. Platinum-Group Minerals from the Metamorphosed Abu Sawey Cu-Ni-(PGE) Deposit, South Eastern, Desert, Egypt. *Economic Geology*, Lancaster, v. 90, n. 8, p. 2350-2360, 1995.

HUDSON, D.R.; DONALDSON, M.J. Mineralogy of platinum group elements in the Kambalda nickel deposit, Western Australia. In: BUCHANA, D.L.; JONES, M.J. (Ed.). *Sulphide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1984. p. 55-61.

KEAYS, R.R.; ROSS, J.R.; WOOLRICH, P. Precious metals in volcanic peridotite-associated nickel sulphide deposits in Western Australia. II: Distribution within ores and host rocks at Kambalda. *Economic Geology*, Lancaster, v.76, p.1645-1674, 1990.

KLEMM, D.D. Synthesen und Analysen in den Dreieckdiagrammen FeAsS – CoAsS – NiAsS und FeS<sub>2</sub> – CoS<sub>2</sub> – NiS<sub>2</sub>. *Neues Jahrb, Mineral*, v. 103, p. 205-255, 1965.

KINLOCH, E.D.; PEYERL, W. Platinum-group minerals in various rock types of the Merensky Reef: genetic implications. *Economic Geology*, Lancaster, v.85, p.537-555, 1990.

LESHER, C.M. Komatiite-associated nickel sulfide deposit. In: WHITNEY, J.A.; NALDRETT, A.J. (Ed.). *Ore Deposition Associated with Magma, Reviews in Economic Geology*. El Paso: Society Economic Geologists, 1989. v. 4, p. 45-101.

LESHER, C.M. Magmatic Fe-Ni-Cu-(PGE) sulphide deposits in mafic and ultramafic igneous rocks. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 40, 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 2000. 1 CD-ROM.

LESHER, C.M.; KEAYS, R.R. Metamorphically and hydrothermal mobilized Fe-Ni-Cu sulphides at Kambalda, Western Australia. In: BUCHANA, D.L.; JONES, M.J. (Ed.). *Sulphide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1984. p. 62-69.

LESHER, C.M.; STONE, W.E. Exploration geochemistry of komatiites. In WYMAN, D.A. (Ed.). *Igneous Trace Element Geochemical Applications for Massive Sulphide Exploration*. Local: Geological Association of Canada, 1996. v.12, p.153-204. Short Courses Notes.

LESHER, C.M.; KEAYS, R.R. Komatiite-Associated Ni-Cu-PGE Deposits: Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Genesis. In: CABRI, L.J. (Ed.). *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of the Platinum-Group Elements*. Local: Candian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, 2002. v.54, p.579-617,

LESHER, C.M.; ARNDT, N.T.; GROVES D.I. Genesis of komatiite associated nickel sulphide deposits at Kambalda, Western Australia: a distal volcanic model. In: BUCHANAN, D.L.; JONES, M.J. (Ed.) *Sulphide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks*. Local: Institute of Mining Metallurgy, 1984. p.70-80.

MACCALLUM, M.E.; LOUCKS, R.R; CARLSON, R.R. et al. Platinum metals associated with hydrothermal copper ores of the New Rambler mine, Medicine Bow Mountains, Wyoming. *Economic Geology*, Lancaster, v.71, p.1429-1450, 1976.

MALVICINI, L.; BROGIONI, N. El yacimiento hidrotermal de níquel, cobre y metales del "Grupo del Platino", Las Aguilas Este. Prov. De San Luis, Argentina. *Americano de geología económica. Acta Cordoba*, p.93-102, 1992.

MARCHETTO, C.M.L. Platinóides associados ao minério de níquel, cobre e cobalto de Fortaleza de Minas, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986, Goiânia. *Anais...* Goiânia: SBG, 1986. v. 5, p. 1589-603.

MARCHETTO, C.M.L. Platinum-Group Minerals in the O'Toole (Ni-Cu-Co) Deposit, Brazil. *Economic Geology*, Lancaster, v.85, p.921-927, 1990.

MARCHETTO, C.M.L.; BRENNER, T.L.; FRANKE, N.D. et al. Geologia e petrografia do greenstone belt Morro do Ferro a sul de Fortaleza de Minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. v. 1 , p. 149.

MARSTON, R.J.; GROVES, D.I.; HUDSON, D.R. et al. Nickel sulfide deposit in Western Australia. A review. *Economic Geology*, Lancaster, v.76, p.1330-1363, 1981.

MATHEZ, A.E. Interactions involving fluids in the Stillwater and Bushveld Complexes: observations from the rocks. In: JAMES, A.W.; NALDRETT, A.J. (Ed.) *Ore deposition associated with magmas*. *Revision Economic Geology*, v.4, p.21-31, 1989.

MAUREL, C. e PICOT, P. Stabilité de l'allocalosite et de la cobaltite dans systèmes Co-As-Ni-As-S – S. *Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr.*, cidade, v. 97, n. , p. 251-56, 1974.

MOGESSIE, A.; STUMPFL, E.F.; WEIBLEN, P.W. The Role of Fluids in the Formation of Platinum-Group Mineral, Duluth Complex, Minnesota: Mineralogic, Textural, and Chemical Evidence. *Economic Geologic*, Lancaster, v. 86, n. 7, p.1506-1518, 1991.

MORAES, L.J. *Níquel do Brasil*. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 1935. 169p. (Boletim, 9)

MORALES, N. *Evolução tectônica do Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio na porção ocidental*. 1993. 256f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1993.

MORALES, N.; CARVALHO, S.G.; OLIVEIRA, M.A.F. et al. Geologia das Folhas de Fortaleza de Minas, Alpinópolis, Jacuí e Nova Rezende. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2., 1983, Belo Horizonte. *Atas...* Belo Horizonte: SBG, 1983. v. 3, p.411-22.

MORALES, N.; ZANARDO, A.; HASUI, Y. et al. Evolução Tectônica do Grupo Araxá na Serra do Chapadão e da Fortaleza, sudoeste do Estado de Minas Gerais. *Geociências*, São Paulo, v.15, n. esp., p.41-66, 1996 .

MOUTAIN, B.W.; WOOD, S.A. Solubility and transport of Platinum-Group Elements in hydrothermal solutions: thermodynamic and physical chemical constraints. In: PRICHARD, H.M; POTTS, P.J; BOWLES, J.F et al (Ed.). *Geo-Platinum*, n. 87, p. 57-82, 1987.

MOUTAIN, B.W.; WOOD, S.A. Chemical controls of the solubility, transport and deposition of platinum and palladium in hydrothermal solutions: a thermodynamic approach. *Economic Geology*, Lancaster, v.83, p.492-510, 1988.

NALDRETT, A.J. A portion of the Fe-S-O and its application to sulfide ore magmas. *Journal of Petrology*, v.10, p.171-201, 1969.

NALDRETT, A.J. Nickel sulfide deposits – their classification and gênesis with special emphasis on deposit of volcanic association. *Trans. Can. Inst. Min. Met.*, v. 76, p. 183-201, 1973.

NALDRETT, A.J. Partitioning of Fe, Co, Ni and Cu between sulfide liquid and basaltic melts and the composition of Ni-Cu sulfide deposit – A replay and further discussion. *Economic Geology*, Lancaster, v. 74, n. 6, p. 1520-1528, 1979.

NALDRETT, A.J. Nickel sulfide deposits: Classification, composition and genesis. *Economic Geology*, Lancaster, v. 75, n. sp., p. 628-85, 1981.

NALDRETT, A.J. *Magmatic Sulfide Deposits*. New York: Clarendon Press-Oxford University Press, 1989. 186p.

NALDRETT A.J; CAMPBELL, J.C. 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.423-434.

PAKTUNC, A.D.; HULBERT, L.J.; HARRIS, D.C. Partitioning of the platinum-group and other traces elements in sulfides from the Busheveld complex and Canadian occurrences of nickel-copper sulfides. *Canadian Mineralogist*, Montreal, v.28, p.475-488, 1990.

PATERSON, H.L.; DONALDSON, M.J.; SMITH, R.N et al. Nickeliferous sediments and sediment-associated nickel ores at Kambalda, Western Australia. In: BUCHANAN, D.L.; JONES, M.J. (Ed), *Sulphide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks*. London: Institute of Mining Metallurgy, 1984, p.81-94.

PIMENTEL, M.M.; FUCK, R.A.; BOTELHO, N.F. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília Belt, Central Brasil, a review. *Lithos*, v.6, p.463-483, 1999.

ROSS, J.R.; TRAVIS, G.A. The nickel sulfide deposits of Western Australia global perspective. *Economic Geology*, Lancaster, v.76, n. 6, p. 1291-1329, 1981.

ROWELL, W.F.; EDGAR, A.D. Platinum-group element mineralization in a hydrothermal Cu-N—sulfide occurrence, Rathbun Lake, northeastern Ontario. *Economic Geology*, Lancaster, v.81, p.1272-1277, 1986.

SANTIVANEZ, A.O. As serpentinas níquelíferas do Morro do Níquel em Pratápolis, Minas Gerais. *Engenharia, Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro, v. 42, n. 248, p. 61-64, 1965.

SANTOS, M. *Modelo Estrutural da Jazida O'Toole, Fortaleza de Minas (MG)*. 1996. 180f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1996.

SCHMIDT, W. *Die Geologie der Araxá Gruppe in sudwest Minas Gerais, Brasilien, unter besonderer Berücksichtigung des Grunstein-Gurtels von Fortaleza de Minas*. 1983. 134f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Freiburg, Alemanha, 1993.

SIMÕES, L.S.A. *Evolução Tectonometamórfica da Nappe de Passos, Sudoeste de Minas Gerais*. 1995. 149f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SIMÕES, L.S.A.; VALERIANO, C.M. Porção Meridional da Faixa de Dobramentos Brasília: Estágio Atual do Conhecimento e Problemas de Correlação Tectono-Estratigráfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG, 1990. v.6, p.2564-2575.

SIMÕES, L.S.A.; VALERIANO, C.M.; ZANARDO, A. et al. Zonação Metamórfica inversa do grupo Araxá-Canastra na região de São Sebastião do Paraíso-Alpinópolis, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1988. v.3, p.1203-1215.

SKINNER, B.J. Many Origins of Hydrothermal Mineral Deposits. In: BARNES, H.L (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley & Sons, 1997. p.1-70.

SOARES, P.C. Tectônica colisional em torno do Bloco Paraná, Brasil. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE GEOLOGIA, 7., 1988, Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1988. p.63-79.

SOARES, P.C.; FIORI, A.P.; CARVALHO, S.G. Tectônica colisional oblíqua entre o bloco Paraná e a margem sul do Cráton do São Francisco, no Maciço Guaxupé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG, 1990. v.6, p.2723-2734.

SOARES, P.C.; CARVALHO, S.G.; FIORI, A.P. Evolução tectônica de terrenos máfico-ultramáficos na margem sul do Cráton do São Francisco. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3., 1991, Rio Claro, SP. *Boletim...* Rio Claro, SP: SBG, 1991. p.66-68.

SWENSSON, T. Produção de Ferro-Níquel na usina do Morro do Níquel S.A. In: SEMANA DE ESTUDO DE OURO PRETO, 6, 1968. Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto. 1968.

SZABÓ, G.A.J. *Contexto geológico e petrologia das rochas metaultramáficas de Alpinópolis, MG.* 1989. 212p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

TEIXEIRA, N.A. *Geologia e petrologia e prospecção geoquímica da seqüência vulcano-sedimentar Morro do Ferro, Fortaleza de Minas (MG).* 1978. 202f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1978.

TEIXEIRA, N.A.; DANNI, J.C.M. Geologia da raiz de um greenstone belt na região de Fortaleza de Minas, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.9, n. 1, p.17-26, 1979a.

TEIXEIRA, N.A.; DANNI, J.C.M. Petrologia de lavas metabásicas da Sequência Morro do Ferro, Fortaleza de Minas (MG). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.9, n.2, p.151-158, 1979b.

TEIXEIRA, N.A.; GASPAR, J.C.; BRENNER, T.L. et al. Geologia e implicações geotectônicas do greenstone belt do Morro do Ferro (Fortaleza de Minas, MG). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.17, n. 2, p.209-220, 1987.

THROW, R.A.P.; PANKHURST, R.J. Idades radiométricas ao sul do Cráton do São Francisco: região da Folha de Barbacena, MG. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 7., 1993, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG, 1993. v. 1, p.260-262.

VALERIANO, C.M. *Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da Represa de Furnas, sudoeste de Minas Gerais*. 1992. 192f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

WERNICK, E.; FIORI, A.P.; BETTENCOURT, J.S. et al. A tectônica rígida do fim do Ciclo Brasileiro e sua implicação na estruturação da borda sul e sudoeste do Cráton do São Francisco: tentativa de um modelo preliminar. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1., 1981, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG, 1981. v. 1, p.164-178.

WILSON, H.D.B; ANDERSON, D.T. The composition of Canadian sulfide ore deposits. *Trans. Can. Inst. Min. Met.*, n.62, p.327-339, 1959.

ZANARDO, A. *Análise petrográfica, estratigráfica e microestrutural da região de Guaxupé-Passos-Delfinópolis (MG)*. 1992. 270p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1992.

ZANARDO, A.; MORALES, N.; CARVALHO, S.G. et al. Evolução metamórfica da porção sul do Cráton Paramirim. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG, 1990. v. 4, p. 1945-1951.

ZANARDO, A.; OLIVEIRA, M.A.F. de; DEL LAMA, E.A. et al. Rochas máficas e ultramáficas da Faixa Jacuí – Bom Jesus da Penha – Conceição da Aparecida (MG). *Geociências*, São Paulo, v.15, n.1, p.279-297, 1996.

ZANARDO, A.; MORALES, N.; DEL LAMA, E.A. et al. Evolução geológica das rochas granulíticas da região de Guaxupé, Sudeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1998, p.25.

ZANARDO, A.; MORALES, N.; OLIVEIRA, M.A.F et al. Petro-tectonic associations in the Alterosa Suture Paleozone, southeastern Brazil. In: INTERNACIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31. 2000, Rio de Janeiro. *Abstract Volume...* Rio de Janeiro: IGC Organizing Committee, 2000. 1 CD-ROM.

## CAPÍTULO X. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

---

ANTHONY, J.W.; BIDEAUX, R.A.; BLADH, K.W. et al. *Handbook of Mineralogy: Elements, Sulfides, Sulfosalts*. Tucson, Arizona: Mineral Data Publishing, 1990. v.1, 588p.

BARKOV, A.Y.; THIBAUT, Y.; LAAJOKI, K.V.O et al. Zoning and substitutions in Co-Ni-(Fe)-PGE sulfarsenides from the Mount General'Skaya layered intrusion, Artic Russia. *Canadian Mineralogist*, Montreal, v.37, p.127-142, 1999.

BRENNER, T.L. Geologia e Gênese da Jazida de Ni-Cu-PGE de Fortaleza de Minas, MG. Seminário (Disciplina: Metalogenia em Rochas Máficas e Ultramáficas), 2002.

BRENNER, T.L. Evolução Metamórfica da Jazida de Ni-Cu-PGE de Fortaleza de Minas. Seminário (Disciplina: Análise Microscópica de Rochas Metamórficas), 2002.

CRAIG, J.R.; VAUGHAN, A. *Ore microscopy and ore petrography*. 2rd.. New York: John Wiley & Sons, 1994.

FIGUEIREDO, B.R. *Minérios e ambiente*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2000, 401p.

HARLAND, W.B; AGREEL, S.O.; COOK, A.H. et al (Eds.). *Mineral Chemistry of Metal Sulfide*. New York: Cambridge University Press, 1978, 493p. Cambridge Earth Science Series

KRETZ, R. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, v.68, p.277-279, 1983.

KRAUSKOPF, K.B; BIRD, D.K. *Introduction to Geochemistry* 3rd. ed. Singapura: McGraw-Hill, 1995. 647p.

MOGESSIE, A.; HAUZENBERGER, C.A.; HOINKES, G. et al. Genesis of platinum-group minerals in the Las Aguilas mafic-ultramafic rocks, San Luis Province, Argentina: textural, chemical and mineralogical evidence. *Mineralogy and Petrology*, Áustria, v.68, p.85-114, 200.

NALDRETT, A.J. World-class Ni-Cu-PGE deposit: key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, v.34, p.227-240, 1999.

RIBBE, P.H. (Ed.). *Sulfide Mineralogy*. Virginia: Southern Printing Company, 1974. 276p. Mineralogical Society of America Short Course Notes

ROLINSON, H. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Singapore: Longman Singapore Publishers, 1993. 352p.

**CALCOPIRITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
MM-17	1	30,310	0,000	0,000	35,179	0,000	0,044	35,414	100,947	24,65	0,00	0,00	25,15	0,00	0,03	50,17	100,00
	5	30,233	0,000	0,000	34,993	0,011	0,002	35,334	100,573	24,67	0,00	0,00	25,10	0,01	0,00	50,22	100,00
	7	30,093	0,000	0,000	34,973	0,038	0,000	35,165	100,269	24,64	0,00	0,00	25,17	0,03	0,00	50,16	100,00
	9	30,431	0,000	0,173	34,654	0,000	0,000	35,039	100,297	24,93	0,00	0,13	24,95	0,00	0,00	49,99	100,00
	13	30,198	0,000	0,044	35,134	0,000	0,000	35,320	100,696	24,62	0,00	0,03	25,18	0,00	0,00	50,16	99,99
	17	30,151	0,000	0,037	34,995	0,026	0,060	35,365	100,634	24,60	0,00	0,03	25,05	0,02	0,04	50,26	100,00
FM-G-3	5	30,098	0,000	0,006	34,685	0,007	0,024	35,092	99,912	24,72	0,00	0,00	25,04	0,00	0,01	50,21	99,98
	7	30,346	0,000	0,015	34,685	0,000	0,051	35,122	100,219	24,86	0,00	0,01	24,98	0,00	0,03	50,12	100,00
	11	30,197	0,000	0,124	34,472	0,009	0,030	34,978	99,810	24,84	0,00	0,10	24,92	0,01	0,02	50,11	100,00
	15	30,310	0,011	0,249	34,334	0,000	0,000	35,031	99,935	24,90	0,01	0,19	24,79	0,00	0,00	50,11	100,00
	16	30,558	0,000	0,051	34,907	0,024	0,008	35,447	100,995	24,83	0,00	0,04	24,93	0,02	0,00	50,17	99,99
	18	30,339	0,000	0,081	33,993	0,018	0,000	35,993	100,424	24,99	0,00	0,06	24,61	0,01	0,00	50,33	100,00
SM-II	1	30,074	0,000	0,001	34,274	0,029	0,000	35,364	99,742	24,69	0,00	0,00	24,73	0,02	0,00	50,56	100,00
	18	30,306	0,000	0,029	33,971	0,009	0,048	35,543	99,906	24,81	0,00	0,02	24,45	0,01	0,03	50,68	100,00
	19	30,233	0,000	0,000	34,412	0,000	0,038	35,242	99,925	24,80	0,00	0,00	24,81	0,00	0,02	50,36	99,99
	20	30,443	0,000	0,000	33,852	0,001	0,000	35,284	99,580	25,02	0,00	0,00	24,46	0,00	0,00	50,52	100,00
SM	26	30,448	0,000	0,000	34,583	0,000	0,014	34,524	99,569	25,17	0,00	0,00	25,12	0,00	0,01	49,70	100,00
	33	30,518	0,000	0,047	34,689	0,062	0,095	34,579	99,990	25,14	0,00	0,04	25,11	0,04	0,06	49,61	100,00
	35	30,408	0,002	0,082	34,649	0,026	0,030	34,953	100,150	24,95	0,00	0,06	24,99	0,02	0,02	49,96	100,00
	36	30,265	0,000	0,002	34,726	0,034	0,023	34,305	99,355	25,10	0,00	0,00	25,31	0,02	0,01	49,55	99,99
	39	30,334	0,001	0,005	34,654	0,034	0,018	34,505	99,551	25,08	0,00	0,00	25,18	0,02	0,01	49,69	99,98
FM-SM-1	50	30,496	0,007	0,279	34,188	0,002	0,000	33,891	98,863	25,45	0,01	0,22	25,07	0,00	0,00	49,25	100,00
	53	30,451	0,000	0,182	34,675	0,005	0,000	34,430	99,743	25,15	0,00	0,14	25,17	0,00	0,00	49,53	99,99
	56	30,540	0,000	0,066	34,521	0,052	0,000	34,374	99,553	25,27	0,00	0,05	25,11	0,04	0,00	49,54	100,01
	62	30,200	0,000	0,030	34,610	0,031	0,000	34,559	99,430	24,99	0,00	0,02	25,17	0,02	0,00	49,80	100,00
	69	30,233	0,000	0,069	34,442	0,000	0,000	34,576	99,320	25,03	0,00	0,05	25,06	0,00	0,00	49,86	100,00
SM	77	30,285	0,000	0,087	34,638	0,000	0,008	35,203	100,221	24,80	0,00	0,07	24,93	0,00	0,00	50,20	100,00
	96	30,295	0,038	0,159	34,648	0,000	0,113	35,042	100,295	24,82	0,03	0,12	24,95	0,00	0,07	50,01	100,00
	99	31,008	0,000	0,005	33,770	0,000	0,000	34,800	99,583	25,26	0,00	0,00	24,47	0,00	0,00	49,97	99,70
SM-VII	105	29,800	0,000	0,008	34,739	0,006	0,000	34,357	98,910	24,79	0,00	0,01	25,40	0,00	0,00	48,79	98,99
	108	29,753	0,000	0,000	34,577	0,042	0,000	34,355	98,727	24,79	0,00	0,00	25,32	0,03	0,00	49,86	100,00
	112	29,908	0,005	0,000	34,694	0,006	0,039	34,353	99,005	24,87	0,00	0,00	25,35	0,00	0,02	49,75	99,99
	115	30,019	0,000	0,000	34,668	0,019	0,000	34,468	99,174	24,90	0,00	0,00	25,28	0,01	0,00	49,80	99,99

**CALCOPIRITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM-IV	119	29,748	0,000	0,018	34,730	0,004	0,036	34,455	98,991	24,72	0,00	0,01	25,37	0,00	0,02	49,87	99,99
SM-10	146	29,843	0,000	0,025	34,662	0,004	0,000	34,763	99,297	24,69	0,00	0,02	25,20	0,00	0,00	50,09	100,00
	147	29,815	0,000	0,082	34,668	0,000	0,000	34,349	98,914	24,81	0,00	0,07	25,35	0,00	0,00	49,78	100,01
	157	30,284	0,002	0,045	34,364	0,003	0,000	34,327	99,025	25,17	0,00	0,04	25,10	0,00	0,00	49,69	100,00
	165	29,875	0,000	0,021	34,783	0,000	0,006	34,592	99,277	24,75	0,00	0,02	25,32	0,00	0,00	49,91	100,00
	168	30,197	0,000	0,033	34,131	0,013	0,069	34,165	98,608	25,21	0,00	0,03	25,04	0,01	0,04	49,67	100,00
	175	30,261	0,000	0,003	34,790	0,018	0,000	33,775	98,847	25,28	0,00	0,00	25,55	0,01	0,00	49,15	99,99
SM-III	176	30,033	0,000	0,000	34,352	0,018	0,027	34,362	98,792	25,00	0,00	0,00	25,14	0,01	0,02	49,83	100,00
	179	29,946	0,182	0,018	34,494	0,008	0,379	34,373	99,400	24,83	0,14	0,01	25,14	0,01	0,23	49,64	100,00
	180	30,083	0,018	0,000	35,010	0,036	0,000	34,287	99,434	24,94	0,01	0,00	25,51	0,03	0,00	49,51	100,00
	185	29,962	0,000	0,151	34,371	0,092	0,000	34,339	98,915	24,93	0,00	0,12	25,13	0,07	0,00	49,76	100,01
	188	30,038	0,000	0,000	34,704	0,000	0,020	34,343	99,105	24,95	0,00	0,00	25,34	0,00	0,01	49,69	99,99
	191	30,247	0,007	0,094	34,592	0,017	0,050	34,239	99,246	25,12	0,01	0,07	25,24	0,01	0,03	49,52	100,00
FM-G-1	211	30,089	0,000	0,196	34,451	0,013	0,000	34,613	99,362	24,90	0,00	0,15	25,05	0,01	0,00	49,88	99,99
SM-B	300	29,770	0,000	0,002	35,220	0,000	0,047	34,410	99,449	24,67	0,00	0,00	25,65	0,00	0,03	49,66	100,01
	302	29,954	0,000	0,028	34,892	0,017	0,038	34,537	99,466	24,79	0,00	0,02	25,38	0,01	0,02	49,78	100,00
	303	30,013	0,001	0,000	34,931	0,000	0,000	34,468	99,413	24,86	0,00	0,00	25,43	0,00	0,00	49,72	100,01
	304	30,263	0,000	0,007	34,994	0,016	0,000	34,622	99,902	24,94	0,00	0,01	25,35	0,01	0,00	49,70	100,01
	307	29,828	0,010	0,032	34,845	0,002	0,000	34,296	99,013	24,80	0,01	0,03	25,47	0,02	0,00	49,68	100,01
SM-IV-B	319	30,213	0,000	0,017	34,533	0,033	0,000	34,698	99,494	24,96	0,00	0,01	25,07	0,02	0,00	49,93	99,99
	322	30,521	0,000	0,040	34,620	0,000	0,000	34,509	99,690	25,20	0,00	0,03	25,13	0,00	0,00	49,64	100,00
	329	29,462	0,000	0,013	34,597	0,021	0,072	34,366	98,531	24,59	0,00	0,01	25,38	0,01	0,05	49,96	100,00
FM-SM	331	30,285	0,005	0,084	34,857	0,022	0,006	34,755	100,014	24,91	0,00	0,07	25,20	0,02	0,00	49,80	100,00
	335	30,268	0,000	0,014	35,164	0,010	0,068	34,381	99,905	24,99	0,00	0,01	25,52	0,01	0,04	49,44	100,01
	337	30,261	0,000	0,255	35,085	0,033	0,000	34,433	100,067	24,94	0,00	0,20	25,41	0,02	0,00	49,43	100,00
	343	30,165	0,000	0,000	35,010	0,000	0,075	34,600	99,850	24,88	0,00	0,00	25,38	0,00	0,05	49,70	100,01
SM-T	356	29,799	0,000	0,006	34,898	0,017	0,081	34,670	99,471	24,64	0,00	0,01	25,36	0,01	0,05	49,93	100,00
	368	30,214	0,000	0,031	34,708	0,000	0,000	34,742	99,695	24,92	0,00	0,02	25,16	0,00	0,00	49,90	100,00
	407	29,919	0,000	0,041	34,923	0,045	0,000	34,410	99,338	24,80	0,00	0,03	25,45	0,03	0,00	49,69	100,00
SM-H-2	383	30,383	0,002	0,019	34,714	0,007	0,000	34,747	99,872	25,02	0,00	0,01	25,12	0,00	0,00	49,84	99,99
	384	30,763	0,000	0,032	34,486	0,042	0,103	34,635	100,061	25,31	0,00	0,02	24,94	0,03	0,06	49,63	99,99
SM-4D-B	386	30,093	0,000	0,013	34,881	0,020	0,000	34,774	99,781	24,80	0,00	0,01	25,26	0,01	0,00	49,91	99,99
	389	30,820	0,000	0,036	34,842	0,001	0,050	34,503	100,252	25,34	0,00	0,03	24,18	0,00	0,03	49,42	99,00

**CALCOPIRITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM-4D-B	390	30,085	0,000	0,010	35,177	0,000	0,027	34,509	99,808	24,84	0,00	0,01	25,52	0,00	0,02	49,62	100,01
	391	30,297	0,000	0,008	35,329	0,000	0,074	34,496	100,204	24,94	0,00	0,01	25,56	0,00	0,05	49,45	100,01
	394	30,163	0,000	0,000	35,372	0,024	0,104	34,742	100,405	24,75	0,00	0,00	25,51	0,02	0,06	49,66	100,00
	396	30,206	0,000	0,000	35,339	0,033	0,000	34,497	100,075	24,89	0,00	0,00	25,59	0,02	0,00	49,50	100,00
	398	30,071	0,000	0,026	35,289	0,045	0,014	34,546	99,991	24,78	0,00	0,02	25,56	0,03	0,01	49,59	99,99
	401	30,369	0,000	0,062	35,081	0,035	0,000	34,398	99,945	25,06	0,00	0,05	25,44	0,02	0,00	49,43	100,00

**MINERAIS DA SERIE COBALTIA-GERSDORFFITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
FM-SM-2	2	7,693	17,418	11,453	0,014	0,000	43,393	19,466	99,437	7,59	16,29	10,75	0,01	0,00	31,91	33,45	100,00
	5	10,172	17,334	9,630	0,020	0,000	41,417	20,734	99,307	9,90	15,98	8,91	0,02	0,00	30,04	35,14	99,99
	10	6,647	18,207	11,331	0,000	0,025	43,888	19,683	99,781	6,54	16,97	10,60	0,00	0,02	32,17	33,71	100,01
	14	6,284	20,754	8,577	0,025	0,000	43,409	19,591	98,640	6,25	19,55	8,11	0,02	0,00	32,16	33,91	100,00
	19	6,310	22,757	7,194	0,003	0,000	42,888	19,442	98,594	6,28	21,45	6,81	0,00	0,00	31,79	33,68	100,01
	21	6,121	18,776	10,794	0,000	0,018	45,138	19,116	99,963	6,05	17,59	10,15	0,00	0,01	33,27	32,92	99,99
FM-SM-1	59	5,500	19,135	11,160	0,003	0,000	44,403	19,124	99,325	5,46	18,01	10,55	0,00	0,00	32,88	33,09	99,99
	71	5,798	17,055	12,258	0,208	0,000	43,607	19,700	98,626	5,76	16,06	11,59	0,18	0,00	32,30	34,10	99,99
SM-IV	116	6,719	17,582	11,013	0,018	0,015	42,859	19,382	97,588	6,75	16,73	10,52	0,02	0,01	32,08	33,90	100,01
	132	6,197	19,644	9,651	0,000	0,000	43,547	19,628	98,667	6,16	18,50	9,12	0,00	0,00	32,25	33,97	100,00
	135	6,324	18,757	10,186	0,018	0,004	43,494	19,312	98,095	6,33	17,80	9,70	0,02	0,00	32,46	33,68	99,99
	145	6,532	19,538	10,095	0,032	0,000	42,997	19,649	98,843	6,47	18,34	9,51	0,03	0,00	31,75	33,90	100,00
SM-10	153	5,704	20,587	9,022	0,026	0,000	43,743	19,453	98,535	5,69	19,45	8,56	0,02	0,00	32,51	33,78	100,01
	154	5,613	20,385	10,214	0,050	0,007	44,159	19,259	99,687	5,55	19,10	9,60	0,04	0,01	32,54	33,16	100,00
	159	5,609	18,421	11,780	0,047	0,000	44,314	19,063	99,234	5,58	17,36	11,14	0,04	0,00	32,85	33,02	99,99
	173	5,226	17,280	13,616	0,021	0,000	45,201	18,926	100,270	5,16	16,18	12,79	0,02	0,00	33,28	32,56	99,99
SM-III	178	4,285	22,087	9,429	0,199	0,096	44,299	19,425	99,820	4,23	20,66	8,85	0,17	0,08	32,60	33,40	99,99
	183	5,286	20,697	10,325	0,052	0,000	44,577	19,347	100,284	5,20	19,29	9,66	0,04	0,00	32,67	33,14	100,00
FM-SM	349	6,248	20,110	9,948	0,028	0,000	43,963	19,569	99,866	6,15	18,75	9,31	0,02	0,00	32,24	33,53	100,00
	350	6,624	11,855	16,824	0,052	0,000	44,619	18,927	98,901	6,62	11,22	15,98	0,05	0,00	33,22	32,92	100,01
	351	6,813	11,448	16,540	0,000	0,000	45,614	18,925	99,340	6,79	10,81	15,68	0,00	0,00	33,88	32,84	100,00
	352	6,544	11,812	17,140	0,000	0,008	45,257	18,654	99,415	6,53	11,16	16,26	0,00	0,01	33,64	32,40	100,00
	353	6,701	15,327	13,091	0,020	0,022	45,274	19,309	99,744	6,63	14,37	12,32	0,02	0,02	33,38	33,27	100,01
	354	7,363	10,841	17,289	0,000	0,000	45,115	18,785	99,393	7,33	10,23	16,38	0,00	0,00	33,49	32,58	100,01
SM-T	361	3,296	6,250	26,790	0,029	0,011	43,961	19,162	99,499	3,27	5,88	25,20	0,03	0,01	32,51	33,11	100,01
	408	3,511	9,794	22,647	0,000	0,000	44,543	19,986	100,481	6,62	11,22	15,98	0,05	0,00	33,22	32,92	100,01
	409	3,011	7,212	25,768	0,000	0,000	44,397	18,831	99,219	5,69	19,45	8,56	0,02	0,00	32,51	33,78	100,01
SM-H-2	376	7,104	14,891	13,896	0,008	0,009	43,980	19,502	99,390	7,02	13,94	13,06	0,01	0,01	32,39	33,57	100,00
FM-G-4	2A	4,794	26,100	7,157	0,001	0,000	44,049	19,712	101,813	4,64	23,54	6,59	0,00	0,00	31,78	33,24	99,80
	2B	3,882	27,235	6,569	0,000	0,000	44,017	19,816	101,519	3,77	24,63	6,06	0,00	0,00	31,84	33,49	99,78
	2C	4,575	26,267	6,988	0,000	0,000	44,372	19,874	102,076	4,42	23,66	6,43	0,00	0,00	31,98	33,47	99,95
	3	8,468	12,566	16,475	0,000	0,000	45,205	19,307	102,021	8,19	11,33	15,16	0,00	0,00	32,60	32,45	99,74
	8	3,869	28,163	5,652	0,000	0,000	44,570	19,808	102,062	3,75	25,42	5,21	0,00	0,00	32,18	33,42	99,98

**MINERAIS DA SERIE COBALTIA-GERSDORFFITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
FM-G-4	12	8,138	14,100	14,430	0,000	0,000	44,898	19,172	100,738	7,97	12,87	13,45	0,00	0,00	32,85	32,72	99,87
	13	7,997	16,250	13,238	0,008	0,000	44,828	19,555	101,876	7,74	14,66	12,19	0,01	0,00	32,34	32,97	99,91
	14	7,341	18,291	11,777	0,021	0,000	44,684	19,524	101,638	7,13	16,55	10,88	0,02	0,00	32,34	33,02	99,94
	15	8,303	15,644	13,170	0,000	0,000	44,966	19,091	101,174	8,11	14,24	12,24	0,00	0,00	32,74	32,48	99,80
	17	5,295	23,613	8,893	0,001	0,000	45,042	19,444	102,288	5,13	21,32	8,20	0,00	0,00	32,53	32,81	99,98
	18	6,077	22,642	9,304	0,010	0,000	44,925	19,263	102,221	5,89	20,46	8,58	0,01	0,00	32,47	32,53	99,94
	19	5,925	23,578	7,034	0,000	0,000	19,471	44,510	100,518	5,82	21,58	6,57	0,00	0,00	32,59	33,31	99,87
	25	7,027	18,736	11,406	0,000	0,000	44,777	19,745	101,691	6,81	16,92	10,51	0,00	0,00	32,34	33,33	99,90
	26	7,705	9,523	19,598	0,000	0,000	46,526	18,353	101,705	7,55	8,70	18,27	0,00	0,00	33,99	31,33	99,84
	32	6,654	22,798	8,267	0,000	0,000	44,582	19,913	102,214	6,41	20,48	7,58	0,00	0,00	32,03	33,44	99,94
	33	7,456	8,659	20,748	0,000	0,000	47,098	17,893	101,854	7,33	7,93	19,39	0,00	0,00	34,49	30,62	99,75
	34	5,992	22,012	9,723	0,000	0,000	44,826	19,632	102,185	5,79	19,83	8,94	0,00	0,00	32,30	33,05	99,90
	38	5,794	21,289	10,652	0,000	0,000	44,633	19,567	101,935	5,62	19,23	9,82	0,00	0,00	32,25	33,04	99,95
	39	8,791	13,252	15,317	0,000	0,000	44,906	19,633	101,899	8,49	11,92	14,07	0,00	0,00	32,32	33,02	99,81
	42	4,821	26,736	6,201	0,000	0,000	44,871	19,670	102,299	4,66	24,09	5,70	0,00	0,00	32,34	33,13	99,93
	48	8,241	15,165	14,160	0,056	0,000	44,901	19,672	102,195	7,95	13,63	12,99	0,05	0,00	32,28	33,05	99,94
	50	4,469	26,037	6,871	0,000	0,000	44,572	19,642	101,591	4,35	23,59	6,36	0,00	0,00	32,31	33,27	99,87
	51	7,175	17,279	13,190	0,000	0,000	44,743	19,674	102,061	6,93	15,55	12,12	0,00	0,00	32,21	33,10	99,91
	52	7,357	8,159	21,162	0,000	0,000	47,270	17,920	101,868	7,23	7,47	19,78	0,00	0,00	34,63	30,68	99,78
	57	6,506	21,254	9,915	0,000	0,000	44,814	19,433	101,922	6,31	19,21	9,15	0,00	0,00	32,40	32,83	99,90
59	9,836	11,880	15,873	0,000	0,000	45,091	19,190	101,870	9,58	10,72	14,62	0,00	0,00	32,54	32,37	99,83	

**ESFALERITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM	30	6,958	0,054	0,029	0,000	59,006	0,000	32,939	98,986	6,06	0,04	0,02	0,00	43,90	0,00	49,97	99,99
	32	6,844	0,047	0,053	0,514	58,712	0,009	33,150	99,329	5,94	0,04	0,04	0,39	43,50	0,01	50,80	100,72
	38	6,353	0,054	0,013	0,656	57,957	0,033	32,852	97,918	5,58	0,04	0,01	0,51	43,53	0,02	50,30	99,99
	46	5,812	0,148	2,062	0,031	57,946	0,031	33,292	99,322	5,03	0,12	1,70	0,02	42,88	0,02	50,22	99,99
SM-VII	101	6,933	0,083	0,220	0,000	58,862	0,018	32,922	99,038	6,04	0,07	0,18	0,00	43,78	0,01	49,92	100,00
	110	8,117	0,041	0,046	0,030	57,064	0,073	33,020	98,391	7,09	0,03	0,04	0,02	42,56	0,05	50,21	100,00
SM-III	177	5,679	0,016	0,000	0,606	59,393	0,093	32,953	98,740	4,96	0,01	0,00	0,47	44,34	0,06	50,16	100,00
	182	5,260	0,070	1,401	0,000	59,573	0,028	32,836	99,168	4,58	0,06	1,16	0,00	44,35	0,02	49,83	100,00
	189	5,510	0,016	0,025	0,602	59,842	0,000	32,882	98,877	4,81	0,01	0,02	0,46	44,66	0,00	50,03	99,99
SM-H-2	385	5,309	0,064	0,624	0,357	60,883	0,002	33,252	100,491	4,57	0,05	0,51	0,27	44,76	0,00	49,84	100,00
SM-4D-B	387	5,935	0,024	0,002	1,164	59,750	0,135	35,904	102,914	5,14	0,02	0,00	0,89	44,22	0,09	49,65	100,01

**MAGNETITA**

Lâmina	Ponto	wt%									
		SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	Fe2O3	MgO	CaO	MnO	FeO	Total
FM-G-3	23	0,008	0,218	0,163	8,266	59,484	0,000	0,000	0,132	31,044	99,314
	24	0,070	0,228	0,160	7,852	59,848	0,001	0,000	0,115	31,043	99,317
	25	0,031	0,498	0,027	4,345	63,689	0,005	0,000	0,049	31,564	100,208
	26	0,015	0,186	0,078	6,142	62,246	0,004	0,000	0,049	31,243	99,963
	27	0,029	0,189	0,112	6,200	61,702	0,000	0,000	0,130	30,978	99,340
	28	0,038	0,402	0,160	8,171	59,200	0,000	0,000	0,224	31,105	99,300
	29	0,022	0,254	0,156	8,104	60,010	0,007	0,000	0,123	31,259	99,935
	30	0,546	0,195	0,092	1,439	66,470	0,071	0,054	0,000	30,874	99,741
	31	0,039	0,137	0,073	6,469	61,595	0,015	0,000	0,090	30,950	99,368
SM-III	212	0,020	0,222	0,017	9,072	59,519	0,087	0,008	0,256	31,063	100,264
	213	0,000	0,209	0,012	8,889	59,484	0,044	0,073	0,276	30,989	99,976
	214	0,004	0,309	0,013	10,007	57,816	0,077	0,000	0,267	30,899	99,393
	215	0,011	0,119	0,002	9,560	59,491	0,053	0,013	0,243	31,159	100,650
	216	0,043	0,087	0,005	8,788	59,963	0,043	0,019	0,271	30,940	100,159
	217	0,270	0,022	0,000	0,021	69,381	0,163	0,016	0,000	30,975	100,849
	218	0,081	0,054	0,000	0,003	69,506	0,055	0,000	0,000	31,271	100,971
	219	0,054	0,042	0,000	0,000	69,318	0,053	0,000	0,000	31,166	100,633
	220	0,932	0,038	0,003	0,011	68,976	0,331	0,023	0,068	30,451	100,832
	221	0,067	0,022	0,001	0,019	69,112	0,051	0,000	0,000	31,054	100,326
	SM-IV-B	222	0,000	0,457	0,110	18,072	50,019	0,150	0,019	0,627	31,044
223		0,030	0,373	0,071	14,275	54,478	0,110	0,024	0,481	31,294	101,135
224		0,000	0,383	0,068	12,084	55,769	0,103	0,000	0,342	31,010	99,759
225		0,000	0,626	0,140	23,124	44,463	0,177	0,000	0,826	31,008	100,363
226		0,007	0,000	0,002	6,172	63,506	0,046	0,021	0,058	31,350	101,162
227		0,025	0,214	0,000	0,017	69,180	0,041	0,023	0,018	31,425	100,944
228		0,043	0,141	0,014	1,342	67,856	0,010	0,010	0,036	31,371	100,824
229		0,089	0,134	0,014	0,303	69,230	0,048	0,003	0,000	31,455	101,275
230		0,093	0,077	0,002	0,034	69,453	0,044	0,003	0,000	31,324	101,030
232		0,021	0,198	0,005	0,803	68,794	0,055	0,000	0,036	31,554	101,466
SM-S1-B		233	1,746	0,196	0,027	3,897	64,991	0,293	0,091	0,061	30,869
	234	0,081	0,157	0,041	2,991	66,560	0,000	0,000	0,033	31,635	101,498
	235	0,061	0,224	0,019	3,267	66,654	0,000	0,000	0,000	31,948	102,172
	236	0,078	0,122	0,024	2,209	67,168	0,000	0,000	0,016	31,481	101,097
	237	0,027	0,212	0,104	10,420	58,586	0,001	0,000	0,235	31,500	101,083
	238	0,000	0,163	0,035	0,782	68,838	0,002	0,000	0,012	31,643	101,475
	239	0,022	0,157	0,033	1,782	67,604	0,002	0,000	0,019	31,540	101,158
	240	0,042	0,144	0,044	2,554	67,158	0,008	0,009	0,039	31,659	101,656
	241	0,010	0,275	0,036	1,768	67,468	0,005	0,000	0,062	31,637	101,262
	242	0,031	0,189	0,038	3,024	66,434	0,003	0,000	0,037	31,641	101,398
SM-4D-D	292	0,069	0,151	0,000	5,550	63,659	0,092	0,034	0,185	31,184	100,923
	293	0,037	0,277	0,015	11,464	57,454	0,123	0,000	0,521	31,029	100,920
	294	0,042	0,273	0,025	8,813	60,098	0,104	0,000	0,282	31,242	100,879
	295	0,031	0,112	0,020	7,540	61,871	0,081	0,000	0,243	31,225	101,123
	296	0,020	0,174	0,012	9,588	59,225	0,100	0,005	0,343	30,974	100,439
	297	0,021	0,283	0,015	10,245	58,582	0,105	0,000	0,429	30,974	100,653
	298	0,007	0,235	0,010	9,203	59,647	0,095	0,001	0,375	31,098	100,670
	299	0,000	0,225	0,012	8,788	60,574	0,118	0,000	0,344	31,067	101,128

**PENTLANDITA**

Lâmina	Ponto	wt%								at%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
FM-G-3	1	30,363	0,097	34,586	0,000	0,008	0,056	33,436	98,546	24,84	0,70	26,91	0,00	0,01	0,03	47,51	100,00
	4	30,557	0,884	34,280	0,001	0,032	0,000	33,514	99,268	24,96	0,68	26,64	0,00	0,02	0,00	47,69	99,99
	9	30,397	0,910	34,526	0,018	0,002	0,000	33,476	99,329	24,83	0,70	26,83	0,01	0,00	0,00	47,63	100,00
	10	30,531	0,856	34,690	0,000	0,038	0,000	33,301	99,416	24,95	0,66	26,97	0,00	0,03	0,00	47,40	100,01
	13	30,363	0,088	34,723	0,000	0,000	0,000	33,407	98,581	24,80	0,68	26,98	0,00	0,00	0,00	47,53	99,99
	17	30,230	0,987	34,599	0,053	0,000	0,000	35,522	101,391	24,66	0,76	26,87	0,04	0,00	0,00	47,67	100,00
	19	30,468	0,896	34,656	0,052	0,009	0,000	33,436	99,517	24,86	0,69	26,90	0,04	0,01	0,00	47,51	100,01
	20	30,316	0,910	34,790	0,015	0,041	0,000	33,618	99,690	24,67	0,70	26,93	0,01	0,03	0,00	47,65	99,99
	22	30,238	1,024	34,674	0,000	0,026	0,000	33,479	99,441	24,68	0,79	26,92	0,00	0,02	0,00	47,59	100,00
	FM-SM-1	54	38,615	0,915	25,646	0,046	0,000	0,000	34,570	99,792	31,28	0,15	19,76	0,03	0,00	0,00	48,78
75		38,513	0,297	26,522	0,000	0,004	0,067	34,542	99,945	31,00	0,23	20,31	0,00	0,00	0,04	48,42	100,00
SM	78	30,653	0,638	34,806	0,001	0,016	0,000	33,139	99,253	25,10	0,50	27,12	0,00	0,01	0,00	47,27	100,00
	80	31,115	0,180	34,891	0,000	0,018	0,000	33,160	99,364	25,45	0,14	27,15	0,00	0,01	0,00	47,25	100,00
	81	30,825	0,606	34,499	0,035	0,015	0,079	33,260	99,319	25,22	0,47	26,84	0,03	0,01	0,05	47,39	100,01
	83	31,978	0,195	33,720	0,048	0,000	0,011	33,891	99,843	26,02	0,15	25,75	0,03	0,00	0,01	48,03	99,99
	85	30,733	0,142	35,397	0,000	0,039	0,000	32,944	99,255	25,20	0,11	27,61	0,00	0,03	0,00	47,05	100,00
	86	30,679	0,525	34,970	0,000	0,000	0,008	32,738	98,920	25,26	0,41	27,39	0,00	0,00	0,00	46,94	100,00
	87	29,893	0,341	34,832	0,000	0,000	0,114	33,432	98,612	24,57	0,27	27,23	0,00	0,00	0,07	47,86	100,00
	90	30,675	0,589	34,803	0,000	0,000	0,000	32,881	98,948	25,22	0,46	27,22	0,00	0,00	0,00	47,09	99,99
	92	32,058	0,301	33,068	0,000	0,000	0,047	33,776	99,250	26,14	0,23	25,64	0,00	0,00	0,00	47,96	99,97
	94	32,473	0,605	34,835	0,000	0,000	0,081	32,733	100,727	25,13	0,47	27,33	0,00	0,00	0,05	47,02	100,00
97	30,576	0,610	34,583	0,018	0,053	0,000	32,987	98,827	25,15	0,48	27,06	0,01	0,04	0,00	47,26	100,00	
SM-IV	118	26,395	0,500	36,208	0,000	0,007	0,057	35,265	98,432	21,50	0,39	28,05	0,00	0,00	0,03	50,03	100,00
	123	28,626	0,721	36,514	0,000	0,001	0,035	32,621	98,518	23,68	0,57	28,73	0,00	0,00	0,02	47,00	100,00
	125	28,875	1,065	36,119	0,009	0,011	0,041	32,322	98,442	23,95	0,84	28,49	0,01	0,01	0,03	46,69	100,02
	127	28,464	1,049	35,491	0,000	0,000	0,091	32,922	98,017	23,60	0,82	27,99	0,00	0,00	0,06	47,54	100,01
	128	28,282	0,546	36,775	0,000	0,001	0,032	32,947	98,583	23,34	0,43	28,87	0,00	0,00	0,02	47,35	100,01
	131	28,806	0,749	36,399	0,000	0,000	0,037	32,703	98,694	23,78	0,59	28,58	0,00	0,00	0,02	47,02	99,99
	138	28,708	0,665	36,193	0,000	0,000	0,000	32,813	98,379	23,74	0,52	28,47	0,00	0,00	0,00	47,26	99,99
	139	27,868	0,544	36,867	0,014	0,000	0,038	32,684	98,015	23,14	0,43	29,12	0,01	0,00	0,02	47,27	99,99
	SM-10	150	29,300	0,097	36,696	0,020	0,000	0,151	32,620	98,884	24,17	0,08	28,79	0,01	0,00	0,09	46,86
158		33,690	0,147	31,189	0,000	0,017	0,064	33,794	98,901	27,52	0,11	24,23	0,00	0,01	0,04	48,08	99,99
161		38,134	0,233	26,308	0,000	0,000	0,000	34,598	99,273	30,84	0,18	20,24	0,00	0,00	0,00	48,74	100,00

**PENTLANDITA**

Lâmina	Ponto	wt%								at%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM-III	192	27,955	0,932	37,123	0,003	0,002	0,003	32,768	98,786	23,06	0,73	29,13	0,00	0,00	0,00	47,08	100,00
FM-G-1	197	30,334	0,901	34,854	0,000	0,017	0,000	32,912	99,018	24,80	0,62	27,61	0,00	0,00	0,01	46,96	100,00
	199	30,213	0,834	35,536	0,000	0,011	0,000	32,788	99,382	24,78	0,65	27,72	0,00	0,01	0,00	46,84	100,00
	201	29,749	0,913	35,667	0,000	0,000	0,015	32,784	99,128	24,43	0,71	27,89	0,00	0,00	0,01	46,94	99,98
	203	28,442	0,753	36,834	0,037	0,000	0,049	32,408	98,523	23,56	0,59	29,03	0,03	0,00	0,03	46,76	100,00
	204	28,587	0,594	36,294	0,000	0,000	0,000	33,155	98,630	23,54	0,46	28,43	0,00	0,00	0,00	47,56	99,99
	206	30,174	0,795	35,300	0,000	0,002	0,012	32,811	99,094	24,80	0,62	27,61	0,00	0,00	0,01	46,96	100,00
	210	29,615	0,702	35,575	0,011	0,000	0,021	33,228	99,152	24,27	0,54	27,73	0,01	0,00	0,01	47,43	99,99
SM-IV-B	310	30,025	0,133	36,305	0,038	0,014	0,000	33,081	99,596	24,65	0,10	28,18	0,03	0,01	0,00	47,02	99,99
	324	29,112	0,508	37,114	0,000	0,016	0,000	33,098	99,848	23,75	0,39	28,81	0,00	0,01	0,00	47,04	100,00
	327	29,157	0,623	37,039	0,000	0,000	0,000	32,934	99,753	23,83	0,48	28,80	0,00	0,00	0,00	46,89	100,00
FM-SM	330	28,279	0,723	37,517	0,015	0,000	0,000	32,677	99,211	23,26	0,56	29,35	0,01	0,00	0,00	46,81	99,99
	334	27,910	0,773	37,612	0,004	0,000	0,000	32,950	99,249	22,91	0,60	29,37	0,00	0,00	0,00	47,11	99,99
	339	28,521	0,529	37,613	0,013	0,003	0,064	33,014	99,757	23,31	0,41	29,24	0,01	0,00	0,04	46,99	100,00
	341	28,861	0,187	38,169	0,000	0,000	0,000	32,982	100,199	23,50	0,14	29,57	0,00	0,00	0,00	46,78	99,99
	344	28,903	0,831	37,199	0,000	0,003	0,000	33,057	99,993	23,56	0,64	28,85	0,00	0,00	0,00	46,94	99,99
	345	28,453	0,964	36,929	0,000	0,008	0,000	32,902	99,256	23,36	0,75	28,84	0,00	0,01	0,00	47,05	100,01
	347	29,172	0,927	37,012	0,000	0,006	0,000	32,903	100,020	23,80	0,72	28,72	0,00	0,00	0,00	46,76	100,00
SM-T	358	28,386	0,676	37,408	0,000	0,000	0,055	33,084	99,609	23,22	0,52	29,10	0,00	0,00	0,03	47,13	100,00
	363	35,840	0,492	29,377	0,000	0,000	0,052	34,525	100,286	28,80	0,37	22,46	0,00	0,00	0,03	48,33	99,99
	366	28,840	0,860	36,820	0,000	0,053	0,000	33,086	99,659	23,57	0,67	28,63	0,00	0,04	0,00	47,10	100,01
	367	28,622	0,781	37,025	0,000	0,029	0,000	32,995	99,452	23,45	0,61	28,85	0,00	0,02	0,00	47,08	100,01
	370	39,406	0,306	25,061	0,000	0,020	0,000	34,959	99,752	31,67	0,23	19,16	0,00	0,01	0,00	48,93	100,00
SM-H-2	373	29,068	0,609	37,084	0,000	0,000	0,000	33,184	99,945	23,69	0,47	28,75	0,00	0,00	0,00	47,10	100,01
	375	29,690	0,866	36,105	0,000	0,000	0,000	32,984	99,645	24,28	0,67	28,08	0,00	0,00	0,00	46,97	100,00
	378	29,255	0,315	36,396	0,020	0,000	0,093	33,442	99,521	23,88	0,24	28,26	0,01	0,00	0,06	47,55	100,00
	382	28,871	0,597	36,212	0,000	0,010	0,074	33,698	99,462	23,54	0,46	28,09	0,00	0,01	0,04	47,86	100,00
SM-T	403	28,331	0,760	37,106	0,000	0,000	0,049	33,104	99,350	23,21	0,59	28,92	0,00	0,00	0,03	47,24	99,99

**PIRITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM-II	2	47,094	0,000	0,073	0,080	0,031	0,000	53,632	100,910	33,48	0,00	0,05	0,05	0,02	0,00	66,40	100,00
	3	47,158	0,000	0,037	0,022	0,000	0,052	53,887	101,156	33,42	0,00	0,02	0,01	0,00	0,03	66,51	99,99
	4	46,887	0,000	0,170	0,023	0,000	0,002	53,489	100,571	33,43	0,00	0,12	0,01	0,00	0,00	66,43	99,99
	5	47,378	0,000	0,176	0,019	0,000	0,000	53,447	101,020	33,68	0,00	0,12	0,01	0,00	0,00	66,18	99,99
	6	46,681	0,000	0,172	0,028	0,000	0,000	53,679	100,560	33,26	0,00	0,12	0,02	0,00	0,00	66,61	100,01
	7	46,886	0,000	0,192	0,000	0,004	0,059	53,319	100,460	33,49	0,00	0,13	0,00	0,00	0,03	66,34	99,99
	8	47,295	0,000	0,128	0,004	0,000	0,000	53,496	100,923	33,64	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	66,27	100,00
	9	47,191	0,000	0,084	0,024	0,000	0,000	53,339	100,638	33,66	0,00	0,06	0,01	0,00	0,00	66,27	100,00
	10	47,095	0,000	0,293	0,033	0,000	0,064	53,571	101,056	33,43	0,00	0,20	0,02	0,00	0,03	66,31	99,99
	11	46,923	0,000	0,238	0,000	0,000	0,036	53,326	100,523	33,50	0,00	0,16	0,00	0,00	0,02	66,32	100,00
	12	46,685	0,000	0,277	0,036	0,003	0,000	53,308	100,309	33,39	0,00	0,19	0,02	0,00	0,00	66,40	100,00
	13	47,108	0,003	0,233	0,035	0,000	0,031	53,637	101,047	33,46	0,00	0,16	0,02	0,00	0,02	66,35	100,01
	14	47,529	0,030	0,196	0,027	0,000	0,003	52,486	100,271	34,15	0,02	0,13	0,02	0,00	0,00	65,68	100,00
	15	47,052	0,000	0,270	0,023	0,000	0,008	53,074	100,427	33,66	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	66,13	99,97
	16	46,969	0,000	0,000	0,264	0,160	0,000	53,727	101,120	33,33	0,00	0,00	0,16	0,10	0,00	66,41	100,00
	17	47,312	0,000	0,206	0,084	0,004	0,033	53,357	100,996	33,66	0,00	0,14	0,05	0,00	0,02	66,12	99,99
	FM-SM-2	16	44,886	2,281	0,450	0,020	0,029	0,037	52,604	100,307	32,25	1,55	0,31	0,01	0,02	0,02	65,84
23		45,681	1,957	0,236	0,039	0,035	0,000	52,870	100,818	32,65	1,33	0,16	0,02	0,02	0,00	65,82	100,00
24		47,053	0,260	0,477	0,000	0,049	0,006	52,582	100,427	33,76	0,18	0,33	0,00	0,03	0,00	65,71	100,01
SM	25	46,651	0,000	0,418	0,526	0,000	0,000	53,577	101,172	33,13	0,00	0,28	0,33	0,00	0,00	66,26	100,00
	27	46,625	0,000	0,611	0,002	0,016	0,000	52,721	99,975	33,53	0,00	0,42	0,00	0,01	0,00	66,04	100,00
	29	45,646	0,000	2,105	0,021	0,000	0,000	52,545	100,317	32,80	0,00	1,44	0,01	0,00	0,00	65,75	100,00
	31	44,962	0,000	2,541	0,027	0,019	0,096	52,460	100,105	32,38	0,00	1,74	0,02	0,01	0,05	65,80	100,00
	37	46,390	0,000	0,776	0,000	0,029	0,000	52,012	99,207	33,68	0,00	0,54	0,00	0,02	0,00	65,77	100,01
	40	46,926	0,000	0,523	0,012	0,011	0,065	52,373	99,910	33,83	0,00	0,36	0,01	0,01	0,03	65,76	100,00
	43	43,468	0,000	4,184	0,013	0,004	0,046	52,667	100,382	31,22	0,00	2,86	0,01	0,00	0,02	65,89	100,00
	45	44,146	0,001	3,409	0,000	0,000	0,048	52,417	100,021	31,82	0,00	2,34	0,00	0,00	0,03	65,81	100,00
47	46,722	0,000	0,556	0,007	0,003	0,000	52,417	99,705	33,72	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	65,89	99,99	
FM-SM-1	65	45,734	0,000	1,661	0,000	0,000	0,000	51,812	99,207	33,25	0,00	1,15	0,00	0,00	0,00	65,60	100,00
	67	45,263	0,000	1,899	0,000	0,000	0,003	51,934	99,099	32,91	0,00	1,31	0,00	0,00	0,00	65,77	99,99
	70	46,155	0,000	1,088	0,000	0,000	0,000	51,865	99,108	33,56	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	65,69	100,00
	72	46,055	0,014	1,443	0,000	0,000	0,000	51,751	99,263	33,48	0,01	1,00	0,00	0,00	0,00	65,52	100,01
SM-VII	103	46,112	0,000	0,314	0,009	0,031	0,072	51,913	98,451	33,68	0,00	0,22	0,01	0,02	0,04	66,04	100,01

**PIRITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM-VII	106	46,278	0,000	0,194	0,335	0,000	0,000	52,502	99,309	33,49	0,00	0,13	0,21	0,00	0,00	66,17	100,00
	107	45,816	0,011	1,002	0,000	0,000	0,077	51,694	98,600	33,47	0,01	0,70	0,00	0,00	0,04	65,78	100,00
	114	46,389	0,000	0,645	0,010	0,020	0,066	51,574	98,704	33,88	0,00	0,45	0,01	0,01	0,04	65,61	100,00
SM-10	152	46,183	0,000	1,028	0,000	0,016	0,000	51,566	98,793	33,71	0,00	0,71	0,00	0,01	0,00	65,56	99,99
	156	45,468	0,002	1,654	0,037	0,000	0,000	51,871	99,032	33,09	0,00	1,14	0,02	0,00	0,00	65,74	99,99
	166	46,038	0,000	1,195	0,000	0,000	0,000	51,953	99,186	33,44	0,00	0,83	0,00	0,01	0,01	65,73	100,02
	172	45,661	0,000	1,478	0,005	0,000	0,051	51,752	98,947	33,27	0,00	1,02	0,00	0,00	0,03	65,68	100,00
	174	45,847	0,000	1,168	0,013	0,000	0,000	51,682	98,710	33,47	0,00	0,81	0,01	0,00	0,00	65,71	100,00
SM-III	194	46,634	0,000	0,423	0,000	0,000	0,000	51,908	98,965	33,93	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00	65,78	100,00
	195	45,190	0,000	1,788	0,000	0,000	0,000	51,749	98,727	32,98	0,00	1,24	0,00	0,00	0,00	65,78	100,00
	196	45,779	0,000	1,203	0,000	0,006	0,000	51,386	98,374	33,56	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	65,60	100,00
SM-T	364	45,892	0,013	1,572	0,000	0,000	0,095	52,372	99,944	33,09	0,01	1,08	0,00	0,00	0,05	65,77	100,00
	402	45,870	0,000	1,395	0,005	0,003	0,000	52,309	99,582	33,16	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	65,87	99,99
	405	45,485	0,002	1,734	0,000	0,014	0,090	52,608	99,933	32,76	0,00	1,19	0,00	0,01	0,05	65,99	100,00
SM-4D-B	393	43,475	0,000	4,277	0,295	0,004	0,081	52,793	100,925	31,09	0,00	2,91	0,19	0,00	0,04	65,76	99,99

**PIRROTITA**

Lâmina	Ponto	WT%								ATM%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
MM-17	2	59,377	0,000	0,566	0,000	0,055	0,068	39,864	99,930	45,87	0,00	0,42	0,00	0,04	0,04	53,64	100,01
	4	58,981	0,000	0,503	0,000	0,026	0,100	39,995	99,605	45,64	0,00	0,37	0,00	0,02	0,06	53,91	100,00
	6	59,220	0,000	0,442	0,076	0,000	0,000	40,016	99,754	45,76	0,00	0,32	0,05	0,00	0,00	53,86	99,99
	10	59,513	0,000	0,487	0,001	0,000	0,000	39,810	99,811	46,02	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	53,62	100,00
	12	59,162	0,000	0,502	0,002	0,000	0,069	39,732	99,467	45,90	0,00	0,37	0,00	0,00	0,04	53,69	100,00
	15	59,088	0,000	0,498	0,000	0,000	0,000	39,732	99,318	45,89	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	53,74	100,00
FM-G-3	2	59,686	0,000	0,352	0,000	0,000	0,040	39,400	99,478	46,38	0,00	0,26	0,00	0,00	0,02	53,33	99,99
	3	59,836	0,000	0,587	0,000	0,000	0,068	39,340	99,831	46,40	0,00	0,43	0,00	0,00	0,04	53,13	100,00
	6	59,544	0,000	0,374	0,000	0,000	0,000	39,414	99,332	46,32	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	53,40	100,00
	8	59,552	0,000	0,367	0,000	0,000	0,000	39,660	99,579	46,17	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	53,56	100,00
	12	59,565	0,000	0,190	0,022	0,032	0,019	39,916	99,744	46,06	0,00	0,14	0,02	0,02	0,01	53,76	100,01
	14	59,261	0,000	0,292	0,000	0,000	0,000	39,911	99,464	45,92	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	53,86	100,00
	21	59,274	0,000	0,152	0,000	0,000	0,079	40,101	99,606	45,83	0,00	0,11	0,00	0,00	0,05	54,01	100,00
FM-SM	1	58,399	0,038	1,549	0,000	0,006	0,000	38,862	98,854	45,77	0,03	1,15	0,00	0,00	0,00	53,05	100,00
	4	58,590	0,000	1,536	0,000	0,000	0,058	39,323	99,507	45,57	0,00	1,14	0,00	0,00	0,03	53,27	100,01
	6	58,586	0,000	1,284	0,000	0,020	0,032	39,464	99,386	45,56	0,00	0,95	0,00	0,01	0,02	53,46	100,00
	8	58,785	0,000	1,142	0,011	0,000	0,000	39,151	99,089	45,90	0,00	0,85	0,01	0,00	0,00	53,24	100,00
	9	58,941	0,008	1,332	0,028	0,026	0,023	39,203	99,561	45,85	0,01	0,99	0,02	0,02	0,01	53,11	100,01
	11	58,215	0,000	1,684	0,015	0,018	0,053	39,432	99,417	45,28	0,00	1,25	0,01	0,01	0,03	53,42	100,00
	13	58,461	0,008	1,314	0,000	0,000	0,040	39,210	99,033	45,66	0,01	0,98	0,00	0,00	0,02	53,34	100,01
	15	58,491	0,000	1,632	0,000	0,000	0,000	39,277	99,400	45,53	0,00	1,21	0,00	0,00	0,00	53,26	100,00
	18	59,050	0,000	0,909	0,000	0,035	0,030	38,974	98,998	46,19	0,00	0,68	0,00	0,02	0,02	53,10	100,01
	20	58,635	0,000	0,842	0,012	0,033	0,021	39,207	98,750	45,89	0,00	0,63	0,01	0,02	0,01	53,44	100,00
	22	58,984	0,000	1,281	0,000	0,000	0,003	39,275	99,543	45,86	0,00	0,95	0,00	0,00	0,00	53,19	100,00
SM	41	59,294	0,000	0,403	0,013	0,024	0,000	39,692	99,426	46,02	0,00	0,30	0,01	0,02	0,00	53,66	100,01
	48	59,151	0,000	0,630	0,017	0,000	0,000	39,507	99,305	46,00	0,00	0,47	0,01	0,00	0,00	53,52	100,00
FM-SM-1	55	58,617	0,000	1,158	0,000	0,000	0,024	38,990	98,789	45,92	0,00	0,86	0,00	0,00	0,01	53,20	99,99
	61	59,282	0,000	0,503	0,001	0,026	0,000	39,074	98,886	46,37	0,00	0,37	0,00	0,02	0,00	53,24	100,00
	64	59,905	0,000	0,737	0,008	0,000	0,000	38,897	99,547	46,33	0,00	0,55	0,01	0,00	0,00	53,11	100,00
	74	59,289	0,000	0,494	0,000	0,031	0,000	39,856	99,670	46,40	0,00	0,37	0,00	0,02	0,00	53,21	100,00
SM	76	59,653	0,000	0,667	0,012	0,023	0,002	38,859	99,216	46,60	0,00	0,50	0,01	0,02	0,00	52,88	100,01
	79	60,029	0,000	0,572	0,010	0,000	0,052	38,846	99,509	46,80	0,00	0,42	0,01	0,00	0,03	52,74	100,00

**PIRROTITA**

Lâmina	Ponto	WT%								ATM%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM	82	60,195	0,000	0,671	0,012	0,000	0,044	38,733	99,655	46,90	0,00	0,50	0,01	0,00	0,03	52,57	100,01
	84	59,645	0,000	0,643	0,000	0,000	0,000	38,810	99,098	46,65	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	52,87	100,00
	88	59,400	0,000	0,548	0,021	0,000	0,000	38,957	98,926	46,48	0,00	0,41	0,01	0,00	0,00	53,10	100,00
	59	59,319	0,000	0,345	0,021	0,024	0,000	39,062	98,771	46,44	0,00	0,26	0,01	0,02	0,00	53,27	100,00
	91	59,485	0,000	0,621	0,004	0,000	0,000	38,638	98,748	46,70	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	52,83	99,99
	93	59,569	0,000	0,455	0,000	0,000	0,000	39,004	99,028	46,56	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	53,10	100,00
	95	59,733	0,000	0,302	0,007	0,000	0,076	39,409	99,527	46,40	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	53,22	99,84
	98	59,536	0,000	0,359	0,000	0,044	0,000	39,374	99,313	46,33	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	53,37	99,97
	100	59,634	0,000	0,290	0,060	0,000	0,000	39,460	99,444	46,34	0,00	0,21	0,04	0,00	0,00	53,41	100,00
	SM-IV	117	57,666	0,022	1,415	0,000	0,001	0,021	39,228	98,353	45,27	0,02	1,06	0,00	0,00	0,01	53,64
120		58,183	0,000	0,815	0,034	0,034	0,000	39,191	98,257	45,71	0,00	0,61	0,02	0,02	0,00	53,63	99,99
124		58,196	0,000	0,746	0,010	0,000	0,000	39,161	98,113	45,78	0,00	0,56	0,01	0,00	0,00	53,66	100,01
126		58,827	0,000	0,788	0,013	0,033	0,009	39,010	98,680	46,11	0,00	0,59	0,01	0,02	0,01	53,26	100,00
129		56,158	0,000	1,720	0,013	0,000	0,020	40,495	98,406	43,75	0,00	1,27	0,01	0,00	0,01	54,95	99,99
130		58,074	0,000	0,768	0,001	0,000	0,043	39,239	98,125	45,66	0,00	0,06	0,00	0,00	0,02	53,74	99,48
133		58,166	0,000	0,957	0,000	0,000	0,000	39,223	98,346	45,66	0,00	0,71	0,00	0,00	0,00	53,63	100,00
136		58,097	0,000	0,697	0,012	0,000	0,087	39,139	98,032	45,74	0,00	0,52	0,01	0,00	0,05	53,68	100,00
137		58,074	0,000	0,775	0,025	0,028	0,000	39,238	98,140	45,66	0,00	0,58	0,02	0,02	0,00	53,73	100,01
141		57,828	0,006	1,162	0,034	0,000	0,000	39,067	98,097	45,53	0,00	0,87	0,02	0,00	0,00	53,57	99,99
SM-10	148	58,698	0,000	0,535	0,008	0,000	0,008	39,082	98,331	46,11	0,00	0,40	0,01	0,00	0,00	53,48	100,00
	155	58,562	0,013	0,574	0,000	0,000	0,018	39,303	98,470	45,90	0,01	0,43	0,00	0,00	0,01	53,65	100,00
	160	58,981	0,000	0,519	0,008	0,000	0,037	39,409	98,954	46,03	0,00	0,39	0,01	0,00	0,02	53,56	100,01
	163	58,924	0,000	0,521	0,000	0,000	0,029	39,277	98,751	46,09	0,00	0,39	0,00	0,00	0,02	53,51	100,01
	167	58,959	0,000	0,574	0,000	0,016	0,014	39,110	98,673	46,19	0,00	0,43	0,00	0,01	0,01	53,36	100,00
	169	58,791	0,000	0,623	0,036	0,000	0,012	39,056	98,518	46,13	0,00	0,46	0,02	0,00	0,01	53,37	99,99
SM-III	187	59,238	0,000	0,314	0,204	0,020	0,000	38,888	98,664	46,47	0,00	0,23	0,14	0,01	0,00	53,14	99,99
FM-G-1	198	59,141	0,000	0,207	0,006	0,000	0,000	38,722	98,076	46,65	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	53,19	99,99
	200	58,963	0,000	0,327	0,000	0,000	0,000	38,959	98,249	46,38	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	53,38	100,00
	202	59,252	0,000	0,317	0,000	0,000	0,081	38,919	98,569	46,51	0,00	0,24	0,00	0,00	0,05	53,21	100,01
	205	58,903	0,000	0,320	0,001	0,009	0,000	39,147	98,380	46,23	0,00	0,24	0,00	0,01	0,00	53,52	100,00
	209	59,203	0,000	0,323	0,031	0,026	0,041	39,042	98,666	46,40	0,00	0,24	0,02	0,02	0,02	53,30	100,00
SM-B	309	59,021	0,000	0,965	0,000	0,013	0,000	39,013	99,012	46,15	0,00	0,72	0,00	0,01	0,00	53,13	100,01
SM-IV-B	311	58,959	0,000	0,689	0,000	0,013	0,000	39,312	98,973	46,03	0,00	0,51	0,00	0,01	0,00	53,46	100,01

**PIRROTITA**

Lâmina	Ponto	WT%								ATM%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM-IV-B	312	58,777	0,000	0,711	0,000	0,043	0,000	39,258	98,789	45,97	0,00	0,53	0,00	0,03	0,00	53,48	100,01
	313	59,088	0,000	0,647	0,000	0,000	0,000	39,175	98,910	46,19	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	53,33	100,00
	314	59,067	0,000	0,695	0,000	0,000	0,000	39,240	99,002	46,12	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	53,36	100,00
	317	59,386	0,000	0,675	0,024	0,016	0,244	39,019	99,364	46,32	0,00	0,50	0,02	0,01	0,11	53,01	99,97
	320	55,723	0,014	2,090	0,110	0,005	0,000	40,525	98,467	43,32	0,01	1,71	0,08	0,00	0,00	54,88	100,00
	321	59,225	0,000	0,621	0,000	0,000	0,000	39,061	98,907	46,32	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	53,21	99,99
	323	56,915	0,003	1,225	0,018	0,040	0,000	40,229	98,430	44,40	0,00	0,91	0,01	0,03	0,00	54,65	100,00
	326	58,856	0,000	0,718	0,004	0,000	0,017	38,975	98,570	46,18	0,00	0,54	0,00	0,00	0,01	53,27	100,00
	328	58,500	0,000	1,145	0,000	0,000	0,093	39,195	98,933	45,73	0,00	0,85	0,00	0,00	0,05	53,26	99,89
FM-SM	332	58,617	0,000	1,249	0,000	0,000	0,000	38,652	98,518	46,11	0,00	0,93	0,00	0,00	0,00	52,96	100,00
	336	58,662	0,010	1,428	0,000	0,017	0,031	38,895	99,043	45,64	0,01	1,07	0,00	0,01	0,02	53,25	100,00
	338	58,574	0,000	1,000	0,221	0,024	0,000	39,033	98,852	45,86	0,00	0,74	0,15	0,02	0,00	53,23	100,00
	340	56,048	0,000	2,253	0,000	0,000	0,000	40,694	98,995	43,42	0,00	1,66	0,00	0,00	0,00	54,91	99,99
	342	57,950	0,000	1,786	0,000	0,000	0,000	38,972	98,708	45,44	0,00	1,33	0,00	0,00	0,00	53,23	100,00
	346	59,565	0,000	0,484	0,039	0,009	0,000	38,893	98,990	46,60	0,00	0,36	0,03	0,01	0,00	53,00	100,00
	348	58,877	0,000	0,837	0,008	0,012	0,000	39,090	98,824	46,08	0,00	0,62	0,01	0,01	0,00	53,28	100,00
SM-T	357	59,222	0,000	0,548	0,000	0,000	0,000	39,027	98,797	46,37	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	53,22	100,00
	360	59,219	0,000	0,332	0,003	0,035	0,000	38,537	98,126	46,74	0,00	0,25	0,00	0,02	0,00	52,98	99,99
	362	59,219	0,000	0,366	0,020	0,000	0,000	39,283	98,888	46,26	0,00	0,27	0,01	0,00	0,00	53,45	99,99
	369	59,519	0,000	0,464	0,000	0,020	0,000	39,352	99,355	46,31	0,00	0,34	0,00	0,01	0,00	53,33	99,99
SM-H-2	372	59,396	0,000	0,412	0,036	0,000	0,043	39,174	99,061	46,37	0,00	0,31	0,02	0,00	0,02	53,27	99,99
	374	59,570	0,000	0,446	0,002	0,020	0,046	38,711	98,795	46,73	0,00	0,33	0,00	0,01	0,03	52,89	99,99
	377	59,504	0,000	0,466	0,018	0,000	0,006	39,240	99,234	46,37	0,00	0,35	0,01	0,00	0,00	53,26	99,99
	380	59,274	0,000	0,541	0,018	0,033	0,000	39,117	98,983	46,32	0,00	0,40	0,01	0,02	0,00	53,24	99,99
	381	58,546	0,000	0,407	0,016	0,029	0,093	39,281	98,372	45,93	0,00	0,30	0,01	0,02	0,05	53,68	99,99

**VIOLARITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
MM-17	3	16,249	0,755	38,322	0,000	0,019	0,015	41,685	97,045	12,89	0,57	28,92	0,00	0,01	0,01	57,60	100,00
	8	19,695	0,669	35,335	0,051	0,000	0,000	42,374	98,124	15,41	0,52	26,30	0,04	0,00	0,00	57,74	100,01
	11	19,455	0,814	35,399	0,048	0,000	0,000	42,393	98,109	15,23	0,60	26,35	0,03	0,00	0,00	57,79	100,00
	16	18,221	0,688	36,783	0,055	0,230	0,000	42,414	98,391	14,26	0,51	27,38	0,04	0,02	0,00	57,80	100,01
	18	16,743	0,735	38,710	0,037	0,026	0,000	42,090	98,341	13,12	0,55	28,85	0,03	0,02	0,00	57,44	100,01
	19	18,262	0,766	36,327	0,029	0,047	0,002	41,869	97,302	14,43	0,57	27,31	0,02	0,03	0,00	57,63	99,99
	20	15,208	0,770	39,373	0,000	0,000	0,049	42,009	97,409	12,01	0,58	29,58	0,00	0,00	0,03	57,80	100,00
	24	17,902	0,730	36,869	0,032	0,000	0,000	41,516	97,049	14,21	0,55	27,83	0,02	0,00	0,00	57,39	100,00
	25	18,090	0,739	36,990	0,026	0,000	0,015	42,601	98,461	14,11	0,55	27,44	0,02	0,00	0,01	57,87	100,00
FM-SM-2	3	19,029	0,717	36,238	0,000	0,043	0,034	41,130	97,191	15,12	0,54	27,38	0,00	0,03	0,02	56,91	100,00
	17	18,457	0,439	37,413	0,000	0,005	0,000	41,029	97,343	14,66	0,33	28,26	0,00	0,00	0,00	56,75	100,00
SM	42	25,299	1,350	29,965	0,000	0,000	0,000	42,728	99,342	19,54	0,99	22,01	0,00	0,00	0,00	57,47	100,01
	44	28,407	0,580	26,980	0,000	0,000	0,000	42,358	98,325	22,12	0,43	19,99	0,00	0,00	0,00	57,46	100,00
FM-SM-1	51	24,367	0,773	31,420	0,122	0,025	0,000	40,858	97,565	19,30	0,58	23,67	0,08	0,02	0,00	56,35	100,00
	57	22,236	0,988	33,658	0,229	0,012	0,000	41,887	99,010	17,32	0,73	24,94	0,16	0,01	0,00	56,84	100,00
	58	25,337	0,055	31,003	0,000	0,025	0,048	41,349	97,817	19,96	0,04	23,23	0,00	0,02	0,03	56,73	100,01
	60	21,660	1,032	34,000	0,005	0,000	0,029	41,620	98,346	16,99	0,77	25,37	0,00	0,00	0,02	56,86	100,01
	63	22,268	0,615	33,193	0,016	0,000	0,000	41,011	97,103	17,69	0,46	25,08	0,01	0,00	0,00	56,75	99,99
	66	27,607	0,000	28,621	0,000	0,000	0,000	41,991	98,219	21,57	0,00	21,27	0,00	0,00	0,00	57,15	99,99
SM-VII	102	12,881	2,795	39,369	1,515	0,027	0,000	40,718	97,305	10,28	2,11	29,90	1,06	0,02	0,00	56,62	99,99
	109	15,965	2,266	34,844	3,479	0,033	0,000	40,586	97,173	12,77	1,72	26,51	2,45	0,02	0,00	56,54	100,01
	111	14,035	2,443	39,119	1,441	0,016	0,000	41,020	98,074	11,11	1,83	29,47	1,00	0,01	0,00	56,57	99,99
SM-IV	121	21,708	0,626	33,752	0,000	0,014	0,000	41,862	97,962	17,05	0,47	25,21	0,00	0,01	0,00	57,26	100,00
SM-10	149	21,169	0,744	33,548	0,010	0,000	0,000	41,396	96,867	17,34	0,56	25,19	0,01	0,00	0,00	56,91	100,01
	170	22,403	0,609	32,756	0,016	0,000	0,000	41,387	97,171	17,75	0,46	24,68	0,01	0,00	0,00	57,10	100,00
SM-III	181	16,384	1,102	39,416	0,000	0,019	0,000	41,727	98,648	12,84	0,82	29,38	0,00	0,01	0,00	56,95	100,00
	186	15,341	1,208	40,517	0,000	0,000	0,000	41,668	98,734	12,02	0,90	30,20	0,00	0,00	0,00	56,88	100,00
	190	14,071	1,266	42,177	0,036	0,000	0,062	41,189	98,801	11,06	0,94	31,54	0,02	0,00	0,04	56,40	100,00
	193	15,264	1,171	41,627	0,039	0,000	0,017	39,868	97,986	12,17	0,88	31,56	0,03	0,00	0,01	55,35	100,00
SM-IV-B	325	23,597	0,531	32,644	0,000	0,013	0,017	40,370	97,172	18,80	0,40	24,74	0,00	0,01	0,01	56,03	99,99
SM-T	355	26,060	0,959	32,318	0,004	0,000	0,049	41,278	100,668	18,21	0,72	24,27	0,00	0,00	0,03	56,77	100,00
	359	22,887	0,880	32,764	0,000	0,017	0,147	40,891	97,586	18,13	0,66	24,69	0,00	0,01	0,09	56,42	100,00
	365	21,300	1,007	34,993	0,000	0,011	0,062	41,482	98,855	16,66	0,75	26,04	0,00	0,01	0,04	56,51	100,01

**VIOLARITA**

Lâmina	Ponto	wt%								atm%							
		Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	S	Total
SM-T	371	23,820	0,531	31,518	0,000	0,000	0,000	41,506	97,375	18,82	0,40	23,68	0,00	0,00	0,00	57,10	100,00
SM-4D-B	392	23,585	1,788	32,024	0,104	0,000	0,014	42,155	99,670	18,25	1,31	23,57	0,07	0,00	0,01	56,80	100,01
	395	25,084	1,230	29,916	0,106	0,000	0,023	42,883	99,242	19,37	0,90	21,97	0,07	0,00	0,01	57,67	99,99
	399	25,963	0,000	30,689	0,281	0,009	0,000	41,530	98,472	20,32	0,00	22,85	0,19	0,01	0,00	56,62	99,99
	400	23,222	1,143	32,906	0,065	0,000	0,000	41,395	98,731	18,18	0,85	24,50	0,04	0,00	0,00	56,43	100,00